

EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE EROÇÃO – ESTUDO DO EFEITO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL¹

Gustavo Borges Tiboni²

Glauco Domingues de Mello²

Nestor Carlos de Moura³

Victor Augusto Raboni Santa Maria⁴

Thiago Augusto Sielski Marquardt⁴

Carlos Henrique da Silva⁵

Resumo

A importância do estudo do desgaste por erosão está relacionada aos danos que este fenômeno pode causar em diversas instalações e componentes mecânicos como, por exemplo, em caldeiras e pás de turbinas de usinas termo e hidroelétricas. Neste trabalho, a técnica de emissão acústica (EA) foi aplicada com o intuito de correlacionar os sinais acústicos com o processo erosivo. No entanto, de forma preliminar, com o objetivo de se conhecer apenas a parcela atribuída ao fluido (e não às partículas impactantes) sobre os sinais de emissão acústica, foram realizados ensaios de erosão com fluido gasoso, porém sem a presença de partículas erosivas, variando o ângulo de impacto do jato de ar, o acabamento superficial das amostras e a vazão do fluido. Constatou-se que os parâmetros acústicos amplitude e RMS são capazes de se correlacionar, principalmente, com as variações do ângulo e da vazão. O acabamento superficial teve uma influência mais discreta sobre os sinais. Assim, os resultados obtidos através da técnica de EA demonstram a sua eficiência para o estudo da erosão, embora “parcial”, já que a influência das partículas erosivas sobre os sinais acústicos será avaliada apenas em trabalhos subseqüentes.

Palavras-chave: Emissão acústica; Rugosidade; Erosão; Desgaste.

ACOUSTIC EMISSION IN EROSION TESTS – THE EFFECT OF SURFACE FINISHING

Abstract

The importance of the erosion wear study is related to the damages that this phenomenon causes at many mechanical installations and components, such as boilers and turbine blades of thermal and hydroelectric power plants. In this paper, the acoustic emission (AE) technique was applied with the intention of correlating the acoustic signals with the erosion process. However, preliminarily, erosion tests were carried out with gaseous fluid, but without erosion particles, for the purpose of knowing just the part of the acoustic signals attributed to the fluid (not to the impact particles). The air jet impact angle, the specimen surface finishing and the fluid flow were varied. It was realized that the acoustic parameters amplitude and RMS are capable of correlating with the angle and flow variations. The surface finishing had a discrete influence on the signals. Thus, the results obtained by the AE technique demonstrate its efficiency for the erosion wear study, although it is “partial”, since the erosive particles influence on the acoustic signals will be evaluated just at subsequent works.

Key words: Acoustic emission; Roughness; Erosion; Wear.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Mestrando, PPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR / LacTec.*

³ *Engenheiro Mecânico, Especialista em EA Nível 3, Moura & Fiorito / LacTec.*

⁴ *Graduando, Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.*

⁵ *Doutor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.*

1 INTRODUÇÃO

O desgaste por erosão representa a área da Tribologia que estuda o processo de remoção de material que ocorre quando partículas colidem contra uma superfície. Geralmente, este tipo de desgaste pode ser subdividido em: erosão por partícula sólida e erosão hidro-abrasiva, nas quais o fluxo que carrega as partículas impactantes é formado por fluido gasoso e líquido, respectivamente. A importância deste fenômeno está relacionada aos danos que a erosão pode causar em diversas instalações e componentes mecânicos como, por exemplo, em caldeiras e pás de turbinas de usinas termo e hidroelétricas.

A emissão acústica (EA) é uma técnica de ensaio não-destrutivo (END) que pode ser realizada em materiais sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas e dimensionais, com o objetivo de detectar, avaliar e interpretar descontinuidades presentes no corpo de prova ou em algum equipamento sob análise. Esta técnica tem como princípio que o crescimento destas descontinuidades, provocado por um campo de tensão, irá emitir uma onda acústica, ou seja, uma onda de natureza mecânica.⁽¹⁾ Em outros casos, os sinais acústicos podem ser gerados através do desprendimento de camadas de óxidos que ocorrem no fundo de tanques de armazenamento,⁽²⁾ através de vazamentos em alguma instalação mecânica ou, ainda, através de ruídos ocasionados por um fluido turbulento nas imediações do corpo de prova,⁽³⁾ como é o caso dos fenômenos de perda de carga e de recirculação de ar em vórtices. Estas ondas são captadas por sensores, processadas e, então, suas características são interpretadas.

A inspeção por emissão acústica é global, ou seja, é realizada de forma simultânea em todo o corpo de prova (ao contrário da inspeção por ultra-som, que é caracterizada como sendo de varredura), e pode ser aplicada em uma ampla variedade de estruturas, tais quais: craqueadores catalíticos, esferas e tanques de armazenamento, sistemas de tubulações, vasos de pressão, entre outras. Esta técnica também é aplicável em uma extensa faixa de materiais e espessuras, à temperatura ambiente ou elevada.

A emissão acústica pode ser utilizada como uma eficiente ferramenta on-line quando se trata, principalmente, de monitorar aspectos tribológicos como, por exemplo, a taxa de desgaste dos materiais,⁽⁴⁾ assim como detectar a propagação de falhas nos mesmos.⁽⁵⁾

No desgaste por erosão, especificamente, a literatura mostra que os parâmetros de emissão acústica RMS e Energia Acústica são capazes de se correlacionarem com o tipo de mecanismo de remoção de material. Ou seja, quando este mecanismo muda de uma fratura intergranular para uma transgranular, por exemplo, percebe-se também mudanças nas características dos sinais de EA,⁽⁶⁾ ou, ainda, quando muda de um processo de riscamento para trincamento.⁽⁷⁾ Além disso, estes parâmetros de energia de emissão acústica demonstram ter uma boa correlação com a quantidade de material removido. No entanto, quando se estuda o fenômeno do desgaste por erosão ocasionado por apenas uma partícula erosiva incidente por vez, modo este conhecido como impacto-único (*single-impact mode*), a literatura mostra que são os parâmetros da forma da onda (amplitude, frequência, rise time etc.) que quantitativam de forma eficiente a remoção de material ocasionada pela partícula impactante.⁽⁸⁾

De forma preliminar, com o intuito de se conhecer apenas a parcela atribuída ao fluido (e não às partículas impactantes) sobre os sinais de emissão acústica, neste trabalho foram realizados ensaios de erosão com fluido gasoso, porém sem a

presença de partículas erosivas, variando o ângulo de impacto do jato de ar, o acabamento superficial das amostras e a vazão do fluido, constatando-se diferenças nos resultados através da técnica de EA. A influência das partículas erosivas sobre os sinais acústicos será avaliada em trabalhos subseqüentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das Amostras

Para a realização dos ensaios foram usinadas seis amostras de aço baixo carbono, em forma de placas com dimensões de 120 x 100 x 55 mm. A área nominal de 12.000 mm², onde será insuflado ar comprimido, é suficiente para a fixação do sensor de EA diretamente na parte posterior da amostra, eliminando a necessidade da utilização de guia de onda para a aquisição dos sinais. Para este estudo, foram realizados três tipos de acabamento superficial das amostras: lixamento, jateamento e retificação. As condições de preparação das superfícies destas amostras foram:

- *lixamento*: processo manual, semelhante a uma preparação metalográfica. Com lixamento (vai-e-vem) em uma única direção, utilizando papel abrasivo (lixa) com granulometria 600 e abrasivos de óxido de alumínio;
- *jateamento*: foi utilizado um equipamento manual (Blastibras – modelo BUE 7870) com pressão de linha em 8 kgf/cm². O erodente utilizado foi granada de aço com granulometria variável (10 µm a 500 µm); e
- *retificação*: processo realizado em uma retífica plana, com disco abrasivo (ICDER – AA60 KG V2).

Após a preparação superficial, as amostras foram cobertas com vaselina líquida para evitar a formação de camada de óxido superficial.

A caracterização morfológica dos corpos-de-prova foi realizada através de microscopia eletrônica em um microscópio eletrônico de varredura Philips modelo XL30, utilizando sensores de elétrons secundários (SE). Além disto, também foram realizadas medições de rugosidade em todas as amostras, com três medições em duas direções ortogonais (retificada e lixada). Como o acabamento da superfície jateada é isotrópico, foram realizadas quatro medições com sentidos aleatórios. Utilizou-se um rugosímetro eletrônico modelo Surtronic 25 fabricado pela Taylor Hobson. O apalpador utilizado foi um cone de diamante com diâmetro de ponta de aproximadamente 5 µm. As condições de medição foram: $l_m = 4$ mm, $\lambda_c = 0,8$ mm e filtros (Polinomial de 2 grau e Gaussiano).

A Figura 1 apresenta as características das superfícies ensaiadas, mostrando o aspecto visual (MEV) e os parâmetros de rugosidade. Os perfis de rugosidade apresentados (lixado e retificado) foram obtidos das medições realizadas na direção transversal aos sulcos.

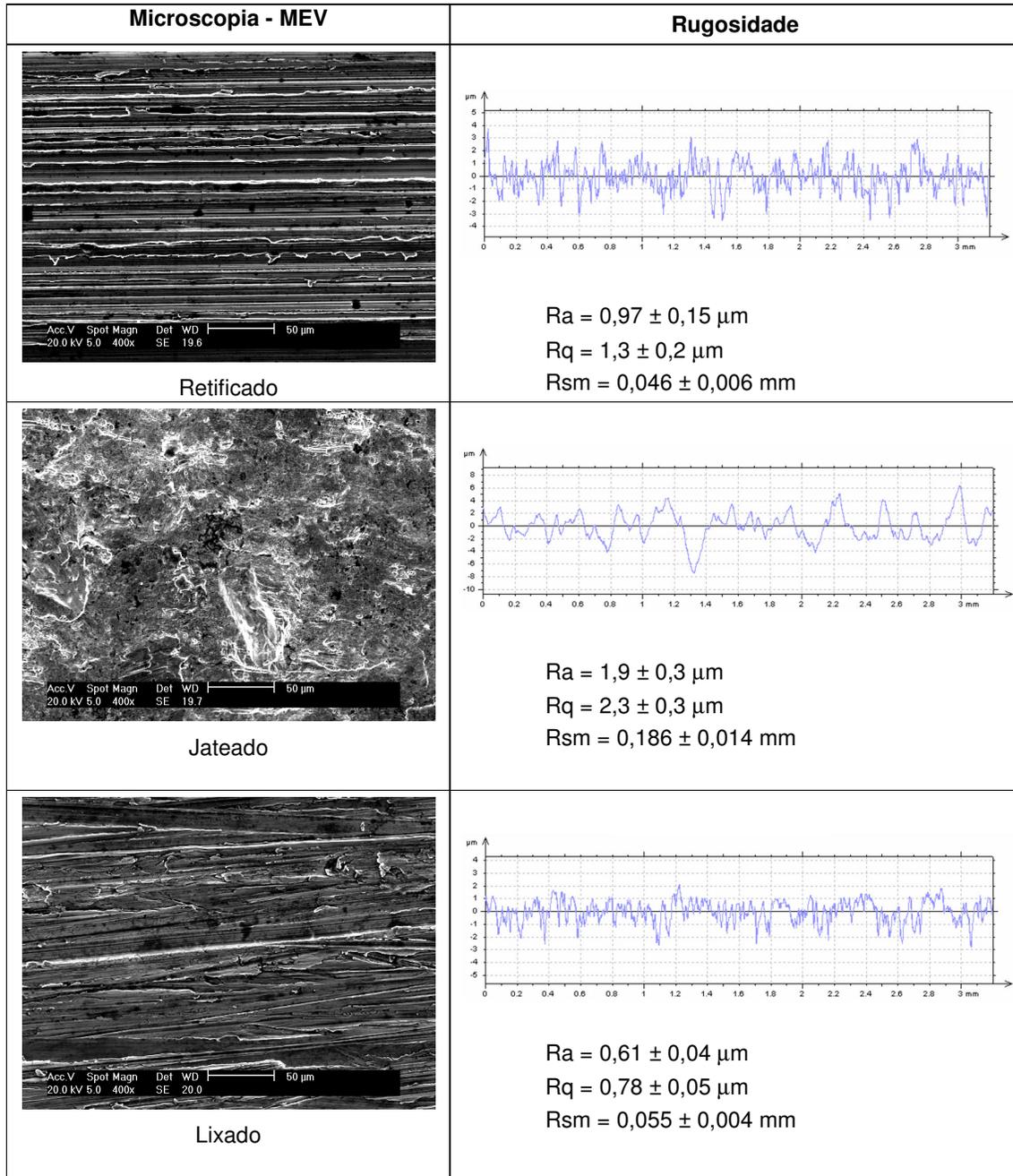


Figura 1. Características das superfícies ensaiadas.

2.2 Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados em um aparato conforme esquematizado na Figura 2. Este aparato foi projetado para direcionar um fluxo de ar contra a superfície de um corpo de prova de uma maneira simples, porém com o controle de todas as variáveis do processo.

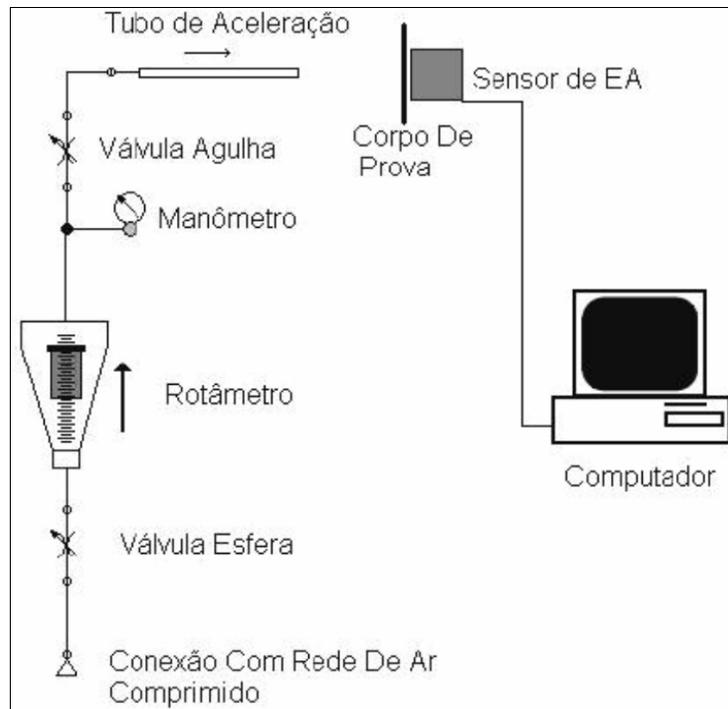


Figura 2. Esquema do aparato utilizado para os ensaios.

O equipamento é composto basicamente por três sistemas:

- sistema de controle de fluxo, composto por duas válvulas, sendo uma de esfera e uma agulha, um rotâmetro com flutuador cônico tipo livre e um manômetro;
- sistema de direcionamento do fluxo de ar, composto por um tubo de aço inoxidável AISI 316L com comprimento de 1600 mm e diâmetro interno de 10,8 mm; e
- sistema de fixação das amostras, composto por um torno de mesa (morsa).

Na interface entre a amostra e as garras do torno de mesa, foram colocadas quatro placas de borracha, as quais têm a finalidade de atenuar um possível ruído operacional vindo da bancada de ensaio, fazendo com que somente os sinais gerados pelo choque entre a corrente de ar comprimido e a superfície da amostra sejam captados pelo sensor de EA. O controle da distância e do ângulo entre a amostra e a corrente de ar foi obtido através da utilização de gabaritos confeccionados em Eucatex. Foram utilizados três ângulos de incidência.

O ar comprimido utilizado nos ensaios é filtrado e seco, oscilando a pressão em torno de 5,0 bar (~0,5 MPa). Os ensaios foram realizados com duas condições de vazão de ar diferentes, reguladas pela válvula e controladas pelo rotâmetro. O acompanhamento da pressão da linha de ar fez-se através do manômetro.

Os ensaios procederam posicionando-se a amostra com o ângulo desejado e o transdutor de EA foi acoplado na superfície oposta à superfície de incidência do fluxo de ar. O ângulo de incidência do jato de ar e a vazão do fluido variaram conforme mostrado na Tabela 1. Para as amostras retificadas e lixadas, o jato de ar atingiu as superfícies perpendicularmente à direção dos sulcos. A distância entre o bocal de saída jato e o corpo de prova foi mantida a mesma. A aquisição dos sinais de EA iniciou-se somente depois de estabilizado o fluxo de ar na vazão desejada.

Tabela 1. Valores dos parâmetros de erosão utilizados nos ensaios

Parâmetros de Erosão	Unidades	Valores
Ângulo de Incidência	Graus	30, 60 e 90
Vazão do Fluido	m ³ /h	10 e 20
Distância	mm	30

2.3 Sistema de Emissão Acústica

O sistema de aquisição e processamento de sinais de EA é composto por uma placa modelo DISP, de fabricação da *Physical Acoustics Corporation* (PAC), com quatro canais. O transdutor utilizado foi o PAC R-15I, com pré-amplificador integrado e frequência ressonante de aproximadamente 150 kHz, ligado à placa através de cabo coaxial de 50 ohms. A placa de EA foi instalada em um microcomputador, o qual através do software AEWIn (PAC), parametriza, processa e armazena os dados adquiridos.

O monitoramento por EA foi realizado acoplando-se o transdutor piezoelétrico diretamente na amostra, utilizando um acoplador magnético para a fixação e vaselina como elemento interfacial entre o transdutor e o corpo de prova. A Figura 3 mostra uma fotografia da montagem do acoplador na amostra. A verificação da eficiência do acoplamento fez-se pelo sinal de resposta da quebra de grafite 0,3 mm (dureza 2 H) na superfície da amostra. Este procedimento foi adotado conforme indica a norma ASTM E 2075.⁽⁹⁾

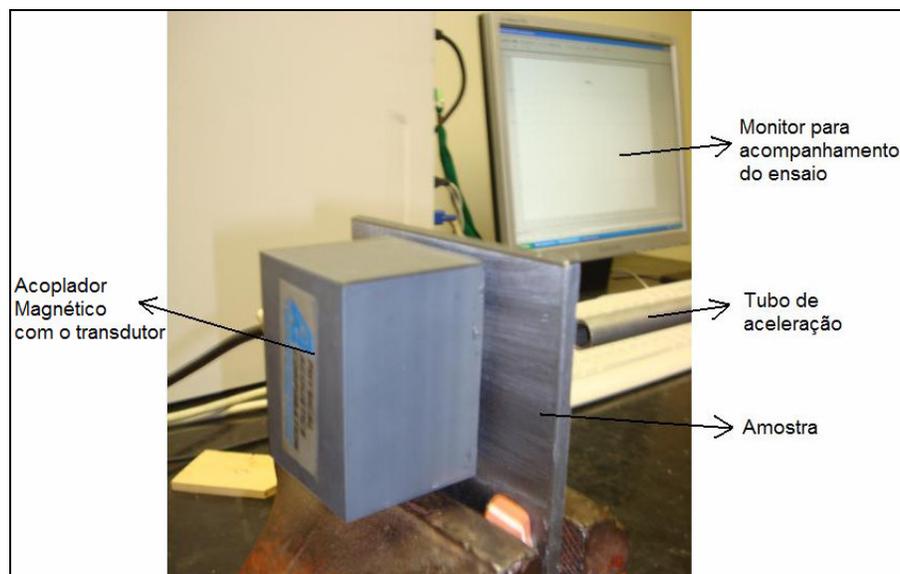


Figura 3. Transdutor de EA acoplado.

A placa de EA apresenta uma capacidade limitada de aquisição e processamento de sinais, sendo necessários alguns ajustes de *set-up* do equipamento para evitar a saturação do canal e perda de sinais durante o ensaio. O parâmetro a ser ajustado é o *threshold* (limiar de referência). Este parâmetro é utilizado como um filtro passa alta de amplitude. Somente os sinais que apresentarem picos de amplitude com valores acima do estabelecido no *threshold* serão adquiridos e parametrizados pelo sistema de EA. Para cada ângulo e vazão

utilizados nos ensaios foi determinado um valor ótimo para o *threshold*, tendo como referência para tal a quantidade de sinais, bem como os valores de contagem e energia de EA. A Figura 4 mostra as características dos sinais de uma onda de emissão acústica.

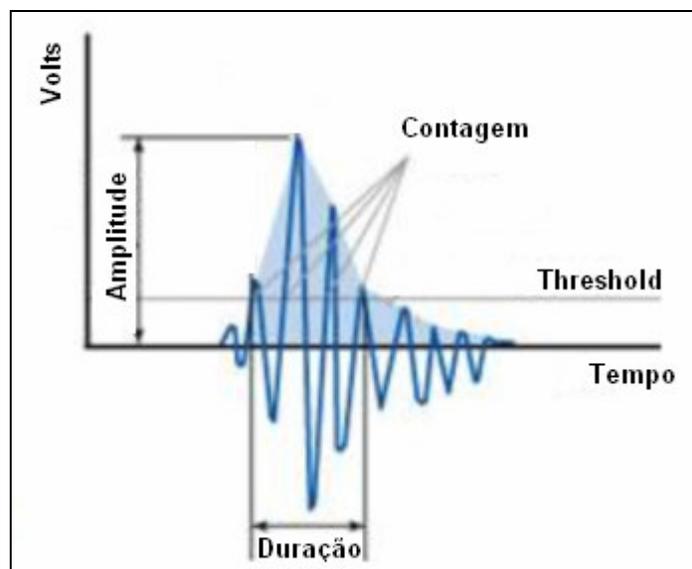


Figura 4. Características de uma onda de EA.

A aquisição dos sinais de EA foi feita por aproximadamente 1 minuto para cada condição de ensaio, registrando-se os valores de RMS (*root mean square*). A Equação 01 apresenta o método para determinar o parâmetro RMS, o qual representa a média quadrática do sinal.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Equação 01

onde:

- x = valores em tensão do sinal;
- n= numero de valores aquisitados em um sinal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados procedeu-se com base em dois parâmetros de EA (RMS e *threshold*) e outros três parâmetros do ensaio (vazão, ângulo de incidência do fluxo e acabamento superficial).

A Figura 5 mostra que não houve diferença significativa nos sinais de EA (*threshold*) para os acabamentos superficiais de retífica e lixamento, em função dos ângulos de incidência. Este fato pode ser considerado como esperado, pois os processos de preparação destas superfícies são semelhantes, conduzindo a uma mesma orientação dos sulcos (superfície anisotrópica), o que torna a rugosidade e o próprio aspecto visual (Figura 1) muito semelhantes. Já para o acabamento jateado,

é possível identificar uma elevação na intensidade e quantidade dos sinais. Porém, para ângulos mais próximos da normal, o efeito do acabamento diminui.

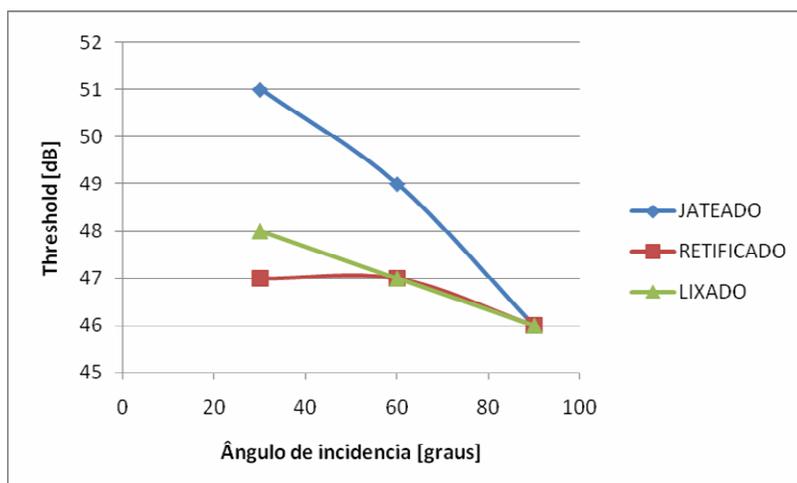


Figura 5 – Threshold em função do ângulo para os três tipos de acabamento (vazão = 10 m³/h).

O parâmetro RMS diferencia-se da amplitude, também representativa para avaliar a intensidade do sinal, pelo fato de representar a intensidade de um sinal contínuo como um todo, e não somente um pico no sinal, como ocorre no parâmetro amplitude. Esta característica da amplitude pode ser melhor visualizada na Figura 4. O RMS apresenta grande sensibilidade para avaliar variações em um sinal contínuo, como é o caso de um fluxo de ar escoando sobre uma superfície ou um vazamento em um sistema pressurizado.

Para verificar a sensibilidade do parâmetro RMS, optou-se pelo uso de uma técnica muito empregada para a verificação da resposta de sensores de EA, a qual utiliza a quebra de um grafite sobre a superfície analisada (ASTM E 2075). Este procedimento foi feito enquanto a amostra estava sujeita a um fluxo constante de ar. A Figura 6 exemplifica esta característica, mostrando uma alteração no sinal de RMS exatamente no instante da quebra do grafite. Como o *software* de EA possibilita ao usuário a observação *on-line* dos sinais parametrizados foi possível correlacionar o momento da quebra do grafite com a variação do sinal de RMS. O parâmetro RMS pode ser futuramente empregado para diferenciar os sinais de EA gerados pelo fluxo de ar dos sinais das partículas suspensas no ar erodindo a superfície.

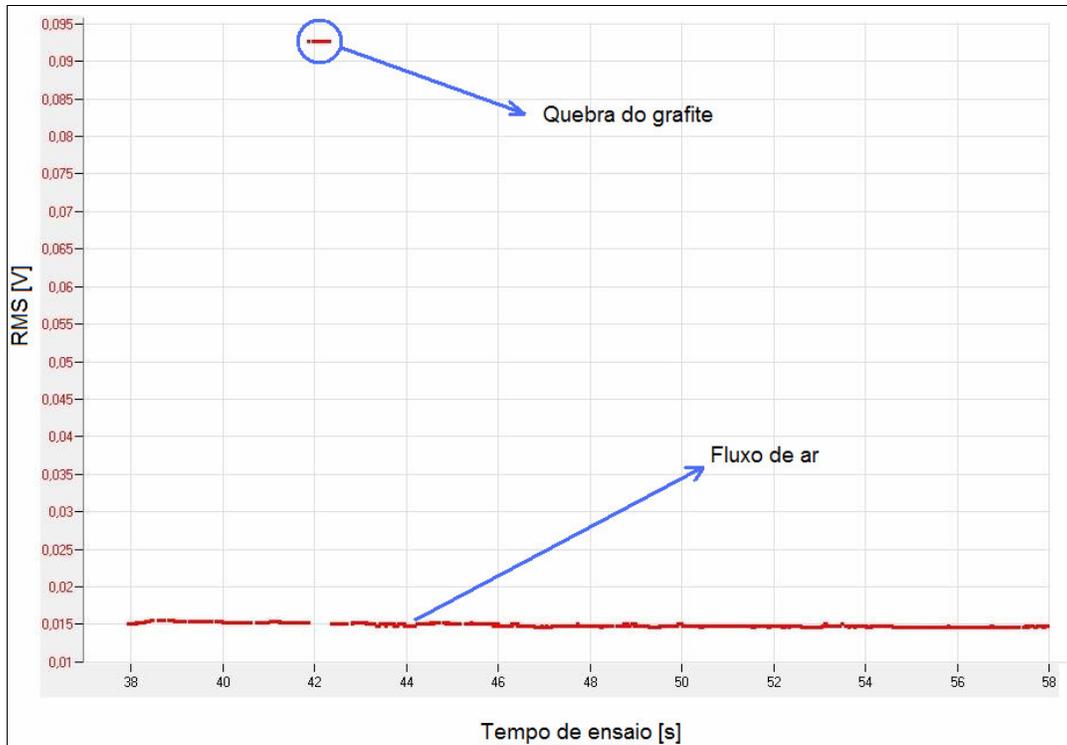


Figura 6 – Imagem extraída do software **AEwin**, mostrando o sinal de RMS no tempo.

A variação da vazão do fluido apresentou influência mais evidente sobre todos os parâmetros de EA analisados. O aumento da vazão de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ para $20 \text{ m}^3/\text{h}$ provocou uma elevação na quantidade e na amplitude dos sinais de EA para os três ângulos investigados. Este fato decorre do aumento no valor da energia cinética do fluido, representada principalmente pela elevação da velocidade do fluxo (de aproximadamente 30 m/s para 60 m/s).

A Figura 7 mostra o exemplo de um ensaio com superfície jateada. Pode-se observar que com a duplicação da vazão de fluido o sinal de RMS apresenta uma elevação significativa para todos os ângulos analisados.

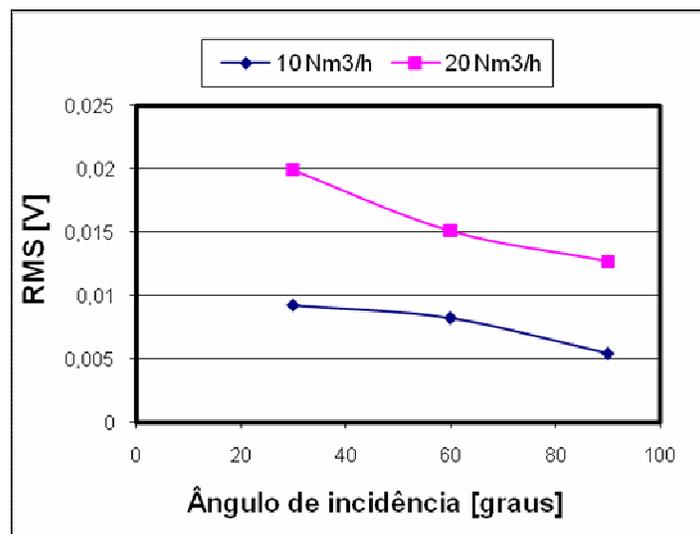


Figura 7 – Sinal de RMS em função do ângulo de incidência para amostra com acabamento superficial com jateamento.

A variação do ângulo de incidência varia o modo de escoamento do ar sobre a superfície. DENG et al.⁽¹⁰⁾ mostra em uma ensaio com partículas, que para ângulos próximos da normal, forma-se uma região de estagnação do ar, no centro do fluxo, próximo á superfície. Este fenômeno limita a região da amostra sujeita ao escoamento do fluido. Nota-se que a intensidade do sinal diminui para o ângulo de 90 graus, devido ao fato da fonte ativa de sinais terem a sua área reduzida pela região de estagnação, uma vez que a principal fonte emissora de sinais é o escoamento do fluido sobre a superfície da amostra.

4 CONCLUSOES

Com os resultados acima apresentados pode-se concluir que:

- o parâmetro RMS mostrou ser muito eficiente para determinar a ocorrência de sinais de maior intensidade inseridos em um sinal contínuo (vazamento ou escoamento de fluido sobre uma superfície). Este fato pode ser constatado através da quebra de um grafite sobre a superfície sujeita a um fluxo constante de ar;
- o ângulo de incidência do fluxo de ar sobre a superfície varia o modo de escoamento do fluido, apresentando alterações nos sinais de RMS e no valor do *threshold*. Para ângulos próximos a normal, a intensidade e quantidade dos sinais de EA sofrem uma sensível redução. Atribui-se este fenômeno a formação de uma região de estagnação do ar no centro do fluxo, próximo a superfície, o que diminui a área da amostra sujeita ao escoamento do ar; e
- o acabamento superficial influencia nos valores de *threshold*, porém, para ângulos de incidência maiores, menor é esta influencia.

Agradecimentos

Agradecimentos ao MSc. Sérgio Luiz Henke, pelas análises por microscopia eletrônica, ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, por ceder as suas instalações e equipamentos para a montagem do aparato utilizado nos ensaios, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) dentro do projeto “**Desenvolvimento de pessoal técnico na utilização de técnicas de emissão acústica para a resolução de problemas do setor elétrico**” do convênio UTFPR / LacTec / COPEL.

REFERENCIAS

- 1 NDT Resource Center. Informações sobre o ensaio de emissão acústica. Disponível em: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Index.htm. Acesso em: 23 jan. 2009.
- 2 FERES FILHO, P. Monitoramento de fundos de tanques atmosféricos através da técnica de emissão acústica. PASA, 4p., 2002.
- 3 Miller, R.K., Pollock, A. A., Watts D. J., Carlyle J. M., Tafuri A. N., Yezzi Jr., J. J. A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. NDT&E International 32, p. 1–8, 1999.
- 4 RAVINDRA, H. V.; SRINIVASA, Y. G.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. Wear, v. 212, p. 78-84, jun. 1997.

- 5 LI, C. J.; LI, S. Y. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring. *Wear*, v. 185, p. 67-74, jan. 1995.
- 6 MOMBER, A. W.; MOHAN, R. S.; KOVACEVIC, R. On-line analysis of hydro-abrasive erosion of pre-cracked materials by acoustic emission. *Theoretical and applied fracture mechanics*, v. 31, p. 1-17, 1999.
- 7 ZHANG, L.; SAZONOV, V.; KENT, J.; DIXON, T.; NOVOZHILOV, V. Analysis of boiler-tube erosion by the technique of acoustic emission – Part I. Mechanical erosion. *Wear*, v. 250, p. 762-769, 2001.
- 8 FERRER, F.; IDRISSE, H.; MAZILLE, H.; FLEISCHMANN, P.; LABEEUW, P. On the potential of acoustic emission for the characterization and understanding of mechanical damaging during abrasion – corrosion processes. *Wear*, v. 231, p. 108-115, mar. 1999.
- 9 ASTM E 2075 – 05. Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod, 2005.
- 10 T. Deng, M.S. Bingleya, M.S.A. Bradley, S.R. De Silva A comparison of the gas-blast and centrifugal-accelerator erosion testers: The influence of particle dynamics. *Wear* 265, p. 945–955, 2008.