

PROCESSAMENTO DIGITAL DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA A DETECÇÃO DA QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Paulo R de Aguiar

Departamento de Engenharia Elétrica – FE

Unesp – Bauru – SP – aguiarpr@bauru.unesp.br

Peter Willett

Zhen Wang

Electrical and Systems Engineering Department

U-157, University of Connecticut

Storrs, CT 06269, USA– willett@enr.uconn.edu

John Webster

Unicorn International Grinding Technology Centre

Tuffley Crescent, Gloucester, GL1 5NG, U.K.

Resumo

O emprego de sinais de emissão acústica (EA) no monitoramento de processos de fabricação vem se tornando cada vez mais frequente, e um número considerável de artigos tem sido publicado a esse respeito nos últimos cinco anos. Isto se deu em virtude do método direto baseado em técnicas de EA ser aplicável no monitoramento de diversos fenômenos ocorridos durante as operações de usinagem utilizando um único sensor. Porém, um grande desafio ainda é o de obter uma metodologia segura e exequível para as indústrias em determinar a ocorrência de danos causados nas peças. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou estudar a ocorrência da queima superficial através do processamento digital dos sinais de EA, para dois tipos de materiais (aço 52100 e Inconel 718). Os ensaios foram realizados numa retificadora plana de alta performance e velocidade, com um rebolo superabrasivo. Os sinais de EA foram coletados a partir de um único sensor de EA (PAC U80D-87) montado diretamente na mesa da retificadora próximo da peça usinada. Um sistema de alta frequência de amostragem (2.56 MHz) foi utilizado para amostrar o sinal puro de emissão acústica ao invés do valor médio quadrático ou simplesmente RMS frequentemente utilizado. Os resultados obtidos mostraram indicação da ocorrência da queima no domínio da frequência, do tempo e na correlação entre as rotações do rebolo.

Palavras Chave: Emissão Acústica, Processo de Usinagem, Retificação, Queima, monitoramento

1. INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura de precisão, especialmente a retificação, tem requerido grande habilidade de sensoriamento e experiência do operador humano para assegurar boa qualidade superficial das peças e manter as precisões à elas exigidas. A falta de operadores habilidosos nos últimos anos vem acelerando a necessidade em estabelecer sistemas de retificação autônomos que minimizem a intervenção humana (Inasaki, 1985). Muitas pesquisas tem sido conduzidas de forma a avaliar a viabilidade do uso de sistemas de sensoriamento para o controle e monitoramento nos processos de fabricação de precisão.

Os danos causados na retificação tem sido investigados por métodos de medidas, tais como força através de dinamômetros, e a potência pelo uso de células de carga e controladores eletrônicos acoplados às máquinas retificadoras, os quais são capazes de monitorar a potência

e a força no eixo árvore do rebolo. No entanto, esses sistemas ainda falham em produzir um monitoramento satisfatório e confiável dos processos e das peças fabricadas.

O uso da Emissão Acústica (EA) para o monitoramento e controle do processo de retificação é uma tecnologia relativamente recente (Benett, 1994), porém é muito mais sensível às variações das condições de usinagem do que as medidas de força e potência (Webster et. al, 1994), fornecendo uma técnica promissora para o monitoramento do processo. A relativa facilidade do processamento do sinal médio quadrático (RMS) de emissão acústica (AERms) tem encorajado abordagens que se utilizam desse parâmetro. Entretanto, embora o sinal AERms contenha muita informação de interesse, as operações inerentes de média envolvidas na determinação desse o faz de certo modo insensível à eventos impulsivos tais como a queima e trincas na peça (Bennett, 1994). O presente trabalho é diferenciado dos demais por investigar a queima superficial de peças no processo de retificação plana usando um conversor analógico digital de alta frequência de amostragem (2.56 MHz) acoplado com uma unidade robusta de armazenamento de dados, através do processamento do sinal puro de EA. São apresentados os ensaios definitivos realizados para dois tipos de materiais, aço 52100 e Inconel; as configurações e instrumentações utilizadas nos referidos ensaios; e os resultados de integridade superficial pós-retificação das peças usinadas. Em seguida, são apresentados os resultados a partir de diversas ferramentas de processamento de sinais utilizadas, dando-se ênfase para aquelas que são de amplitude independente, onde as características não são afetadas pela potência do sinal de EA. Isto se justifica devido ao fato de que a potência do sinal de EA pode sofrer variações durante o processo de usinagem que tenham relações menos expressivas com a condição da peça do que com a sua geometria. A Análise dos resultados advindos do processamento dos sinais bem como uma discussão do trabalho são apresentadas.

2. EXPERIMENTAÇÃO

Os ensaios experimentais foram realizados numa máquina retificadora plana de alta performance do fabricante Edgetek Machine Corp., onde dados do sinal puro de emissão acústica foram coletados para treze (13) experimentos diferentes, à uma frequência de amostragem de 2.56 MHz. A constante de integração utilizada no circuito amplificador do sinal de emissão acústica foi de 1 ms. Dois tipos diferentes de materiais foram utilizados, um deles sendo relativamente difícil de usinar (Inconel 718) e o outro de fácil usinabilidade (Aço 52100). A maioria dos parâmetros foi mantida constante ao longo dos ensaios. Entretanto, a profundidade de corte foi variada de graus denominados de bem suave até agressivo. Todas as peças foram submetidas à testes pós-retificação, e os sinais de queima foram assinalados. A configuração experimental para esses ensaios é mostrada conforme figura 1.

Os parâmetros de usinagem incluem:

- Velocidade periférica do Rebolo : 75.8 m/s (aprox. 7500 rpm)
- Velocidade da peça: 12.7 mm/s
- Tipo de fluido refrigerante: Master Chemical VHP 200
- Vazão do fluido: 109.78 l/min = 29 gal/min
- Tipo do Rebolo: WOLFCO, CBN 1012, 100/120-CBN, M.O.S. 6115
- Diâmetro do Rebolo: 0.1905 m = 7.5 pol
- Dimensões da Peça: 52100 \Rightarrow 78.0 x 6.0 x 9.0 mm
Inconel \Rightarrow 76.5 x 12.0 x 24.0 mm

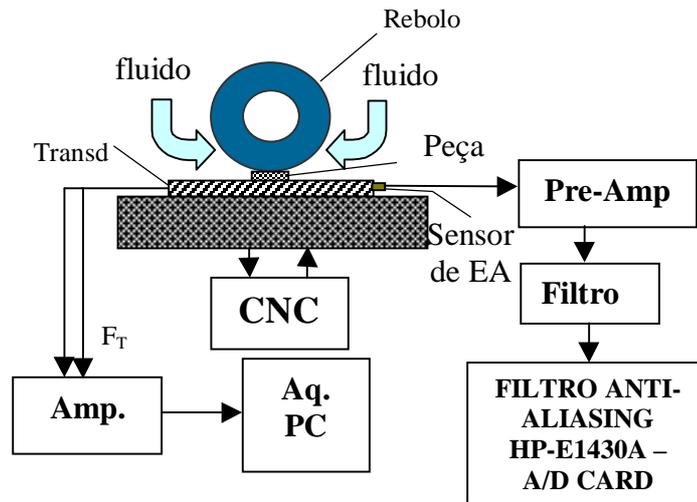


Figura 1. Configuração Experimental

Os dados foram coletados a partir do sensor de emissão acústica do Fabricante Physical Acoustics, modelo PAC U80D-87 e do transdutor de força do fabricante Piezo-Instrumentation Kistler, os quais foram montados diretamente na mesa da máquina. O sistema de aquisição de dados da HP foi configurado para trabalhar numa frequência de amostragem de 2.56×10^6 amostras por segundo, com uma precisão de 16 bits por amostra.

A tabela 1 mostra os detalhes dos ensaios realizados para o aço Inconel e a tabela 2 para o aço 52100.

Tabela 1. Ensaios para o Aço Inconel

AÇO INCONEL 718			
Ensaio no.	Profundidade de Corte (μm)	Localização da Queima (mm)	Observação
1	635.00	65.00	Queima branda
2	254.00	68.00	Queima muito branda
3	127.00	-	Sem queima visível
4	889.00	62.00	Queima
5	1143.00	50.00	Queima severa
6	1143.00	60.00	Queima severa – corte com ângulo

Tabela 2. Ensaios para o Aço 52100

AÇO 52100			
Ensaio no.	Profundidade de Corte (μm)	Localização da Queima (mm)	Observação
1	508.00	-	Sem queima Visível
2	254.00	-	Sem queima Visível
3	508.00	-	Sem queima visível
4	762.00	71.00	Queima branda
5	1016.00	68.50	Queima branda
6	1270.00	66.00	Queima branda
7	1778.00	60.00	Queima severa

Para as amostras de aço 52100, a queima da peça foi analisada visualmente e através de testes de laboratório denominados *Nital Etch* e microdureza superficial. A tabela 3 mostra o sumário desses testes. No caso das amostras de Inconel 718, a queima superficial nas mesmas pôde ser analisada apenas visualmente.

Tabela 3. Sumário dos Danos Térmicos para as amostras de aço 52100. Amolecimento Metalúrgico é denotado por TB e camada de martensita endurecida por RL.

Ensaio no.	Início	Meio	Fim	Todo
1	Leve TB e RL	Leve TB e RL	Leve TB e RL	Satisfatório
2	Leve TB	Leve TB e RL	Leve RL	Satisfatório
3	Levíssimo TB	Leve TB	LevíssimoTB+ RL	Bom
4	Levíssimo TB	Leve TB+RL	Levíssimo TB	Bom
5	Moderado TB	Pouco TB	Moderado TB	Pobre
6	Moderado TB	Moderado TB	Ruim TB	Severo
7	Ruim TB	Não testado	Péssimo TB+RL	Muito Severo

3. PROCESSAMENTO DE SINAIS

Um número de ferramentas estatísticas de processamento de sinais foram aplicadas nos dados coletados de EA. Muitas dessas, tais como momentos (Kurtosis) e preditibilidade (saída de um *Wiener Whitener* adaptativo), não correlacionaram bem com a qualidade de usinagem, e portanto não foram reportados no presente trabalho.

Para a maioria das amostras, procurou-se normalizar o sinal com relação à potência do sinal de EA, uma vez que a potência ou valor RMS do sinal de EA possui oscilações que não estão relacionadas com a queima da peça.

3.1 O Espectro de Potência do Sinal de EA

O conteúdo em frequência de qualquer sinal que está sendo investigado tem um papel importante no processamento de sinais. Para calcular o espectro de potência do sinal de EA foi utilizado a transformada rápida de Fourier (FFT), com comprimento de 1024, e a raiz quadrada de sua magnitude foi realizada conforme o procedimento de Bartlett (Proakis, 1992). As densidades espectrais de potência do sinal de EA antes do contato com o rebolo e durante uma usinagem normal são mostradas na Figura 2. Pode ser observado com nitidez que a área de usinagem, para o caso “antes do contato”, é caracterizada por amplitudes elevadas para uma faixa estreita de frequências, enquanto que para o caso da usinagem normal pode-se observar que as amplitudes, além de serem maiores do que aquelas antes do contato, variam bastante para uma faixa de frequência bem maior. Isso pode ser entendido tendo-se em mente que quando da usinagem, um maior número de variáveis são envolvidas, isto é, contato do rebolo com a peça, geração de cavacos, fluxos de calor, desgaste do rebolo, maior vibração da máquina, deformações e tensões na peça usinada entre outras. O espectro inclui evidentemente todo o sistema, inclusive o sensor de EA.

Também foi computado o espectro normalizado de potência para um tempo curto, isto é, o espectro de potência estimado para blocos de dados de 1024 pontos cada, dividido pela média da potência do sinal de emissão acústica. Utilizou-se uma função gráfica do MATLAB para a obtenção dos gráficos mostrados nas Figuras 3 e 4. As áreas mais claras nesses gráficos representam níveis maiores de potência requerida na usinagem para uma dada frequência

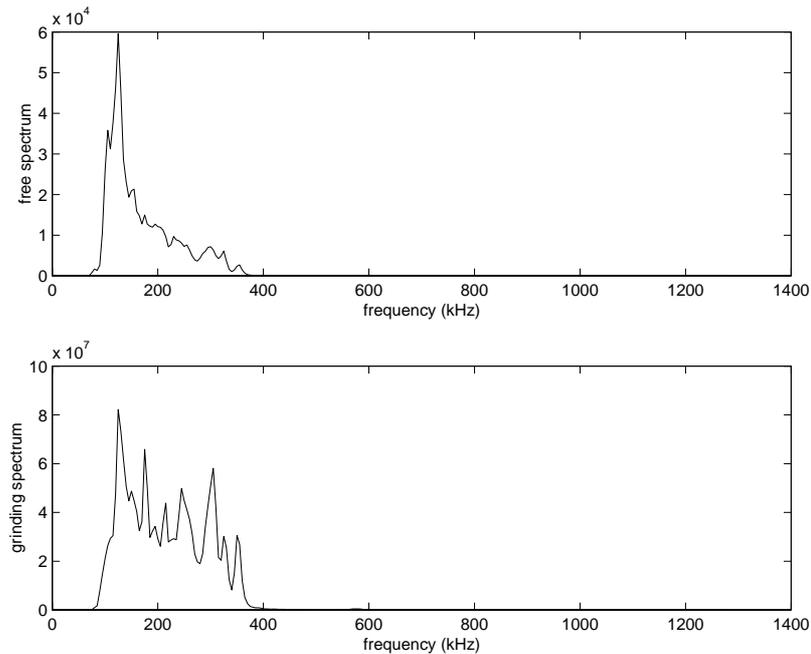


Figura 2. Acima: Um típico espectro de potência do sinal de Emissão Acústica observado antes do contato rebolo-peça. Abaixo: Um típico espectro de frequência durante uma usinagem normal.

num determinado tempo. Escalas logarítmicas foram utilizada nos gráficos para evitar problemas de ajuste dinâmico. As figuras 3 e 4 mostram esses resultados para duas das amostras ensaiadas.

3.2 Estatística de Nuttall

Uma das ferramentas muito atrativas em processamento de sinais que vem sendo empregada ultimamente é a Lei Estatística de Nuttall (Nuttall, 1994), cuja forma é dada por:

$$T(x) = \frac{\sum_k |X_k|^5}{\left[\sum_k |X_k|^2 \right]^{2.5}} \quad (1)$$

onde $X(k)$ é a k -ésima FFT, e a soma é sobre qualquer faixa de frequência especificada. O denominador da equação 1 reforça o fato de se tratar de uma função estatística independente da potência. O expoente do numerador foi escolhido de maneira que se obtivesse uma robustez para a maioria das aplicações.

Essencialmente, a estatística de Nuttall mede um momento no domínio da frequência. Na verdade, se os expoentes da equação 1 fossem 4 ao invés de 2 e 5 ao invés de 2.5, a equação acima representaria Kurtosis (Bennett, 1994). A Estatística de Nuttall foi derivada a partir de várias análises as quais mostraram que o seu nível é consideravelmente aumentado quando eventos transitórios, em geral de qualquer natureza, estão presentes nos blocos de dados que estão sendo processados. Na usinagem por abrasão, fenômenos físicos tais como *Film Boiling*, fraturas ou trincas, ou simplesmente a passagem de um grão abrasivo pela superfície da peça sendo usinada (mecanismo de desgaste normal) podem ser entendidos como eventos transitórios de energia, explicando a motivação em explorar esse tipo de estatística neste trabalho. Nas Figuras 3 e 4 são mostrados os resultados para dois ensaios.

3.3 Correlação do Período do Rebolo

Pela observação de uma auto-correlação típica do sinal de emissão acústica a qual não pode ser incluída aqui por falta de espaço, pode-se notar com clareza que a característica do sinal de emissão acústica para uma revolução do rebolo sobre a peça que está sendo usinada é muito semelhante da característica do sinal na revolução seguinte. Isto ocorre devido ao perfil de corte deixado pelo rebolo, o qual permanece praticamente constante ao longo da usinagem.

Utilizou-se o valor da correlação do pico do sinal como uma forma de estatística, e também como uma medida do período do rebolo. Para as medidas das magnitudes e das posições dos picos, foi utilizado a interpolação parabólica de três pontos. Dos resultados dessa correlação, vale salientar que o sinal de emissão acústica pode, portanto, ser utilizado como uma medida muito precisa da velocidade de rotação do rebolo.

A autocorrelação do período do rebolo foi implementada conforme técnica alternativa descrita por Proakis (Proakis, 1992).

Especificamente, calcula-se

$$\hat{r}(m) = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} |X_k|^2 e^{j2\pi km / 2N} \quad (2)$$

Para qualquer $m \in \{0, \dots, N-1\}$, onde

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn / 2N} \quad (3)$$

As Figuras 3 e 4 mostram a autocorrelação normalizada pela potência do sinal de emissão acústica para duas das amostras ensaiadas.

3.4 Correlação da Potência do Período do Rebolo

Considerando que a correlação do Período do Rebolo anteriormente descrita é muito sensível aos efeitos randomicos de sinais, tais como ruído de fase (É improvável que uma revolução do rebolo corresponda a um número de integrais dos pontos amostrados do sinal de emissão acústica) e escorregamento dos grãos abrasivos (uma pequena deformação do rebolo pode resultar numa perda considerável da correlação), resolveu-se implementar as mesmas operações acima descritas, porém o sinal puro de emissão acústica na equação (4) é substituído por

$$y_n = \left(\sum_{l=L+1}^{L-1} \left(1 - \frac{|l|}{L} \right) x_{n+l}^2 \right) - \bar{y} \quad (4)$$

Pode-se dizer previamente que essa estatística fornece uma avaliação mais precisa e robusta do perfil do rebolo do que a correlação anterior. Para a presente implementação, foi utilizado o valor de $L=10$.

Os resultados para a presente estatística são mostrados nas Figuras 3 e 4.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas dos ensaios com inconel 6 (com ângulo e queima), e do ensaio 7 com aço 52100 são mostrados nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Pode-se observar do espectro normalizado que para uma usinagem normal, isto é, sem queima, o espectro apresenta uma

desordem visual. Porém no início da queima, o espectro permanece de alguma forma consistente. Apesar de ser notório esta característica, é ainda difícil dizer que esta estatística seja útil para a detecção da queima.

Da Lei de Estatística de Nuttall, não é evidente qualquer indicação que poderia ser útil na avaliação da integridade superficial da peça. Ela revelou-se pobre mesmo em transmitir informação concernente ao ruído gerado quando a peça não está sendo usinada.

Para a correlação do período do rebolo, nota-se que a queima pode ser efetivamente caracterizada. Isto é mais evidente, como esperado, quando observamos a correlação da Potência do Período do Rebolo (Potência Filtrada). Pode-se dizer que este fenômeno é devido a um amolecimento metalúrgico durante a usinagem, isto é, o rebolo atrita e escorrega sobre a superfície da peça ao invés de usinar, e sua variação de uma revolução para outra é conseqüentemente menor. Evidências sobre esse mesmo fenômeno podem ser observadas pelos dados da velocidade do rebolo, onde é bem caracterizado o aumento da velocidade do rebolo – o tempo entre os picos da correlação é menor – quando a queima ocorre. Salienta-se neste ponto que este efeito poderia ser medido também usando outras técnicas menos sofisticadas do que um sistema de emissão acústica de alta frequência de amostragem, mas este fenômeno foi observado pela primeira vez num trabalho sobre EA.

Comparando-se os gráficos de Inconel e aço 52100 observa-se que a correlação é maior no último do que no primeiro. Isto é esperado, uma vez que o aço 52100 é relativamente macio.

Se a correlação do Período do Rebolo for empregada como um indicador da queima da peça, um aumento relativo do nível do sinal deve ser pesquisado.

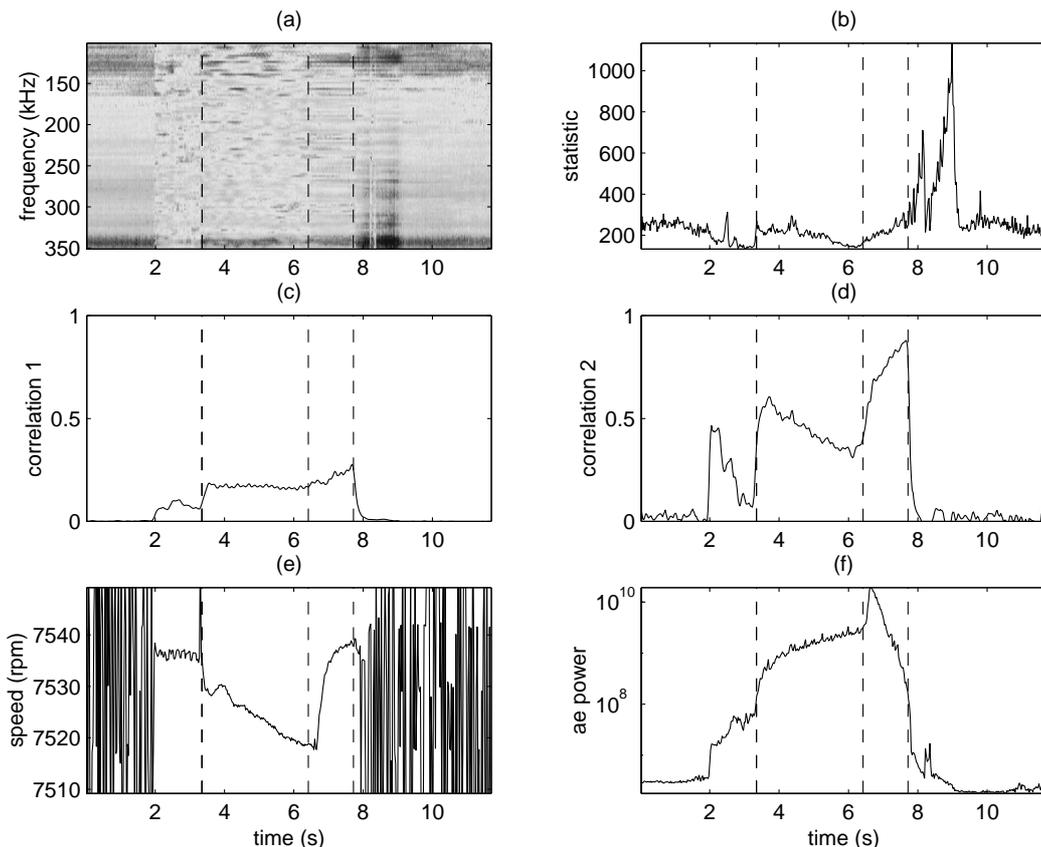


Figura 3. Dados do Ensaio 6 com Inconel. a) Espectro de Frequência Normalizado. b) Estatística de Nuttall. c) Correlação do Período do Rebolo. d) Correlação da Potência do Período do Rebolo. e) Velocidade do Rebolo medida a partir do sinal de EA. f) Potência do sinal de EA. As linhas pontilhadas representam: primeiro contato, queima, último contato. Este foi um corte em rampa, sendo que o primeiro e o último contato coincidem-se.

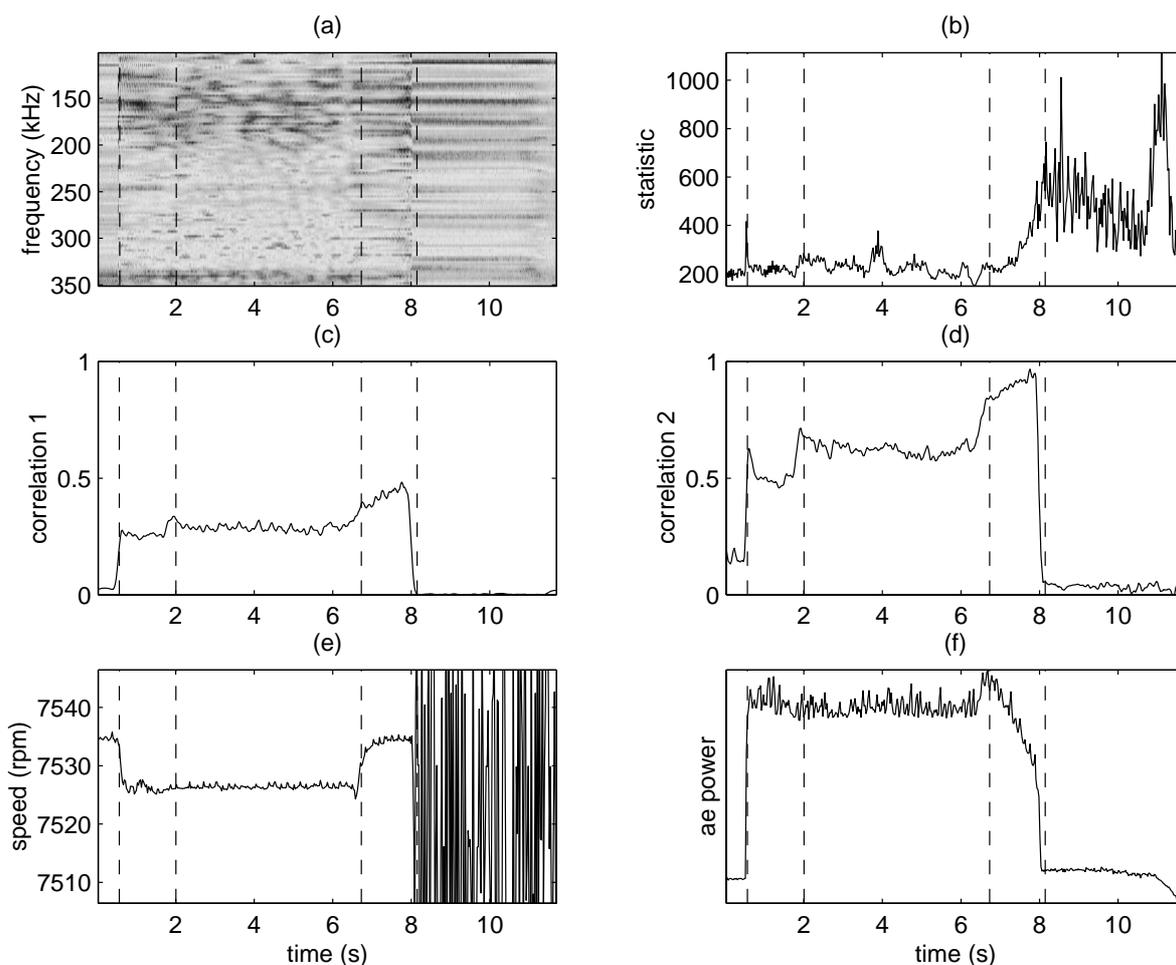


Figura 4. Dados do Ensaio 7 com aço 52100. a) Espectro de Frequência Normalizado. b) Estatística de Nuttall. c) Correlação do Período do Rebolo. d) Correlação da Potência do Período do Rebolo. e) Velocidade do Rebolo medida a partir do sinal de EA. f) Potência do sinal de EA. As linhas pontilhadas representam: primeiro contato, contato pleno, queima, ultimo contato.

Salienta-se aqui que os demais resultados não foram apresentados devido à falta de espaço.

5 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma análise dos dados de sinais de emissão acústica, amostrados em alta frequência, através do emprego de algumas ferramentas estatísticas como forma de indicar a ocorrência da queima superficial na peça retificada. Os resultados mostraram que o amolecimento metálico acompanhado de queima causam menos variação do sinal de emissão acústica entre revoluções do rebolo do que quando o metal não foi danificado. Isto foi observado pelo aumento do nível da correlação estatística, e também no grau de auto-similaridade entre espectros de curta duração temporal. Foi também observado, e de certa forma surpreendente, que a rotação do rebolo (velocidade rotacional) pode ser determinada precisamente a partir dos dados de emissão acústica.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro dado ao pesquisador Paulo R. de Aguiar, bolsa de Pós-Doutrado, proc. FAPESP No. 98/00461-6, e também ao National Science Foundation, contrato DMI-9634859.

7 – REFERÊNCIAS

- Inasaki, I. "Monitoring of Dressing and Grinding Process with Acoustic Emission Signals", Annals of the CIRP, Vol. 34/1/1985, pp. 277-280.
- Bennett, R. T. "Acoustic Emission in Grinding", Master of Science Thesis, University of Connecticut, 1994.
- 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.
- Proakis, J., C. Rader, F. Ling, E C. Nikias, 'Advanced Digital Signal Processing', MacMillan, 1992.
- Nuttall, A. "Detection Performance of Power-Law Processors for Random Signals of Unknown Location, Structure, Extent, and Strength," Naval Undersea Warfare Center Technical Report 10751, 1994.