

# ESTUDO DA DETECÇÃO DE CONTATO ENTRE REBOLO E PEÇA-OBRA ATRAVÉS DE EMISSÃO ACÚSTICA

**Paulo Roberto de Aguiar**

Unesp – Bauru, SP, Brasil – DEE-FE – E-mail: aguiarpr@bauru.unesp.br

**Zhen Wang**

**Peter Willett**

Electrical and Systems Engineering Department, U-157, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA – Email: willett@enr.uconn.edu

**John Webster**

Unicorn International Grinding Tech Centre, Tuffley Crescent, Gloucester, GL1 5NG, U.K.

## Resumo

O presente trabalho faz um estudo da aplicação do sinal de EA para a detecção de contato entre rebolo e peça de trabalho, diferenciando-se de outros por analisar o sinal puro de emissão acústica ao invés do sinal RMS e, também por explorar a detecção do contato dos primeiros grãos abrasivos com a peça em vez do contato rebolo-peça. Os sinais de EA foram medidos por um único sensor de EA (PAC U80D-87) montado diretamente na mesa da retificadora plana utilizada. Um sistema de aquisição de dados de alta frequência de amostragem (2.56 MHz) foi utilizado. Os resultados das avaliações experimentais são apresentados. Vários métodos estudados incluem Kurtosis, Skew, MVD, ROP, Cruzamento Zero e Teste de Page.

**Palavras-Chave:** Detecção de Contato, Retificação, Emissão Acústica, Monitoramento

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é o principal dentre os processos de fabricação, perfazendo 25 % do gasto total referente aos processos de usinagem (Malkin, 1989). Além disso, embora a retificação seja empregada para alguns materiais como uma escolha ou opção, para outros como as cerâmicas avançadas não se tem outra alternativa. Essa importância industrial e o fato da usinagem por retificação ser de alto custo e demandar muito tempo, a faz apropriada para estudos de otimização.

Um aspecto dessa otimização é o da eliminação do espaço de tempo entre o contato do rebolo e da peça à ser usinada. Os dois elementos devem se encontrar, porém se a velocidade de aproximação for muito alta pode haver choque (Dong et al, 1995), enquanto que para velocidades muito baixa perde-se tempo com o rebolo girando livremente. Existindo um sinal rápido de alerta ou controle no momento do contato entre rebolo e peça, então poder-se-ia diminuir a velocidade de avanço do rebolo a tempo de não ocorrer qualquer dano. O presente trabalho versa exatamente sobre esse aspecto da usinagem.

O uso do sinal de emissão acústica (EA) tem sido inicialmente usado como uma técnica para detectar pulsos de energia devido à esforços causados por deformações, desenvolvimento de trincas e mudanças de fases nos materiais sólidos (Aburatani et al, 1996), para detecção de contato (Dornfeld et al, 1984; Inasaki et al, 1985; Dong et al, 1997), e tem se mostrado um método mais conveniente e sensível do que aqueles que utilizam força e potência (Dong et al, 1995; Inasaki et al, 1985; Kakino et al, 1982). Entretanto, analisando os trabalhos de pesquisa anteriores, observa-se que a maioria deles utilizou-se o sinal RMS de emissão acústica (EARms) e o sinal bruto tem recebido pouca atenção. Devido a sua natureza de média

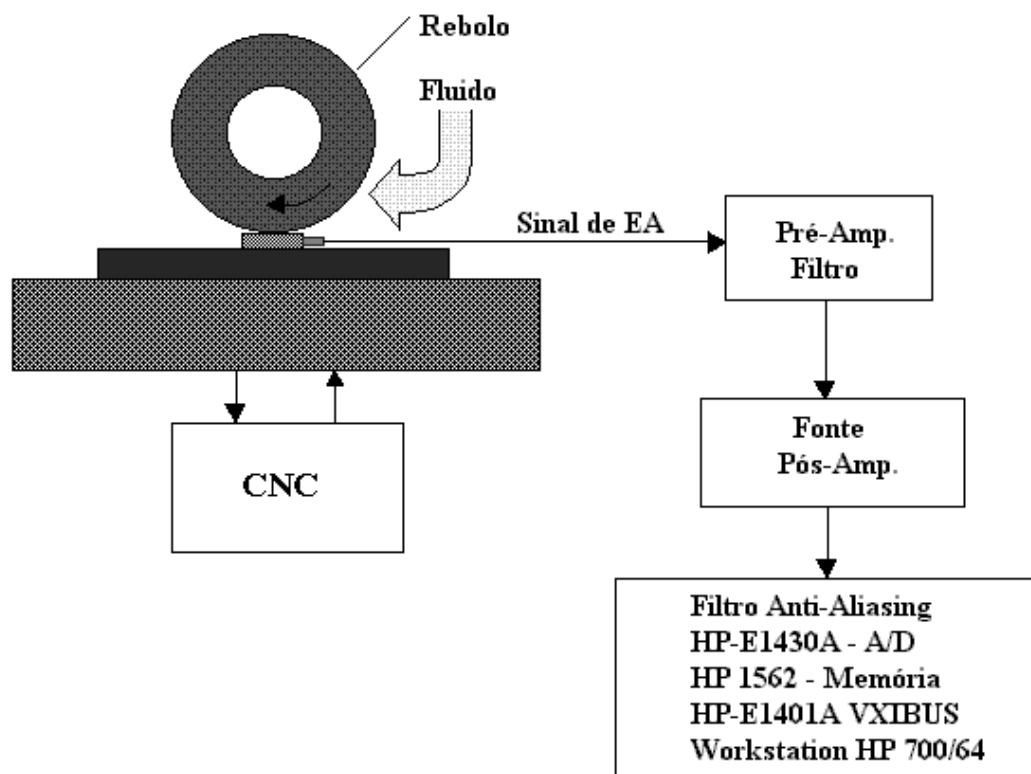
estatística, o sinal EArms não traz algumas características importantes, e talvez, o instante inicial do contato dos grãos do rebolo com a peça seja perdido.

Nas próximas seções, serão apresentados brevemente o banco de ensaio e as bases teóricas empregadas. Em seguida, é apresentado na secção 3 um número de alternativas ao sinal EArms baseadas em estatísticas para a detecção de contato, onde pode ser visto que todas as alternativas oferecem um aprimoramento considerável em termos de tempo de alerta.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados numa máquina retificadora superabrasiva do fabricante Edgetek, onde se utilizou o material Inconel 718. A figura 1 mostra a configuração utilizada para os ensaios. O sinal de EA foi monitorado por um sensor do tipo U80D-87 do fabricante Physical Acoustics Corp, cuja resposta em frequência é conhecida, e montado diretamente na peça-obra. O sistema consiste do sensor, um pré-amplificador, um pós-amplificador e um sistema de aquisição de dados, modelo HP E1430A, o qual amostrou o sinal em modo contínuo à uma frequência de 2.56 MHz. Os parâmetros de usinagem foram:

- Velocidade rotacional do rebolo: 7500 rpm
- Velocidade de avanço do rebolo: 12,7 mm/s
- Diâmetro do Rebolo: 190,5 mm
- Fluido Refrigerante: Master Chemical VHP 200
- Vazão do Fluido: 1,83 litros/s
- Rebolo: 100/120-CBN

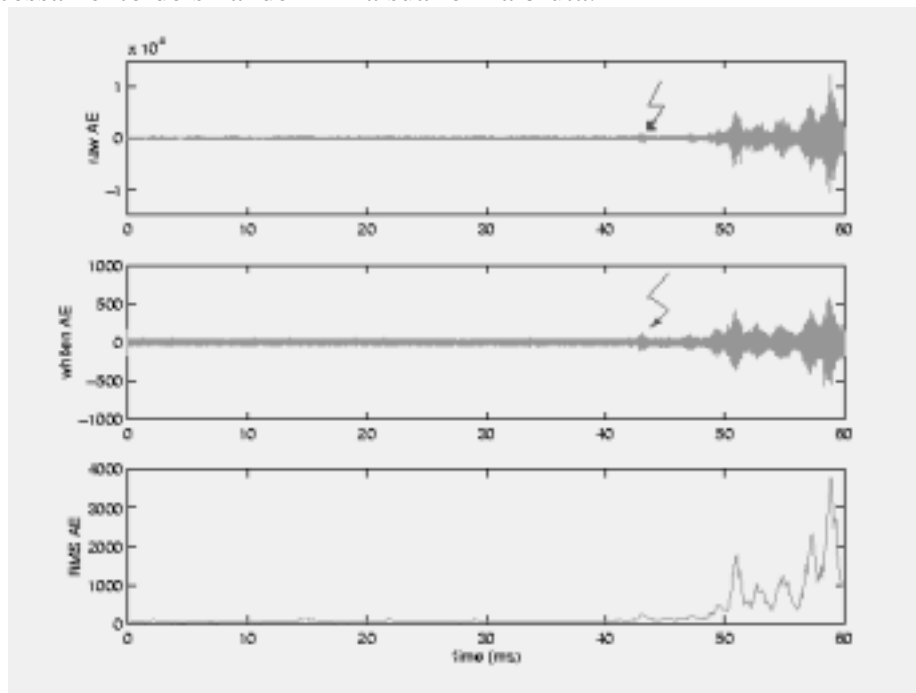


**Figura1.** Configuração utilizada para os Ensaiois

O contato entre rebolo e a peça tem dois estágios. Um deles pode ser denominado de “contato do grão”, significando que os grãos mais proeminentes no rebolo realizando contatos

intermitentes com a peça produzem uma característica do tipo *burst* no sinal de EA. O outro estágio é o “contato do rebolo” no qual o rebolo está continuamente em contato com a peça, resultando num sinal bastante variável e de maior amplitude de EA. Portanto, é muito mais útil detectar-se o “contato do grão”, o qual está milissegundos à frente do contato pleno do rebolo com a peça e o possível e concomitante choque.

A figura 2 mostra um exemplo do sinal de emissão acústica em torno da região de contato para um dos ensaios realizados. Pode-se observar claramente que existe uma pequena espessura da energia acústica antes do engajamento pleno do rebolo na peça, possivelmente causado pelo contato do grão abrasivo do rebolo. Este fenômeno é um objetivo que o trabalho pretende alcançar. Também pode ser notado na mesma figura que o processamento do sinal pela técnica denominada *Whitening*, a qual é a deconvolução da resposta em frequência do sistema, traz um melhoramento dessa característica. Por outro lado, essa característica não é obviamente observada no sinal EArms. Entretanto, a observação que se faz, em geral, é sobre a amplitude do sinal, e naturalmente a magnitude do sinal EArms. Na verdade, a espessura observada na Figura 2 não pode ser considerada neste ponto como representativa do primeiro contato do rebolo e peça. O objetivo, portanto, é extrair características pelas quais esse contato dos grãos presumido seja de fato evidenciado mais fortemente, sendo necessário para isso, o processamento do sinal de EA na sua forma bruta.



**Figura 2.** Dados de EA em torno da região de contato para um dado ensaio. Acima: Sinal bruto de EA. Meio: Sinal de EA após *Whitening*. Abaixo: Sinal EArms com um filtro de 5 kHz. As setas indicam o contato inicial dos grãos abrasivos.

### 3. PROCESSAMENTO DE SINAIS

O critério utilizado por Webster (Webster et al, 1996) para a detecção de contato estabelece que o sinal EArms esteja acima de um limite de potência para um dado limite de tempo, de forma a evitar alarmes falsos e geralmente detectados quando do contato pleno do rebolo com a peça-obra. Nos próximos itens, sugere-se ferramentas de processamento de sinais as quais trazem algum aprimoramento. Algumas técnicas, tais como a “Estatística da Lei da Potência no Domínio da Frequência” de Nuttall, (Nuttall, 1997) não apresentaram bons resultados, e portanto, não foram aqui apresentadas.

### 3.1 Kurtosis e Skew

As estatísticas de Kurtosis e Skew, as quais são respectivamente as medidas do quarto e terceiro momento normalizado, tem despertado grande interesse entre pesquisadores (Otman, 1998). Em termos estatísticos, tem-se

$$K = \frac{\varepsilon\{X^4\}}{\varepsilon\{X^2\}^2} \quad ; \quad S = \frac{\varepsilon\{X^3\}}{\varepsilon\{X^2\}^{3/2}} \quad (01)$$

onde  $\varepsilon$  é a média estatística, e naturalmente ela pode ser obtida pela média empírica dos dados de EA. No caso da ausência do sinal bruto de EA, é ainda possível estimar Kurtosis e Skew diretamente do sinal EA<sub>rms</sub> (Otman, 1998), através das equações:

$$K(r,s) = \frac{6((r-s)^2(r+s+1) - rs(r+s+2))}{rs(r+s+2)(r+s+3)} \quad ; \quad S(r,s) = \frac{2(s-r)(r+s+1)^{1/2}}{(r+s+2)(rs)^{1/2}} \quad (02)$$

onde  $r$  e  $s$  são:

$$r = \frac{A\hat{E}rms}{\sigma^2} (A\hat{E}rms - A\hat{E}^2rms - \sigma^2) \quad ; \quad s = \frac{1 - A\hat{E}rms}{\sigma^2} (A\hat{E}rms - A\hat{E}^2rms - \sigma^2) \quad (03)$$

onde A<sub>E</sub>rms são os dados empíricos RMS do sinal de EA e  $\sigma^2$  é a variância empírica do sinal EA<sub>rms</sub>. Utilizou-se blocos de 256 amostras para o processamento dos sinais, isto é, de duração de 0.1 ms.

### 3.2 Cruzamento Zero

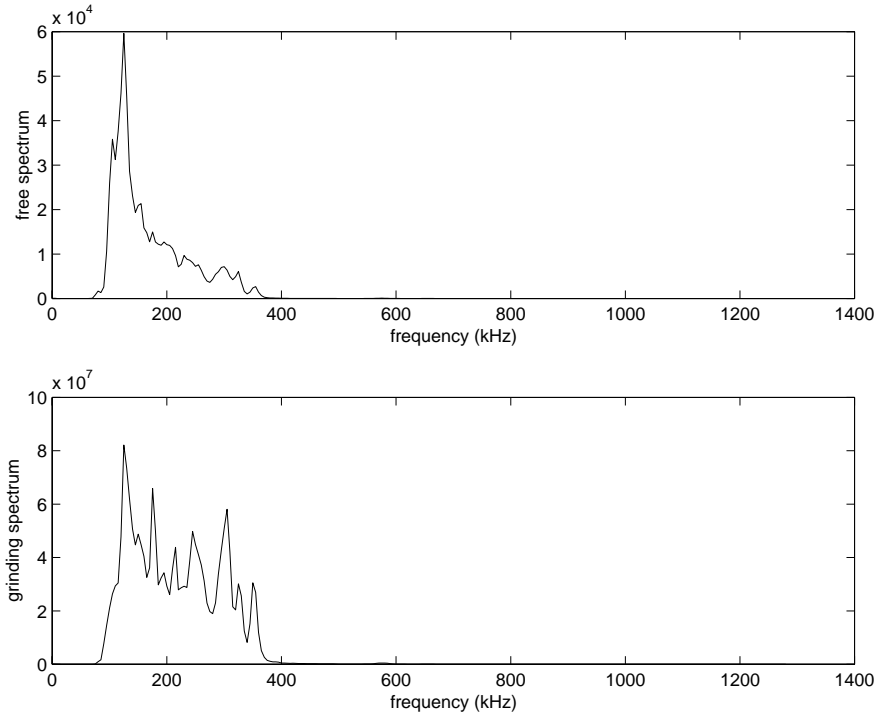
Para um sinal monocromático, o tempo entre os cruzamentos zero é o recíproco da frequência. Para formas de ondas mais complexas a interpretação é menos óbvia, porém é razoável esperar que uma variação entre o estado de ruído e o estado em regime (antes do contato) pode ter um efeito na taxa de cruzamento zero (Ying, 1987). Como o próprio nome sugere, conta-se o número de eventos que cruzam o nível zero do sinal bruto de emissão acústica  $x(n)$  durante cada bloco de tempo  $T$ . Escolheu-se aqui  $T = 0.1$  ms, o que corresponde blocos de 256 amostras por contagem.

### 3.3 Relação de Potência (ROP)

O conteúdo espectral do sinal de EA é destacadamente diferente antes e após o contato, como pode ser visto na Figura 3. A estatística ROP é útil nesse aspecto, isto é, mede a quantidade relativa de potência para um dada largura de banda espectral em relação a potência total. A expressão para essa estatística é dada por

$$ROP = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_2} |X_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \quad (04)$$

onde  $N$  é o número de pontos escolhidos para o cálculo da FFT,  $X_k$  é a  $k^{\text{th}}$  FFT, e a somatória é sobre um intervalo de frequência especificado e representado por  $n_1$  e  $n_2$ . No presente trabalho, utilizou-se a faixa de frequência de 300 a 400 kHz.



**Figura 3.** Exemplo de conteúdo espectral do sinal de EA antes (acima) e após o contato (abaixo).

### 3.4 Dispersão Do Valor Médio (MVD)

A forma usual dessa estatística é dada pela expressão:

$$MVD(X) = \sum_{k=0}^{N-1} \log \left( \frac{\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} X_l}{X_k} \right) \quad (05)$$

onde  $X(k)$  denota a  $k^{\text{th}}$  FFT de um bloco de  $N \times n$ , o sinal bruto de EA. O teste MVD é baseado no conceito estatístico de *overdispersion* (Chen et al, 1998), mas pode ser entendido como sendo um teste de homogeneidade dentre as amostras de FFT de magnitudes quadráticas, uma identidade aparentemente violada pelo contato dos grãos abrasivos. A estatística MVD não requer normalização pela potência do ruído, mas é baseada na hipótese que o espectro do sinal antes do contato é branco. Como não se tem aqui um espectro dessa natureza, utilizou-se portanto uma versão de banda limitada da estatística MVD. Assim, a forma adaptada é representada por

$$MVD(X) = \sum_{k=n_1}^{n_2} \log \left( \frac{\frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{l=n_1}^{n_2} X_l}{X_k} \right) \quad (06)$$

A banda de frequência é determinada por  $n_1$  e  $n_2$ . Utilizou-se duas bandas de frequência, de 600-650 kHz e 1200-1280 kHz.

### 3.5 Teste de Page

Até certo ponto, o contato do rebolo com a peça dispara uma chave de um modo estatístico (principalmente o som do fluido refrigerante) para outro (a retificação propriamente dita). Assume-se que nesse intervalo existe um seguimento independente de observação  $x_n$  e um chaveamento no tempo desconhecido  $n_0$  para o qual

$$x_n \text{ possui densidade } \begin{cases} f_0(x_n), & \text{se } n \leq n_0 \\ f_1(x_n), & \text{se } n \geq n_0 \end{cases} \quad (07)$$

O teste de Page (Page, 1954) é geralmente aceito como uma técnica rápida para problemas de detecção. Toda vez que a estatística CUSUM

$$Z_n = \max(0, Z_{n-1} + g(x_n)), \text{ com } Z_0 = 0 \quad (08)$$

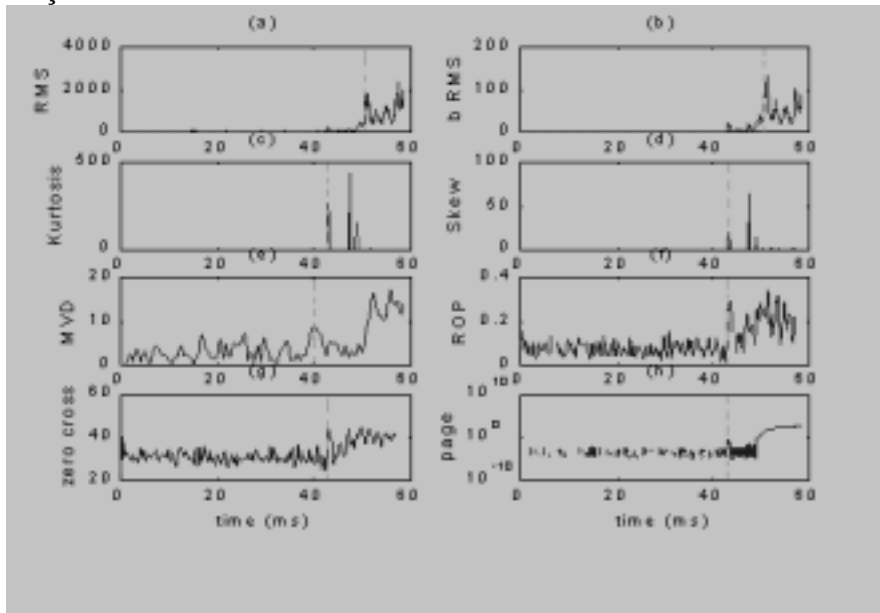
passa pelo *threshold*  $h$ , a detecção é declarada. Para o presente trabalho, escolheu-se

$$g(x_n) = x_n^2 - 0.5 \max_{\text{no contact}} \{x_n^2\} \quad (09)$$

no qual o último termo refere-se à um segmento de dados antes do contato e que seguramente o mesmo não ocorreu.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4 mostra os resultados obtidos para um exemplo, ensaio 2 utilizando Inconel, empregando as estatísticas apresentadas anteriormente. Observa-se que a linha hachurada assinala a detecção do contato.



**Figura 4.** Resultados do ensaio 2 com Inconel. (a) AE RMS. (b) AE RMS (300<f<400 kHz). (c) Kurtosis. (d) Skew. (e) MVD com banda limitada. (f) ROP (300<f<400 kHz). (g) Cruzamento Zero. (h) Teste de Page. As linhas hachuradas verticais indicam o tempo da detecção do contato.

As estatísticas implementadas são comparadas com o método tradicional RMS o qual foi implementado em banda larga e banda limitada de frequência. Notar que ambos os sinais RMS trazem a mesma informação, e portanto, utilizou-se aqui apenas o sinal em banda larga. No método de Cruzamento Zero, um filtro foi usado como ultimo estágio na implementação. Observa-se na Figura 4 (c) e (d) nas estatísticas de Kurtosis e Skew que o primeiro pico está relacionado com o contato do grão e o segundo com o contato do rebolo propriamente dito. Para as outras estatísticas, o contato do grão também apresenta-se impulsivo, enquanto que o contato do rebolo é caracterizado por um crescimento sustentado do sinal. Para cada uma das estatísticas empregadas, um *threshold* mínimo foi escolhido convenientemente de forma a evitar falsos alarmes. Este valor foi referido como o valor médio da estatística antes do contato. O tempo de contato ( $t$ ) é comparado com aquele do método RMS para se avaliar a eficiência da estatística empregada. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Detecção do Contato usando os diferentes Métodos

Método	Threshold $h$	$t$ (ms)	$t_{RMS} - t$ (ms)
RMS	$10E(v_b)=850$	50.6	-
Kurtosis	$100E(v_b)=35$	42.9	7.7
Skew	$100E(v_b)=37$	42.9	7.7
MVD	$1.3E(v_b)=15$	42.8	7.8
ROP	$5E(v_b)=0.45$	43.0	7.6
Cruz. Zero	$1.4E(v_b)=42$	43.0	7.6
Page	0.01-0.1	42.9	7.7

As estatísticas discutidas foram aplicadas para seis ensaios com Inconel como mostra a Tabela 2, onde  $t_{RMS}-t$  é o atraso de contato  $T$ ,  $E(T)$  traduz o atraso médio empírico e  $\sigma^2$  corresponde a variância. Observa-se que a diferença do valor do “threshold” para os diferentes testes está dentro dos 10 % para os métodos MVD, ROP, Cruzamento Zero e Page.

**Tabela 2.** Detecção do Contato para 6 diferentes ensaios

Método	$E(T)$ (ms)	$\sigma^2$	Min( $T$ )	Max( $T$ )
Kurtosis	3.3	5.7	1.2	7.7
Skew	3.3	5.7	1.2	7.7
MVD	5.8	12.0	1.6	10.0
ROP	4.4	7.8	1.3	7.6
Cruz. Zero	3.6	5.1	1.3	7.6
Page	4.4	8.1	1.2	7.7

Observa-se que o método RMS apresentou o maior tempo de detecção do contato, o que significa que é o menos sensível, e que as outras estatísticas contribuem de forma mais rápida e segura para a detecção de contato no processo de retificação.

## 5. CONCLUSÃO

O objetivo do presente trabalho foi investigar a detecção de contato entre rebolo e peça-obra através do processamento do sinal bruto de emissão acústica. A técnica tradicional é observar o crescimento da potência acústica, isto é, o cruzamento do sinal  $EA_{RMS}$  por um *threshold*. Pela sua natureza, o sinal  $EA_{RMS}$  é sensível às variações em larga escala, isto é, o contato pleno entre o rebolo e a peça-obra. Devido à sua inerente característica em calcular a média, esse sinal é insensível à eventos menores, tal como a passagem dos primeiros grãos abrasivos do rebolo pela peça.

Foram exploradas várias estatísticas usando-se o sinal bruto de EA amostrado em alta frequência para avaliar a detecção de contato. Em todos os ensaios testados, as estatísticas se revelaram oferecer uma melhora no tempo de detecção de contato em comparação à tradicional abordagem do sinal  $EA_{RMS}$ .

## 6. AGRADECIMENTOS

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

## 7. REFERÊNCIAS

- Malkim, S., 1989, "Grinding Technology, Theory and Application of Machining with Abrasives", Ellis Horwood Limited, Chichester, England.
- Dong, J., Webster, J. & Willett, P., 1995, "Application of AE to Wheel/Work and Wheel/Truer Contact Detection in High-Speed Cylindrical Operations", Report 3, CGRD, University of Connecticut, USA.
- Aburatani, H. & Uchino, K., 1996, "Acoustic Emission Measurement Technique in Piezoelectric Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, pp. 516-518.
- Dornfeld, D. A. & Cai, H. G., 1984, "An Investigation of Grinding and Wheel Loading using Acoustic Emission", Trans. Of the ASME, Journal of Engineering For Industry, Vol. 106, 1984, pp. 28-33.
- Inasaki, I. & Okamura, K., 1985, "Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals", Annals of the CIRP, Vol 34, pp. 277-280.
- Dong, J., Webster, J. & Willett, P., 1997, "Laboratory and Industrial Testing of a Micro-Processor-Based Acoustic Emission System for Gap Elimination and Dressing Verification", CGRD, University of Connecticut, USA.
- Kakino, Y., Eda, H. & Kishi, K., 1982, "Detection of Starting Time of Grinding by Making use of Acoustic Emission", Journal of the Japan Society of Mechanical Engineering, Vol. 48, No. 3, pp. 50-54.
- Webster, J., Dong, J. & Lindsay, R., 1996, "Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process", Annals of the CIRP, Vol. 45/1.
- Jemielniak, K. & Otman, O., 1998, "Tool Failure Detection Based on Analysis of Acoustic Emission Signals" Jr. of Materials Proc. Technology, Vol. 76, pp. 192-197.
- Nuttall, A., 1997, "Performance of Power-Law Processor with Normalization for Random Signals of Unknown Structure", NUWC-NPT Technical Report 10,760.
- Chen, B., Willett, P. & Streit, R., 1998, "A Test of Overdispersion in a Data Set with Application to Transient Detection" Proceedings of the CISS, Princeton, NJ.
- Page, E. S., 1954, "Continuous Inspection Schemes" Biometrika, Vol. 41, pp. 100-114.