

Análise do conteúdo harmônico do sinal de emissão acústica quando da queima no processo de retificação

Carlos César de Paula Souza (UNESP) carlos.depaula@bertin.com.br

Ricardo Costa Prazeres (UNESP) riccprazeres@yahoo.com.br

Paulo Roberto de Aguiar (UNESP) aguiarpr@feb.unesp.br

Eduardo Carlos Bianchi (UNESP) bianchi@feb.unesp.br

Resumo

Um dos problemas mais críticos na implantação do processo de retificação inteligente é a detecção automática de queima superficial nas peças. A queima ocorre durante o corte da peça pelo rebolo, quando a quantidade de energia gerada na área de contato produz um aumento de temperatura suficiente para provocar uma mudança localizada de fase no material. Dada a importância de se obter um meio eficaz para a detecção e predição da queima no processo de retificação, foi realizado o mapeamento em frequência do espectro de emissão acústica (EA) relacionado com a queima. Pesquisadores têm estudado várias ferramentas estatísticas utilizando o sinal de EA e potência elétrica de maneira a relacioná-las com os danos térmicos ocorridos durante a usinagem. O sinal puro traz muita informação do processo, e, portanto, tem certa vantagem sobre o sinal RMS geralmente utilizado nas pesquisas de retificação. Desta forma, o sinal puro de EA obtido em ensaios de retificação foi analisado através de rotinas implementadas no software Matlab, onde se obteve informações muito úteis sobre suas componentes harmônicas através da Transformada Rápida de Fourier. Assim, através deste estudo será possível a implementação de novas ferramentas estatísticas, e, portanto, uma contribuição importante para a automação inteligente do processo.

Palavras-chave: *Emissão Acústica; Transformada Rápida de Fourier; Retificação; Queima.*

Abstract

One of the most critical problems in the implementation of the intelligent grinding process is the automatic detection of superficial burning in the workpieces. The burning occurs during the cut of the workpiece by the wheel, when the amount of energy generated in the contact area produces enough increase of temperature to cause a located change of phase in the material. Given the importance of getting an efficient way for the detection and prediction of the burning in the grinding process, the mapping in frequency of the spectral acoustic emission (EA) related with the burning was done. Researchers have studied some statistical tools using the EA signal and electric power in the way to relate them with the thermal damages occurrences during the grinding process. The raw acoustic emission signal brings much information of the process, and, therefore, it has certain advantage on RMS signal (Root Mean Square) generally used in the grinding research. The raw acoustic emission signal gotten in the grinding assays was analyzed through routines implemented in Matlab software, and very useful information on its harmonic components was gotten through the Fast Fourier Transform (FFT). Thus, through this study the implementation of new statistical tools will be possible, and, therefore, an important contribution for the intelligent automation of the process.

Keywords: *grinding; burning; raw signal; acoustic emission; Fast Fourier Transform*

1. Introdução

Um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de componentes mecânicos de precisão é a retificação. Trata-se de um dos processos de menor domínio tecnológico, se comparado aos processos convencionais de usinagem, além de ter a função de solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a seqüência de fabricação. Poucos são os técnicos e engenheiros capazes de solucionar os problemas que ocorrem durante o processo produtivo (Kegg apud Bianchi, 1999), já que este ainda é pouco dominado tecnologicamente. Isto talvez tenha origem na errônea crença de que o processo é muito complexo para se compreender, devido à multiplicidade de arestas cortantes e sua geometria irregular, altas velocidades de corte e pequenas profundidades de corte que variam de grão para grão.

Danos causados na peça de trabalho são de alto custo, uma vez que todo processo anterior, além da própria retificação, é perdido quando uma parte é danificada neste estágio. Os danos mais comuns na operação de retificação são queima, trincas e ou tensões residuais indesejáveis. No caso dos metais, a principal causa de danos é a excessiva entrada térmica na superfície usinada (Aguiar, 2004).

Segundo Aguiar (1997), um dos problemas mais críticos na implantação do processo de retificação inteligente é a detecção automática de queima superficial nas peças. A queima ocorre durante o corte da peça pelo rebolo, quando a quantidade de energia gerada na área de contato produz um aumento de temperatura suficiente para provocar uma mudança localizada de fase no material da peça. Tal ocorrência pode ser muitas vezes observada visualmente pelo escurecimento da superfície da peça. De acordo com Malkin (1989), a ocorrência da queima é esperada a partir do momento que a temperatura crítica é ultrapassada na região de usinagem, estimando a incidência da queima acima dos 720°C. Littman e Wulff (1955) constataram que à 860°C acarretaria o endurecimento das camadas superficiais.

Visando a implementação de sistemas mais inteligentes em ambientes industriais e controle dos danos causados no processo de retificação, certos autores têm estudado várias ferramentas estatísticas utilizando o sinal de emissão acústica (puro e RMS) e potência elétrica de maneira a relacioná-las com os danos térmicos ocorridos durante a usinagem (Aguiar, 1997, 2003). Conforme estudos de Wang et al. (2001) e Aguiar (2003), selecionou-se faixas de frequências de forma a testar determinadas ferramentas estatísticas no sinal puro de emissão acústica. Assim, pode-se inferir a partir destes estudos que a queima no processo de retificação possui frequências mais significativas em determinadas faixas. No entanto, não foi investigado como essas amplitudes em frequência se comportam conforme a queima ocorre. Isto será explorado neste trabalho com técnicas da transformada rápida de Fourier (Lyons, 1997; Proakis, 1996) implementadas através do Matlab.

2. Método Proposto

2.1. Aquisição de Dados anteriormente realizadas

Não foram realizados ensaios experimentais, pois estes já haviam sido realizados anteriormente numa máquina retificadora plana, com rebolo de óxido de alumínio e rebolo de CBN.

Já com posse das informações relacionadas aos ensaios experimentais, serão apresentadas algumas informações sobre a aquisição dos dados relacionados a este trabalho.

Dados do sinal puro de emissão acústica foram coletados para quinze (15) ensaios utilizando-se o aço ABNT 1045 e VC131, a uma frequência de amostragem de 2,5 MHz. Para tal aquisição, uma placa da National Instruments de 2 canais, 5 MHz de frequência de amostragem, modelo PCI-6111E foi utilizada em um microcomputador do tipo PC de 700 MHz, 384 MB de RAM, disco rígido do tipo SCSI. Um filtro Anti-aliasing foi projetado com

o objetivo de filtrar frequências inferiores a 1 MHz, e assim, obedecer ao critério de amostragem de Nyquist. A maioria dos parâmetros foi mantida constante ao longo dos ensaios. Entretanto, a profundidade de corte foi variada através do avanço do rebolo sobre a peça ou pelo uso de uma geometria da peça previamente construída. Todas as peças foram submetidas a testes pós-retificação, e os sinais de queima foram assinalados.

Os ensaios anteriormente realizados na máquina retificadora plana são para dois tipos de aço, ABNT1045 e VC131, e dois tipos de rebolos, óxido de alumínio e CBN resinóide. Estes resultados foram apresentados a partir de algumas ferramentas de processamento de sinais.

2.2. Estatísticas de processamento de sinais

2.2.1. RMS do sinal de emissão acústica

Para um dado tempo t , o valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela Equação 1 (Webster et al., 1996; Liu, 1991).

$$AE_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t AE_{rms}^2(\tau) d\tau} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AE_{rms}^2(i)} \quad (1)$$

onde T é o tempo de integração e N é o número discreto de dados de EA no intervalo de T . Em muitos casos, AE_{rms} pode ser obtido através do uso de filtro analógico RMS. No presente trabalho, obteve-se digitalmente de acordo com a parte direita da Equação 1, onde T foi considerado 1 ms (Webster et al., 1996).

2.2.2. Transformada Discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) é uma das duas ferramentas mais comuns e poderosas encontradas no campo do processamento digital de sinais (a outra é filtros digitais). A DFT possibilita analisar, manipular e sintetizar sinais que não são possíveis de serem realizados por processamento de sinais contínuos. Embora ela é agora utilizada em vários campos da engenharia, aplicações com DFT continuam crescendo conforme esta ferramenta se torna mais largamente conhecida e entendida. A DFT é um procedimento matemático usado para determinar o conteúdo harmônico ou de frequência de uma seqüência discreta ou sinal discreto no tempo (Lyon, 1997).

A Equação 2 representa a Transformada Discreta de Fourier (Oppenheim & Schaffer, 1998).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad (2)$$

onde $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$; N é o número de amostras; k é inteiro no intervalo $0 \leq k \leq N-1$.

2.2.3. Transformada Rápida de Fourier

Embora a DFT seja um dos procedimentos matemáticos mais diretos para determinar o conteúdo de frequência de uma seqüência no domínio de tempo discreto, ela é muito ineficiente. Conforme o número de pontos em uma DFT aumenta para centenas ou milhares, a quantidade de números necessária para resolvê-la é extremamente excessiva. Depois que o algoritmo de Cooley-Tukey foi publicado em 1965, publicaram-se numerosos artigos com

melhorias, modificações e realizações dos assim chamados algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Yang & Chen, 2002). Antes do advento da FFT, milhares de pontos da DFT levavam tanto tempo para serem calculados que o seu uso era restrito apenas para grandes centros computacionais de pesquisas e universidades (Lyons, 1997).

3. Dados e resultados

Com os dados referentes a ensaios experimentais anteriormente realizados na máquina retificadora plana para dois tipos de aço, ABNT 1045 e VC131, e dois tipos de rebolos, óxido de alumínio e CBN resinóide foi possível a aplicação de ferramentas de processamento de sinais com a finalidade do estudo do conteúdo harmônico do sinal puro de emissão acústica relacionado com o fenômeno da queima. Para isto, foi utilizada a transformada Rápida de Fourier para a análise do espectro de frequência do sinal puro de emissão acústica para diversos ensaios realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão.

3.1. Escolha dos sinais a serem analisados

Com os dados de emissão acústica disponíveis em arquivos binários, foi utilizado o software Matlab para o processamento dos sinais onde se utilizou, inicialmente, o sinal RMS de EA para a perfeita visualização do momento em que a peça, a ser usinada, entra em contato com o rebolo (maiores amplitudes no sinal RMS).

Foram escolhidas três situações de queima diferentes para cada tipo de ensaio – peça sem queima, com queima média (ou leve) e queima severa. Desta forma, foi possível a verificação do comportamento do espectro para cada tipo de queima da peça.

As Tabelas 1, 2 e 3 sintetizam as situações com peças sem queima, peças levemente queimadas, e peças com queimas severas que foram utilizadas na análise espectral. Nestas mesmas tabelas estão o perfil do corte de cada peça analisada.




AÇO ABNT 1045 - REBOLO DE ÓXIDO DE ALÚMINIO-DIÂMETRO = 296.5 mm			
Arquivo (EA)	1045psqea	1045pqa	1045r4qea
Perfil do Corte			
Comentário	Sem queima	Queima leve no início e final	Queima severa do início até o fim

Tabela 1. Características dos arquivos de ensaios com Rebolo Óxido de Alumínio e Aço ABNT 1045 utilizados na análise espectral




AÇO VC131 - REBOLO DE ÓXIDO DE ALÚMINIO-DIÂMETRO = 296.5 mm			
Arquivo (EA)	vc131p5qea	Vc131p6qea	vc131p4qea
Perfil do Corte			
Comentário	Sem queima	Queima branda ao longo da peça	Queima severa ao longo da peça

Tabela 2. Características dos arquivos de ensaios com Rebolo Óxido de Alumínio e Aço VC131 utilizados na análise espectral

AÇO ABNT 1045 - REBOLO DE CBN – DIÂMETRO DE 350 mm




Arquivo (EA)	Cbn1045p4qea	cbn1045r5qea	cbn1045r9qea
Perfil do Corte			
Comentário	Sem queima	Queima branda ao longo da peça	Queima severa ao longo da peça

Tabela 3. Características dos arquivos de ensaios com Rebolo CBN e Aço ABNT 1045 utilizados na análise espectral

3.2. Processamento dos Sinais

Com a visualização do sinal RMS foi possível aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no sinal puro de EA em trechos deste mesmo sinal em que o aço se encontra em contato com o rebolo. Obteve-se, desta maneira, o mapeamento de frequência a partir do sinal puro de emissão acústica, sendo o gráfico de *amplitude em decibéis (dB) versus frequência em Hertz (Hz)*. A FFT foi calculada para 1024 pontos (tamanho da FFT),

Para os três tipos de queima, comentados anteriormente, há Figuras exemplificando o processamento do sinal de EA. Nas Figuras de 1 a 9 tem-se o sinal puro do trecho analisado e logo abaixo o espectro (FFT) deste mesmo trecho.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os resultados para os ensaios com rebolo de óxido de alumínio e Aço ABNT 1045.

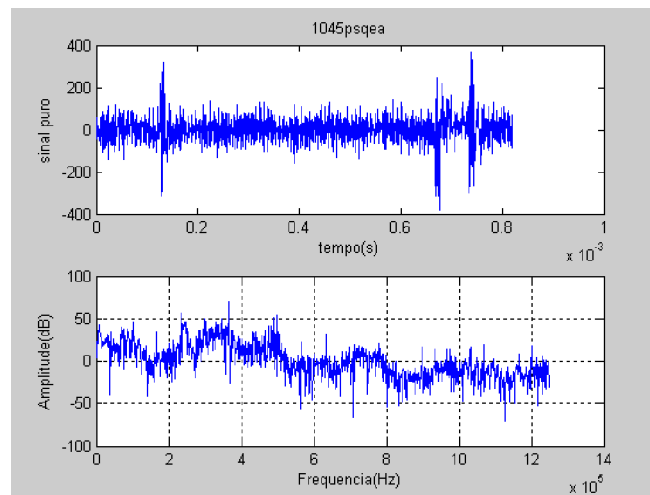


Figura 1. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio e Aço ABNT 1045 sem queima na peça.

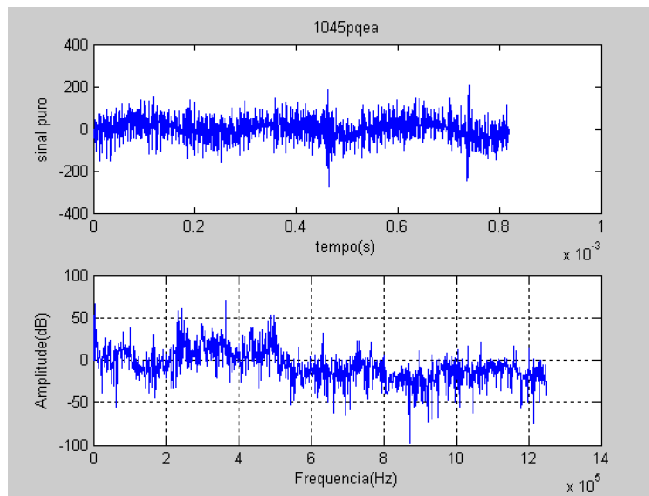


Figura 2. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio e Aço ABNT 1045 com queima leve do início ao fim.

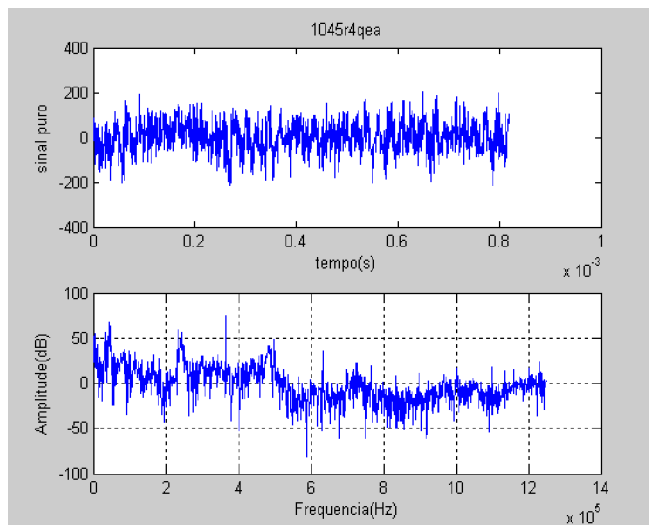


Figura 3. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio e Aço ABNT 1045 com queima severa do início ao fim na peça.

As Figuras 4, 5 e 6 mostram os resultados para os ensaios com Rebolo de óxido de alumínio e Aço VC131.

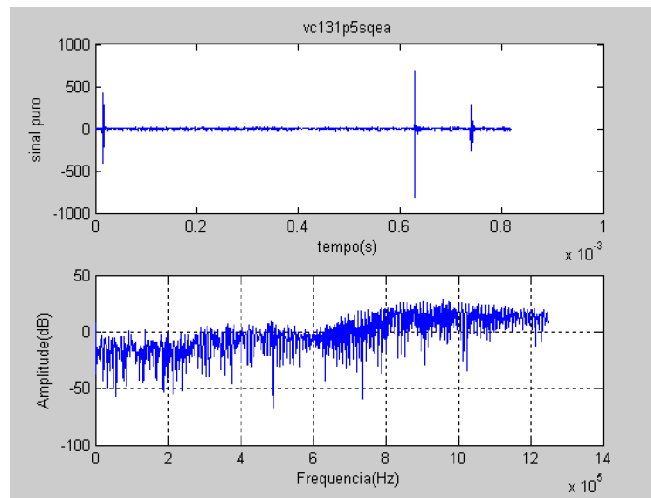


Figura 4. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio e Aço VC131 sem queima na peça.

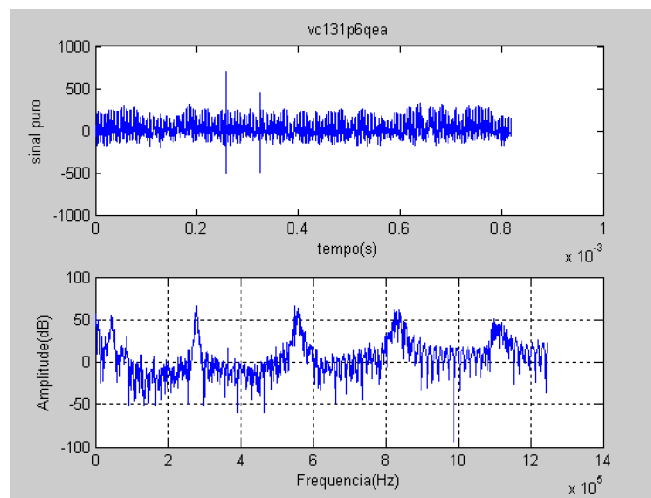


Figura 5. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio e Aço VC131 com queima branda ao longo da peça.

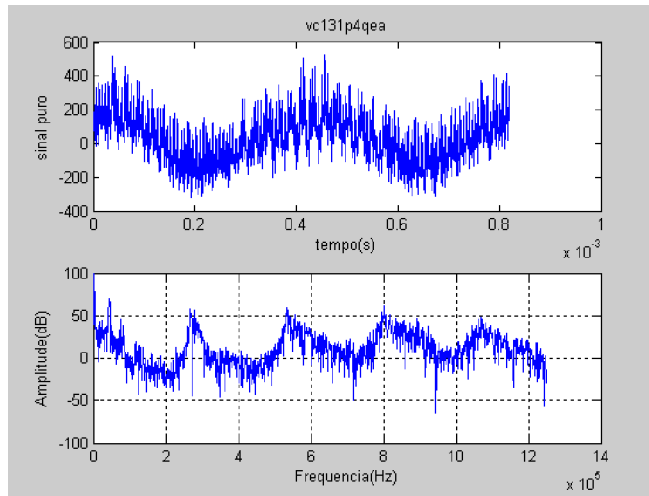


Figura 6. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio e Aço VC131 com queima severa ao longo da peça.

Finalmente, as Figuras 7, 8 e 9 mostram os resultados para os ensaios com Rebolo CBN e Aço ABNT 1045.

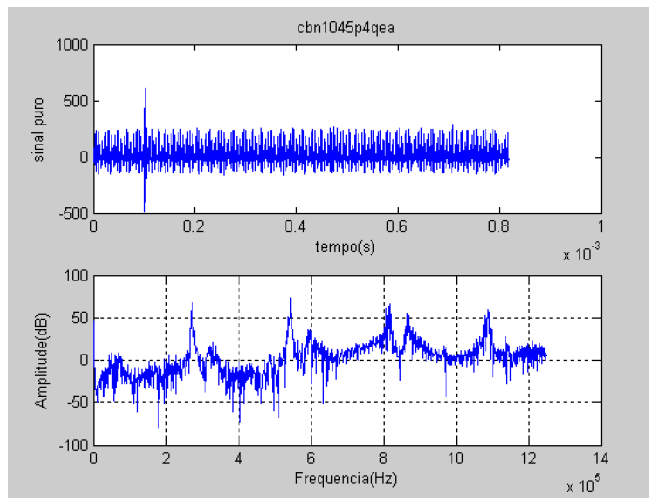


Figura 7. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo CBN e Aço ABNT 1045 sem queima da peça.

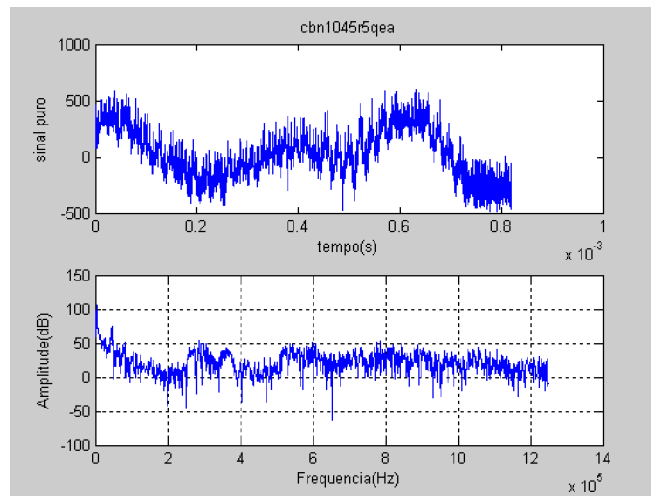


Figura 8. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo CBN e Aço ABNT 1045 com queima branda ao longo da peça.

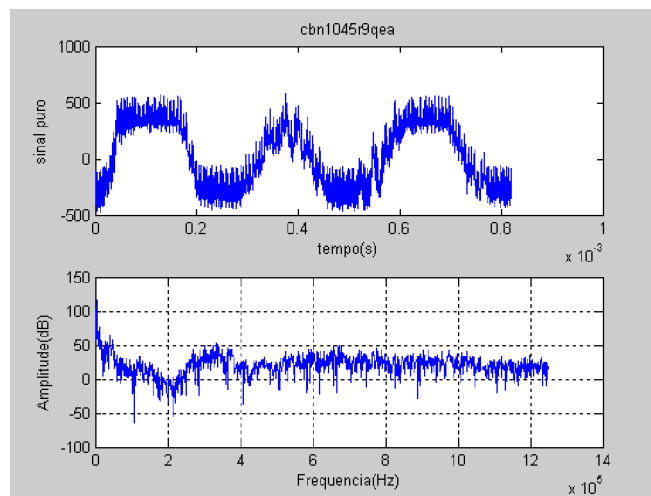


Figura 9. Sinal puro (acima) e FFT (abaixo) para o sinal de ensaios com Rebolo CBN e Aço ABNT 1045 com queima severa ao longo da peça.

De uma maneira geral, pela análise dos gráficos obtidos nas Figuras de 1 a 9 pode-se perceber que a utilização da FFT no sinal puro de emissão acústica mostrar que, na retificação dos aços estudados, o espectro dos sinais de EA apresenta amplitudes mais significativas em determinadas faixas de frequências quando da ocorrência de diferentes tipos de queima.

Apesar do espectro dos sinais na retificação com rebolo de óxido de alumínio e aço ABNT 1045 (Figuras de 1 a 3) não apresentarem muitas diferenças com relação a diferentes tipos de queima (já que há uma certa similaridade entre todos os mapeamentos de frequência com este aço), resultados mais interessantes foram encontrados para as retificações com Aço VC 131 com rebolo de óxido de alumínio e também para o Aço ABNT 1045 com rebolo CBN, já que estes tiveram espectros diferentes para cada um dos tipos de queima analisados.

Assim, pode-se inferir a partir destes estudos que a queima no processo de retificação possui frequências mais significativas em determinadas faixas.

4. Análise dos Resultados

Dos resultados advindos do processamento de sinais de EA com o aço ABNT 1045 e rebolo de óxido de alumínio, pôde-se observar que os espectros (FFT) de cada um dos arquivos analisados se apresentaram de forma um tanto semelhante, apesar de apresentarem tipos de queima diferentes. A peça que não apresentou queima, tem em seus espectros de frequência, na Figura 1, maiores amplitudes (em decibéis – dB) entre 2×10^5 Hz e próximo de 4×10^5 Hz, e também entre 4×10^5 Hz e 5×10^5 Hz. Neste mesmo espectro percebe-se um pico de aproximadamente 75 decibéis entre $3,5 \times 10^5$ Hz e 4×10^5 Hz. Características semelhantes a estas podem ser vistas nos espectros dos sinais da peça 2 e peça 4, respectivamente com queima leve e queima severa. Todos os sinais apresentaram uma diminuição de nível à partir de uma frequência em torno de 5×10^5 Hz. Em todos os casos, esta diminuição de nível se mantém entre -50 e 0 dB, com exceção de alguns picos. Desta forma, nenhum indicador de queima (frequências relevantes, com maiores ou menores amplitudes) foi visualizado.

Para o aço VC131 e rebolo de óxido de alumínio, a estatística relacionada ao espectro de frequência se demonstrou de maneira mais interessante do que com relação ao aço ABNT 1045. O gráfico da FFT do sinal relacionada à peça sem queima apresentou baixos níveis de amplitude com o sinal variando em torno da amplitude de -50 decibéis, como mostra a Figura 4. Entre 8×10^5 e 11×10^5 Hertz, houve aumento de nível dos sinais, mas que apenas ultrapassou o eixo de 0 decibéis em dois dos trechos (ver Figura 4), com apenas um apresentando aumento de nível considerável, sendo que por esse motivo foi considerado, no geral, como um sinal com níveis baixos de amplitude. Já ao analisar outras duas peças, que apresentaram queima branda e queima severa ao longo da peça, elas apresentaram certas semelhanças com relação a seus espectros, como mostram as Figuras 5 e 6. Foi possível perceber variações de amplitudes significativas em certos intervalos de frequências como mostram as figuras 26 e 27. Estes intervalos são, aproximadamente: entre $2,5 \times 10^5$ e 3×10^5 Hertz, entre 5×10^5 e 6×10^5 Hertz, entre 8×10^5 e 9×10^5 Hertz, e aproximadamente entre $10,5 \times 10^5$ e $11,5 \times 10^5$ Hertz. Nestes intervalos, é possível ver que o sinal da FFT apresenta aumento seguido da diminuição de amplitude em decibéis, sendo que os picos de amplitude ultrapassam os 50 decibéis. Isto se torna um fator bastante positivo no uso dessa estatística para o estudo da queima, sendo que este tipo de análise não pode ser invalidado como um parâmetro importante na detecção da queima.

Dos ensaios realizados com o aço ABNT 1045 e rebolo de CBN, tem-se que o espectro de frequência (FFT) se comportou de forma interessante para estes sinais. A peça sem queima tem em seu espectro (FFT), como pode ser visto na Figura 7, intervalos com aumento e diminuição de amplitude em decibéis. Estes intervalos variam aproximadamente em torno das frequências de $2,5 \times 10^5$; $5,5 \times 10^5$; 8×10^5 ; e $10,5 \times 10^5$ Hertz. Já com relação à análise dos outros gráficos de peças com queima branda e severa (Figuras 8 e 9), a FFT apresentou níveis mais baixos com relação ao espectro dos sinais da peça sem queima, sendo que não houve aumento de amplitude significativo. Os resultados destes últimos espectros se demonstraram bem semelhantes com pequenas variações de amplitude e pico de aproximadamente 50 decibéis. Assim, esta estatística se mostrou parâmetro considerável na detecção da queima branda e severa, devido à semelhanças no processamento dos dados envolvidos. Dessa forma, a análise de certas frequências pode ajudar no fornecimento de regiões de queima para peças ensaiadas.

5. Conclusões

O presente trabalho objetivou contribuir com uma metodologia e ou uma ferramenta para tornar viável a implementação do monitoramento da queima no processo de retificação

usando os sinais de emissão acústica. A seguir são apresentadas, de forma objetiva, as principais conclusões deste trabalho.

1 – Da revisão bibliográfica, conclui-se que os danos térmicos causados nas peças retificadas ainda merecem muita atenção dos pesquisadores, dado a ausência de uma metodologia eficaz e exequível para a detecção e mesmo predição de tais fenômenos. Somente recentemente, pesquisadores tem estudado a queima na retificação utilizando o sinal bruto de emissão acústica no lugar do sinal RMS. Aguiar et al. (1998) foram os pioneiros no estudo da queima através do processamento digital do sinal puro de emissão acústica. O presente trabalho visou, portanto, encontrar relações entre o sinal bruto de EA e a FFT para possíveis novas metodologias na detecção da queima, e assim, dar continuidade ao trabalho de Aguiar et al. (1998), buscando auxiliar em uma possível automação do processo de usinagem por abrasão, geralmente o último na cadeia de fabricação de um componente.

2 – Dos resultados advindos do processamento digital do sinal puro de emissão acústica para o aço ABNT 1045 retificado com rebolo de óxido de alumínio, verifica-se a estatística utilizada (FFT) não conseguiu detectar tanto a queima branda quanto a severa, ou ao menos diferenciá-las. Uma possível razão para essa conclusão é que o aço ABNT 1045 é um aço de transição dúctil/frágil, o que dificulta qualquer análise via emissão acústica. Como este trabalho se baseia na emissão acústica no momento da ocorrência da queima, não é difícil reconhecer que há uma grande dificuldade em se detectar a queima nestas condições.

3 – Para as peças de aço VC131 retificadas com Rebolo de Óxido de Alumínio, o processamento digital dos sinais revelou que a estatística utilizada (FFT) não se apresentou tão ineficaz quando comparada aos resultados com o aço ABNT 1045. Foi possível indicar certas frequências mais significativas, com aumento de amplitude e mudanças no espectro de frequência quando comparados tipos de queima diferentes. Apesar dos resultados semelhantes para queima branda e severa da peça, não se pode invalidar este tipo de análise como um parâmetro importante na detecção da queima.

4 – Dos ensaios com o aço ABNT 1045 e rebolo de CBN verificou-se, após o processamento digital dos sinais de emissão acústica, resultados interessantes. Foi possível notar semelhanças com relação a espectros (FFT) envolvendo as peças com queima branda e severa, já que ambas apresentaram amplitudes baixas (variando em torno de zero) diferenciando-se assim do espectro da peça que não apresentou queima. Aumento de amplitudes e faixas de frequências puderam ser observadas, e então esta estatística se mostrou parâmetro considerável na diferenciação e possível detecção da queima branda e severa.

5 – Apesar do sinal EA não ser efetivo na detecção de danos térmicos (Aguiar et al., 1998), a combinação deste com outros sinais, incluindo neste caso em especial a FFT de seu sinal bruto, pode apresentar resultados interessantes na detecção da queima.

6. Referencias Bibliográficas

- AGUIAR, P. R. – “Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica” – Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, Dezembro, 1997.
- AGUIAR P.R, WILLET, P., WEBSTER, J. “Acoustic Emission Applied to Detect Workpiece Burn During Grinding”, International Symposium on Acoustic Emission: Standards and Technology Update, S. Vahaviolos, Ed., Fort Lauderdale, FL, January 1998. pp. 107-124.
- AGUIAR, P. R., SERNI, P. J. A., BIANCHI, E. C., DOTTO, F.R.L., “In-process grinding monitoring by acoustic emission In: International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing”, Montreal, 2004 - artigo IEEE

- BIANCHI, E. C., E. J., DA SILVA, LOVATO, M. C., FERNANDES, O. C. & VALARELLI, I. D. D. "Características e Tendências do Processo por Abrasão". Máquinas e Metais, No. 399, Abril, 1999, pp. 238-249.
- DONG, W. P. & WEBSTER, J. A. "Assessment of Frequency Characteristics of Acoustic Emission in Grinding", Proceedings - International Manufacturing Engineering Conference, University of Connecticut, August 1996.
- KEGG, R. "*Industrial Problems in Grinding*", Annals of the CIRP, Paris, 32 (2) , pp. 559-561, 1983.
- KLUFT, W. "Monitoring the Grinding and Dressing Operations Increases Output and Quality and Reduces Costs and waste", In: 5th International Grinding, October 1993, Cincinnati, Ohio.
- LIU, J. B. Monitoring the precision machining process: Sensors, signal processing and information analysis. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, USA, 1991.
- LYONS, R. G. Understanding Digital Signal Processing. Addison-Wesley Longman, Inc., 1997. ISBN 0-201-63467-8.
- MALKIN, S. "Grinding Technology - Theory and Applications of Machining with Abrasives", Ellis Horwood Limited Publishers, Chichester, Halsted Prtess: a division of John Wiley & Sons, 1989.
- OLIVEIRA, J. F. G. et al. "Monitoramento do Processo de Retificação CNC por Emissão Acústica", In: Congresso Anual da Sobracon, 2, 1995, São Paulo.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim, Series Editor, 2^{sd}. Edition, 1999. ISBN 0-13-754920-2.
- PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. Digital Signal Processing – Principles, Algorithms, and Applications. Prentice Hall, 3rd. Edition, New Jersey, 1996. ISBN 0-13-373762-4.
- WANG, Z., WILLETT, P., AGUIAR, P. R., WEBSTER, J., "Neural Network Detection Grinding Burn from Acoustic Emission". International Journal of Machine Tools & Manufacture, volume 41, 2001, pp. 283-309.
- WEBSTER, J., MARINESCU, I. & BENNETT, R. "Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity during Grinding", Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994, pp. 299-304.
- YANG, J. F., CHEN, F. K. Recursive discrete Fourier transform with inified IIR filter structures, Signal Processing 82 (2002) 31 – 41.