



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E
DE MATERIAIS - PPGEM

GUSTAVO BORGES TIBONI

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM
ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO

CURITIBA
NOVEMBRO / 2011

GUSTAVO BORGES TIBONI

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM
ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Materiais, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Carlos Henrique da Silva,
Dr. Eng.

CURITIBA
NOVEMBRO / 2011

TERMO DE APROVAÇÃO

GUSTAVO BORGES TIBONI

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Prof. Linilson Rodrigues Padovese, Dr. Eng.
(USP)

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
(UTFPR)

Prof. Paulo César Borges, Dr. Eng.
(UTFPR)

Prof. Carlos Henrique da Silva, Dr. Eng.
(UTFPR)

Curitiba, 28 de novembro de 2011.

*Dedico este trabalho à
minha esposa, Vanessa.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e compreensão em todos os momentos da minha vida.

Ao Prof. Carlos Henrique da Silva, meu orientador, pela dedicação, paciência e compreensão.

Aos amigos e colegas de profissão, Leonardo Pires e Ângelo Stenzel, pela ajuda na execução dos ensaios.

Aos Professores Paulo Borges e Giuseppe Pintaúde pela colaboração e sugestões de grande valia para o trabalho.

Aos engenheiros André Capra e Rafaela Lopes, pela grande ajuda na caracterização dos materiais utilizados neste trabalho.

Ao Prof. Pianaro, da UEPG, pela realização de ensaio para a caracterização das partículas.

Ao Eng. Tiago Francesconi pela ajuda na análise de imagens.

Aos bolsistas da UTFPR: Carla Jarek, Thiago Marquardt, Victor Santa Maria e Francisco Makita, pela ajuda na execução dos ensaios e parceria nos artigos publicados neste período.

Ao grande amigo Nestor Carlos de Moura. Grande parte dos conhecimentos sobre emissão acústica aqui utilizados me foram passados por ele.

Aos colegas do LACTEC, pelas experiências, conhecimentos e bons momentos compartilhados.

Ao Eng. Paulo Oliveira pelo incentivo e apoio para a finalização do trabalho.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, pelo apoio e fornecimento da estrutura necessária para a realização dos ensaios.

Ao programa de pós graduação PPGEM da UTFPR por propiciar a realização deste trabalho.

TIBONI, G. B., **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO**, 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 124p.

RESUMO

O desgaste erosivo provocado pelo impacto de partículas sólidas contra uma superfície é um fenômeno tribológico presente em muitos segmentos da indústria, como o de transporte, o aeronáutico, o de mineração, de geração de energia, entre outros. A metodologia mais usual para a determinação da taxa de desgaste é através da medição da perda de massa do material. Com o objetivo de aplicar uma técnica com potencial para a determinação da taxa de desgaste, este trabalho desenvolveu um equipamento dedicado e realizou ensaios preliminares de desgaste erosivo monitorados pela técnica de ensaio não destrutivo de emissão acústica (EA). Esta pode ser definida como uma técnica capaz de detectar ondas mecânicas geradas pela liberação de energia elástica acumulada no material. Foram realizados ensaios de desgaste erosivo com o objetivo de avaliar a capacidade do equipamento coletar os dados de EA e de correlacionar estes dados com o desgaste dos corpos de prova. Amostras de aço com baixo teor de carbono foram desgastadas pelo impacto de partículas angulares de óxido de alumínio suspensas em ar comprimido a três velocidades diferentes: 45, 57 e 67 m/s. O ângulo de impacto entre as partículas e a amostra foi ajustado em 30 graus e a temperatura de ensaio em aproximadamente 20°C. A taxa de desgaste apresentou variação com a velocidade de impacto em concordância com a energia cinética das partículas erodentes e o parâmetro RMS de EA mostrou sensibilidade à variação da velocidade de impacto das partículas e ao desgaste da amostra erodida. A taxa de sinais de EA coletados no tempo apresentou correlação com o fluxo de partículas colidindo com a amostra, bem como os parâmetros de energia, tempo de subida e duração do sinal.

Palavras-chave: Desgaste, Erosão, Emissão Acústica.

TIBONI, G. B., **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO**, 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 124p.

ABSTRACT

The erosive wear caused by impact of solid particles against a surface is a tribological phenomenon present in many segments of the industry, such as transportation, aerospace, mining, power generation, among others. The most usual method to set the wear rate is by measuring the mass loss of the material. In order to apply one technique with potential to determine the rate of erosion wear, this study developed a dedicated equipment and conducted preliminary erosion tests monitored by non-destructive testing known as acoustic emission technique (AE). This can be defined as a technique able to detect mechanical waves generated by the release of elastic energy accumulated in the material. Erosion testes were performed in order to evaluate the ability of equipment to collect data from AE and to correlate these data with the wear of the specimens. Samples of low carbon steel eroded by the impact of angular aluminum oxide particles suspended in air at three different velocities: 45, 57 and 67 m/s. The impact angle between the particles and the sample was set at 30 degrees and the test temperature at approximately 20°C. The wear rate has changed with the velocity in accordance with the kinetic energy of the particles and the AE parameter RMS showed sensitivity to the variation of particle impact velocity and to the wear of the sample eroded. The rate of AE signals collected over time correlated with the flow of particles striking the sample, and with the parameters of energy, rise time and duration of the signal.

Keywords: Erosion, Wear, Acoustic Emission.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Economias decorrentes do emprego de conceitos de tribologia, em milhões de libras esterlinas com valores de 1966 (JOST, 1990). | 21 |
| Figura 2.1 - Forças envolvidas no impacto de uma partícula sobre a superfície..... | 24 |
| Figura 2.2 - Desgaste x tempo para seis velocidades de impacto. Condições de ensaio: ângulo de impacto - 90°; temperatura - 25°C; fluxo de partículas - 90 g/min (LINDSLEY e MARDER, 1999). | 27 |
| Figura 2.3 - Taxa de erosão pela velocidade de impacto para uma liga de Fe-0,6%C temperada em água (TA) e outra temperada em água e revenida (TA&R). Condições do ensaio: ângulo – 90°; temperatura – 25°C; erodente – alumina 355 µm; fluxo de partículas: 90 g/min (LINDSLEY e MARDER, 1999). | 27 |
| Figura 2.4 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de desgaste erosivo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). | 29 |
| Figura 2.5 - Dependência da taxa de erosão em relação a dureza das partículas, tendo como superfície de ataque um aço endurecido, ensaiado com partículas de vários materiais suspensas em gás (HUTCHINGS, 1992). | 30 |
| Figura 2.6 - Comparação entre materiais com elevado e reduzido valor do módulo de elasticidade para resistir ao desgaste (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). | 32 |
| Figura 2.7 - Esquema de medição do ângulo de impacto..... | 33 |
| Figura 2.8 - Dependência da taxa de erosão e do ângulo de impacto para partículas de vidro calco-sódico com 9 µm e partículas de carbeto de silício com 21 µm a 136 m/s (HUTCHINGS, 1992). | 34 |
| Figura 2.9 - Representação esquemática de efeito do ângulo de impacto nas taxas de desgaste de materiais com comportamento dúctil e frágil (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). | 35 |
| Figura 2.10 - Seções de áreas impactadas por partículas duras em um metal dúctil, mostrando as formas típicas. A direção do impacto é da esquerda para a direita. (a) Sulcamento formado por partícula esférica; (b) Corte tipo I provocado por partícula angular rotacionando no sentido a favor da direção de impacto; (c) corte tipo II provocado por partícula angular rotacionando no sentido contrário à direção de impacto (HUTCHINGS, 1992). | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.11 – Fotografias de trajetórias de partículas esféricas (650 – 750 µm de tamanho médio) saindo do tubo de aceleração (diâmetro externo de 6,35 mm). Fluxo de partículas: (a), (b) 2,5 kg.m ⁻² .s ⁻¹ ; (c), (d) 9,8 kg.m ⁻² .s ⁻¹ ; (e), (f) 26 kg.m ⁻² .s ⁻¹ . As fotografias (a), (c) e (e) mostra as trajetórias sem amostra; as fotografias (b), (d) e (f) as partículas colidem com uma amostra, posicionada a 20 mm do tubo, com ângulo de impacto de 90° (SHIPWAY e HUTCHINGS, 1994). | 37 |
| Figura 2.12 - Efeito do escoamento do fluxo no desgaste erosivo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). | 38 |
| Figura 2.13 - Mecanismos de erosão; (a) erosão a baixo ângulo de impacto; (b) Fadiga superficial durante impacto a baixa velocidade e alto ângulo; (c) Deformação plástica ou fratura frágil a velocidade média e alto ângulo de impacto; (d) Fusão superficial a altas velocidades de impacto; (e) Erosão macroscópica com efeitos secundários (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). | 39 |
| Figura 2.14 - Fotografias obtidas por MEV de superfícies erodidas com ângulos de impacto de (a) 10°, (b) 20°, (c) 30°, (d) 60°, (e) 90°. Condições de impacto: velocidade 20 m/s e tempo de 5 min (ZHANG <i>et. al.</i> , 2001). | 41 |
| Figura 2.15 - Princípio de detecção de falhas por EA (SOARES e MOURA, 2007). | 43 |
| Figura 2.16 - Ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2006). | 45 |
| Figura 2.17 - Ondas transversais (ANDREUCCI, 2006). | 46 |
| Figura 2.18 - Esquema de um sensor de emissão acústica (FILIPPIN <i>et. al.</i> , 2009). .. | 48 |
| Figura 2.19 - Curvas de calibração para sensor de banda larga (a) e ressonante em 150 kHz (b) (PACNDT, 2011). | 48 |
| Figura 2.20 - Parâmetros de tempo utilizados para formação e parametrização dos <i>hits</i> de EA (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005). | 50 |
| Figura 2.21 - Parâmetros de um sinal de EA (TIBONI, <i>et. al.</i> , 2009). | 50 |
| Figura 2.22 - Variação da energia de EA em função do ângulo de impacto para amostras de aço baixo carbono erodidas por partículas angulares com velocidade de 20m/s (ZHANG <i>et. al.</i> , 2001). | 52 |
| Figura 2.23 - Correlação entre a energia acústica devido ao impacto da partícula e a energia cinética (MOMBER, <i>et. al.</i> , 1999). | 53 |
| Figura 2.24 - Evolução da frequência do sinal de EA com a velocidade do fluido e magnitude dos hits (MOMBER <i>et. al.</i> , 1999). | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.25 - Aparato utilizado para os ensaios de macroesclerometria monitorados por EA (PIOTRKOWSKI <i>et.al.</i> , 2005). | 55 |
| Figura 2.26 - Variação da energia acumulada de EA e da carga aplicada pelo deslocamento relativo em revestimento de TiN (PIOTRKOWSKI <i>et. al.</i> , 2005). | 56 |
| Figura 3.1 - Tribossistema do ensaio de desgaste erosivo..... | 57 |
| Figura 3.2 - Corpo de prova para ensaio de desgaste erosivo. | 58 |
| Figura 3.3 - Micrografia do corpo de prova utilizado nos ensaios de desgaste erosivo. | 59 |
| Figura 3.4 - Histograma com a distribuição de tamanho das partículas de alumina. ... | 60 |
| Figura 3.5 - Fotografias obtidas por MEV. (a) Amplificação de 20 vezes e (b) amplificação de 100 vezes. | 60 |
| Figura 3.6 - Espectro de EDS de uma partícula de alumina. | 61 |
| Figura 3.7 - Localização dos pontos onde foram feitas as medições de microdureza Vickers na partícula..... | 61 |
| Figura 3.8 - Diagrama esquemático do erosímetro..... | 63 |
| Figura 3.9 - Instrumentos utilizados para controle da pressão e monitoramento da vazão do ar comprimido utilizado nos ensaios de desgaste erosivo..... | 64 |
| Figura 3.10 - Alimentador de partículas..... | 65 |
| Figura 3.11 - Dispositivo para regular a vazão de partículas. (a) vista lateral e (b) vista superior..... | 66 |
| Figura 3.12 - Desenho dimensional do dispositivo utilizado para regular vazão de partículas. | 66 |
| Figura 3.13 - Desenho esquemático do venturi (FIGUEIREDO, 2005). | 67 |
| Figura 3.14 – Sistema composto pelo porta amostra e guia de ondas de EA. | 69 |
| Figura 3.15 - Gabaritos utilizados para determinar o ângulo de impacto das partículas sobre a amostra. | 69 |
| Figura 3.16 – Porta amostra mostrando a montagem com ângulo de 30 graus entre a amostra e o fluxo de ar mais partículas..... | 70 |
| Figura 3.17 - Desenho esquemático simplificado do guia de onda de EA. | 70 |
| Figura 3.18 – Vista isométrica do coletor de partículas com posicionamento do porta amostra, tubo de aceleração e local para acoplamento do sensor de EA. | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.19 - Princípio de funcionamento do separador de partículas..... | 72 |
| Figura 3.20 - Montagem do ciclone separador de partículas no erosímetro. | 73 |
| Figura 3.21 - Desenho esquemático com parâmetros utilizados para a determinação da velocidade das partículas (FIGUEIREDO, 2005)..... | 74 |
| Figura 3.22 - Aparato utilizado para determinação da velocidade das partículas. | 75 |
| Figura 3.23 - Análise de imagem para a caracterização do desgaste no disco para a determinação da velocidade das partículas..... | 76 |
| Figura 3.24 - Inserção de sinais acústicos, pela quebra de grafite, para estudo da atenuação do guia de onda. (1) sinais inseridos na amostra e (2) na barra metálica do guia de onda. | 79 |
| Figura 3.25 - Fenômeno de saturação dos sinais caracterizados pelos parâmetros de (a) contagem e amplitude e (b) RMS (TIBONI <i>et. al.</i> , 2009)..... | 81 |
| Figura 4.1 - Perda de massa em função do tempo de ensaio para três velocidades de impacto (300 g de partículas por etapa de ensaio)..... | 86 |
| Figura 4.2 - Taxa de desgaste mássica pelo tempo de ensaio para três velocidades de impacto. | 89 |
| Figura 4.3 - Marcas das identações provocadas pelas medições de microdureza Vickers e o perfil com os valores obtidos para amostras erodidas por 3000g de partículas erodentes com velocidades de impacto de: (a) 67 m/s (CP10), (b) 57 m/s (CP11) e (c) 45 m/s (CP12)..... | 90 |
| Figura 4.4 - Caracterização das amostras com maior teor de carbono. (a) Microestrutura e (b) microestrutura amplificada com indicação da estrutura perlítica. . | 91 |
| Figura 4.5 - Fotografias obtidas por MEV e espectro de EDS de amostras erodidas por 3000g de abrasivo a velocidades de impacto de (a) 57 m/s e (b) 67 m/s. | 92 |
| Figura 4.6 - Taxa de desgaste pela velocidade de impacto das partículas. Valores médios obtidos a partir de seis ensaios realizados para cada velocidade de impacto. | 93 |
| Figura 4.7 - Variação da taxa de desgaste em função da velocidade de impacto para as diferentes quantidades de partículas utilizadas nos ensaios..... | 94 |
| Figura 4.8 - Fotografia obtida por MEV de amostra erodida por partículas angulares, com ângulo e velocidade de impacto de 30 graus e 67 m/s, respectivamente, por aproximadamente 8 minutos. | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.9 - Fotografia obtida por MEV de amostra erodida por partículas angulares, com ângulo e velocidade de impacto de 30 graus e 67 m/s, respectivamente, por aproximadamente 8 minutos. | 96 |
| Figura 4.10 - Fotografia obtida por MEV de amostra erodida por partículas angulares, com ângulo e velocidade de impacto de 30 graus e 67 m/s, respectivamente, por aproximadamente 16 minutos. | 97 |
| Figura 4.11 - Ilustrações do escoamento do fluxo de ar sobre a amostra (a) e a formação dos vórtices nos picos de rugosidade (b) (TIBONI <i>et. al.</i> , 2009). | 97 |
| Figura 4.12 - Fontes de emissão acústica provenientes da partícula erodente. | 99 |
| Figura 4.13 - Onda de emissão acústica coletada durante ensaio de desgaste erosivo com velocidade de impacto de 67 m/s. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal. | 100 |
| Figura 4.14 - Transformada rápida de Fourier (FFT) do sinal acústico da Figura 4.13. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal. | 100 |
| Figura 4.15 - Fluxo de partículas e taxa de sinais de EA em função da velocidade de impacto para 45, 57 e 67 m/s. | 101 |
| Figura 4.16 – Variação do RMS e da taxa de desgaste pela velocidade de impacto. Valores médios de seis ensaios realizados para cada velocidade: 45, 57 e 67 m/s. . | 102 |
| Figura 4.17 - Gráfico de tendência dos sinais de EA (RMS) em função da velocidade do fluxo de ar, sem partículas erosivas (TIBONI <i>et. al.</i> , 2009). | 103 |
| Figura 4.18 - Variação da amplitude [dB] pela velocidade de impacto [m/s]. Valores médios para seis ensaios realizados em cada velocidade. | 103 |
| Figura 4.19 - Onda de emissão acústica coletada durante ensaio de desgaste erosivo com velocidade de impacto de 45 m/s. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal. | 104 |
| Figura 4.20 - Onda de emissão acústica coletada durante ensaio de desgaste erosivo com velocidade de impacto de 57 m/s. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal. | 104 |
| Figura 4.21 - Variação da contagem de picos de EA e da duração do sinal pela velocidade de impacto. Valores médios obtidos em seis ensaios realizados para cada velocidade. | 105 |
| Figura 4.22 - Variação da energia do sinal e do tempo de subida pela velocidade de impacto. Valores médios obtidos em seis ensaios realizados para cada velocidade. . | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.23 - Variação da taxa de desgaste pelo RMS para todos os ensaios realizados. Os valores impressos correspondem ao valor médio de RMS para cada ensaio. | 106 |
| Figura 4.24 - Taxa de desgaste em função da amplitude dos sinais de EA para todos os ensaios realizados. Os valores impressos correspondem à média da amplitude para cada ensaio..... | 107 |
| Figura 4.25 - Comparação entre a variação da amplitude e do RMS em função da taxa de desgaste para todos os ensaios realizados. Os valores impressos correspondem aos valores médios obtidos em cada ensaio. | 108 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Valores para o expoente “n” em ensaios de erosão com ângulos normais (HUTCHINGS, 1992). | 26 |
| Tabela 2.2 - Classificação de fontes de EA (RUZZANTE, 1998). | 44 |
| Tabela 2.3 - Velocidades relativas de propagação das ondas mecânicas (KRAUTKRAMER, 1977). | 47 |
| Tabela 3.1 - Valores de microdureza da partícula de alumina. A localização dos pontos de medição pode ser observada na Figura 3.7. | 62 |
| Tabela 3.2 - Condições de operação do erosímetro. | 62 |
| Tabela 3.3 - Valores de vazão de ar comprimido convertidos para a pressão utilizada nos ensaios - 4,5 bar. | 65 |
| Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados para a verificação do regime de escoamento do fluido em função do comprimento do tubo de aceleração. | 68 |
| Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados nos ensaios para a determinação da velocidade das partículas. | 75 |
| Tabela 3.6 - Velocidades das partículas obtidas experimentalmente. | 76 |
| Tabela 3.7 - Vazão mássica de partículas para cada condição de ensaio. | 77 |
| Tabela 3.8 - Critérios adotados para a verificação do sistema de EA com geração de sinal acústico padrão a partir da quebra de minas de grafite. | 79 |
| Tabela 3.9 - Resultados obtidos para a atenuação do guia de onda. | 79 |
| Tabela 3.10 - Valores de limiar de referência utilizados para as três condições utilizadas nos ensaios de desgaste erosivo. | 81 |
| Tabela 3.11 - Parâmetros do ensaio de desgaste erosivo e do sistema de emissão acústica utilizados para a realização deste trabalho. | 82 |
| Tabela 3.12 - Divisão da quantidade de amostra e metodologia para a determinação da perda de massa para cada ensaio de desgaste erosivo. | 84 |
| Tabela 4.1 - Relações entre a perda de massa pela massa de partículas erodentes para três velocidades de impacto. | 87 |
| Tabela 4.2 - Resultados dos parâmetros do processo de desgaste erosivo para as amostras com valor de dureza elevado. | 91 |

| | |
|---|----|
| Tabela 4.3 - Parâmetros de EA obtidos para ensaios realizados com e sem partículas erosivas. | 98 |
|---|----|

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|--|
| Q | Taxa de desgaste |
| Q_m | Taxa de desgaste mássica |
| V_p | Velocidade de impacto da partícula |
| K | Constante empírica relacionada a propriedades da superfície e da partícula |
| n | Expoente da velocidade obtido experimentalmente |
| E_c | Energia cinética da partícula |
| m | Massa da partícula |
| V_{pa} | Velocidade da partícula |
| F | Fator de arredondamento |
| A | Área da projeção da partícula |
| P | Perímetro da projeção da partícula |
| H_a | Dureza da partícula erodente |
| H_s | Dureza da amostra |
| Amp | Amplitude do sinal de EA |
| $V_{máx}$ | Tensão máxima gravada pela onda de EA |
| HV | Dureza Vickers |
| Q_{real} | Vazão volumétrica real de ar comprimido |
| Q_{rot} | Vazão volumétrica de ar comprimido indicada no rotâmetro |
| P_{man} | Pressão indicada no manômetro |
| C | Comprimento do tubo de aceleração |
| d | Diâmetro interno do tubo de aceleração |
| Re | Número de Reynolds |
| r | Distância entre o centro do orifício e o centro do disco |
| w | Rotação do motor |
| L | Distância entre os discos |

| | |
|-------|---|
| S | Distância entre as marcas nos discos |
| m_i | Massa inicial da amostra |
| m_f | Massa final da amostra |
| m_p | Massa de partículas erodentes utilizada no ensaio |
| t | Tempo de ensaio |

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| RESUMO | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE FIGURAS | viii |
| LISTA DE TABELAS | xiv |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xvi |
| 1 INTRODUÇÃO | 21 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 24 |
| 2.1 DESGASTE EROSIVO | 24 |
| 2.1.1 Velocidade de impacto | 25 |
| 2.1.2 Propriedade das partículas | 28 |
| 2.1.2.1 Tamanho e massa das partículas | 28 |
| 2.1.2.2 Dureza das partículas | 29 |
| 2.1.2.3 Geometria das partículas | 30 |
| 2.1.3 Propriedade mecânica da superfície erodida | 32 |
| 2.1.4 Ângulo de Impacto | 33 |
| 2.1.5 Fluxo de Partículas | 36 |
| 2.1.6 Mecanismos de desgaste | 38 |
| 2.2 EMISSÃO ACÚSTICA | 42 |
| 2.2.1 Fontes de emissão acústica | 44 |
| 2.2.2 Propagação de ondas mecânicas | 45 |
| 2.2.3 Sensor de emissão acústica | 47 |
| 2.2.4 Detecção e parametrização do sinal de EA | 49 |
| 2.2.5 Parâmetros de sinal de EA | 50 |
| 2.2.6 Aplicações de emissão acústica em Tribologia | 51 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 57 |
| 3.1 MATERIAIS | 57 |
| 3.1.1 Corpo: amostra de aço-carbono | 57 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 3.1.2 | Partícula erodente..... | 59 |
| 3.2 | MÉTODOS..... | 62 |
| 3.2.1 | Erosímetro..... | 62 |
| 3.2.1.1 | Sistema de ar comprimido..... | 63 |
| 3.2.1.2 | Válvula reguladora de pressão..... | 64 |
| 3.2.1.3 | Medidor de vazão de ar – Rotâmetro..... | 64 |
| 3.2.1.4 | Alimentador de partículas..... | 65 |
| 3.2.1.5 | Venturi..... | 66 |
| 3.2.1.6 | Tubo de aceleração..... | 67 |
| 3.2.1.7 | Porta amostra..... | 68 |
| 3.2.1.8 | Separador de partículas..... | 71 |
| 3.2.1.9 | Ensaio de calibração do erosímetro..... | 73 |
| 3.2.1.9.1 | Determinação da velocidade da partícula erodente..... | 73 |
| 3.2.1.9.2 | Vazão mássica de partículas erodentes..... | 76 |
| 3.2.1.9.3 | Medição do desgaste – perda de massa..... | 77 |
| 3.2.2 | Sistema de emissão acústica..... | 78 |
| 3.2.2.1 | Calibração do sensor / Sistema de EA..... | 78 |
| 3.2.2.2 | Atenuação do guia de onda..... | 79 |
| 3.2.2.3 | Ajuste do Limiar de Referência..... | 80 |
| 3.2.3 | Ensaio de desgaste erosivo..... | 81 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 85 |
| 4.1 | ENSAIO DE EROSIÃO..... | 85 |
| 4.1.1 | Taxa de Desgaste..... | 85 |
| 4.1.2 | Mecanismos de desgaste..... | 94 |
| 4.2 | DESGASTE x EMISSÃO ACÚSTICA..... | 97 |
| 4.2.1 | Relação do sinal de EA com a velocidade de impacto..... | 101 |
| 4.2.2 | Relação do sinal de EA com a taxa de desgaste..... | 106 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 109 |

| | | |
|---|--|-----|
| 6 | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 111 |
| 7 | PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO | 112 |
| 8 | REFERÊNCIAS | 113 |
| | APÊNDICE A – Determinação do número de Reynolds | 119 |
| | APÊNDICE B – Resultados dos Ensaios de Desgaste Erosivo | 122 |
| | ANEXO 1 – Catálogo Técnico das partículas de óxido de alumínio utilizadas nos ensaios | 123 |

1 INTRODUÇÃO

A tribologia pode ser definida como a ciência que estuda o atrito, a lubrificação e o desgaste de superfícies de engenharia, com o objetivo de compreender as interações entre os materiais em contato e maximizar a sua aplicação (MOORE, 1975). O crescimento populacional e o grande aumento da demanda por energia registrado nas últimas décadas alertou para a necessidade de aumento na eficiência de sistemas de geração de energia, com a preocupação em reduzir custos no que tange a manutenção de instalações e a produção da energia.

A melhoria dos materiais e sistemas de monitoramento para a detecção de desgaste presentes em sistemas tribológicos existentes em plantas de geração de energia pode aumentar a eficiência e reduzir os custos envolvidos. A Figura 1.1 mostra um estudo realizado em 1966 na Inglaterra sobre a economia de recursos da indústria local, com investimento em tribologia (JOST, 1990).

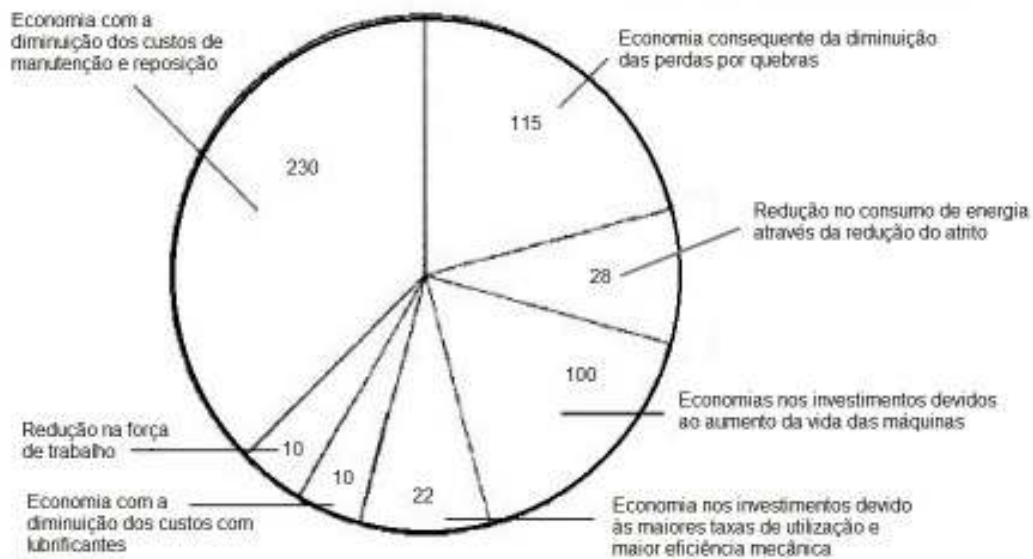


Figura 1.1 - Economias decorrentes do emprego de conceitos de tribologia, em milhões de libras esterlinas com valores de 1966 (JOST, 1990).

Entre os principais mecanismos de desgaste está o desgaste erosivo, provocado por impactos de pequenas partículas sólidas suspensas em um fluido movendo-se contra uma superfície, provocando a remoção de material (HUTCHINGS, 1992). Este mecanismo de desgaste está presente em muitos segmentos da indústria, como o de transporte, o aeronáutico, o de mineração, de geração de energia, entre outros (WANG e YAHNG, 2008). Em muitos casos, como em dutos e tubulações de

caldeiras ou trocadores de calor, o desgaste ocorre de maneira gradual e silenciosa, sendo percebido somente quando toda a seção resistente do material foi desgastada, causando a ruptura.

A metodologia usual para determinar o desgaste erosivo é realizada pela determinação da perda de material, seja pela variação da massa ou pela diminuição na espessura de componentes mecânicos, esta última empregada em instalações industriais pela aplicação de técnicas de ensaios não destrutivos (NDT do BRASIL, 2011). A redução na espessura pode ser determinada por técnicas, como ultra-som, que analisam a diferença nos tempos de chegada de ondas mecânicas, geradas e emitidas pelo próprio instrumento de ensaio, a partir da comparação com um padrão. Esta metodologia permite o acompanhamento do desgaste pela evolução do dano nos intervalos de tempo entre as medições de espessura, porém são demandadas várias medições para a determinação da taxa de desgaste.

Estudos realizados anteriormente identificaram o potencial de uma técnica de ensaio não destrutivo (END), denominada emissão acústica (EA), para a detecção e acompanhamento da evolução do desgaste erosivo causado por partículas suspensas em um fluido gasoso colidindo contra tubos em trocadores de calor (ZHANG *et. al.*, 2001). Esta técnica apresentou potencial para prever a evolução e intensidade da taxa de desgaste em um único período de monitoramento.

A emissão acústica pode ser definida como uma técnica de END capaz de detectar ondas mecânicas geradas pela liberação de energia elástica acumulada no material (SOARES e MOURA, 2007). Esta técnica possui uma variada gama de aplicações, dentre as quais podem-se destacar o monitoramento de equipamentos pressurizados para a detecção de defeitos (principalmente trincas em vasos de pressão), a detecção de descargas parciais em transformadores de potência (FILIPPIN *et. al.*, 2009) e avaliação de corrosão em fundo de tanques de armazenamento (FERES FILHO, 2004).

O desenvolvimento da aplicação da técnica de EA para o monitoramento e diagnóstico de desgaste passa pela realização de ensaios em laboratório. Esta etapa, onde se tem o controle sobre as variáveis envolvidas no processo, é muito importante, pois é a partir destes que são estabelecidas as correlações entre as variáveis envolvidas no processo de desgaste com os parâmetros da técnica.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do erosímetro e os resultados dos ensaios de desgaste, com o objetivo de verificar a eficiência do protótipo e

correlacionar os mecanismos de dano e a taxa de desgaste com os dados de EA coletados.

Este trabalho faz parte do projeto intitulado “Técnicas de análise de sinais para identificação e caracterização de danos em elementos mecânicos”, parte de uma linha de pesquisa que trata do uso de técnicas de detecção de sinais para a compreensão de fenômenos de desgaste, desenvolvida pelo grupo de materiais, tribologia e corrosão (GrMaTS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Também está enquadrado no projeto: “Desenvolvimento de pessoal técnico na utilização de técnicas de emissão acústica para a resolução de problemas do setor elétrico”, acordado entre COPEL / LACTEC / UTFPR.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre os principais conceitos envolvidos no desgaste erosivo e sobre a técnica de ensaio não destrutivo de emissão acústica.

2.1 DESGASTE EROSIVO

O processo de desgaste erosivo ocorre quando partículas colidem contra uma superfície. Neste, várias forças agem sobre a partícula erodente conforme apresentado na Figura 2.1. O desgaste erosivo difere da abrasão a três corpos, fenômeno que também envolve partículas soltas na região de contato, principalmente na origem das forças aplicadas (FIGUEIREDO, 2005). Na erosão, partículas “vizinhas” exercem forças de contato sobre a partícula impactante, que também é sujeita à força de arraste provocada pelo fluido e pelo próprio peso. Porém, com maior importância está a força de contato provocada pela reação da superfície ao impacto, responsável por desacelerar a partícula da sua velocidade inicial no momento da colisão.

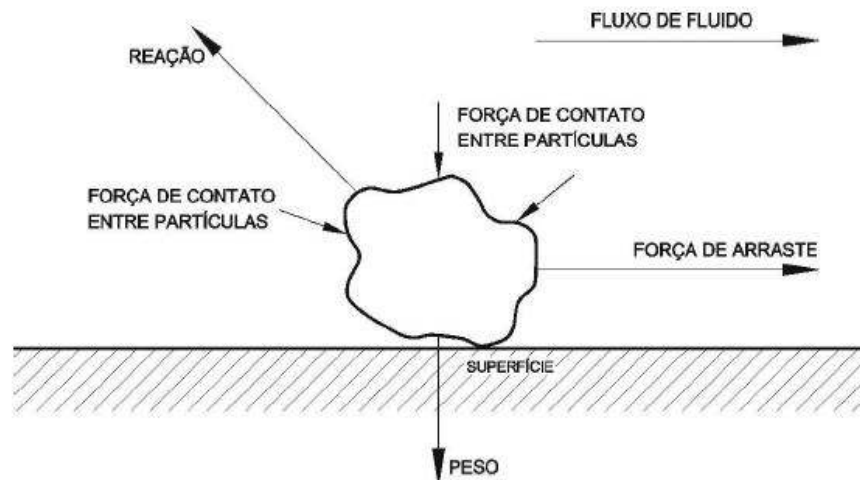


Figura 2.1 - Forças envolvidas no impacto de uma partícula sobre a superfície.

O dano por erosão pode ser considerado como uma remoção gradual de material a partir da superfície causada por repetitivas deformações e cortes (OKA *et. al.*, 2005). Existem vários fatores que exercem influência no mecanismo de dano predominante e na taxa de desgaste. Estes podem ser divididos em três grupos: relacionados às propriedades da superfície erodida, às partículas erodentes e aos parâmetros de impacto. Como são muitas as variáveis envolvidas e a relação entre as mesmas exerce também forte influência sobre a taxa de desgaste, muitos autores adotam uma divisão através dos mecanismos de dano em dois grupos relacionados ao

comportamento dos materiais envolvidos: dúctil e frágil. Este trabalho não seguirá somente esta linha, porém é inevitável recorrer a estes termos na análise do comportamento dos materiais submetidos ao desgaste erosivo.

2.1.1 Velocidade de impacto

A velocidade de impacto das partículas sobre a superfície erodida exerce uma forte influência na taxa de desgaste, uma vez que a energia disponível para a remoção do material por erosão é proveniente da energia cinética da partícula erodente. A velocidade de impacto das partículas pode ser correlacionada com a taxa de desgaste erosivo através de equação 2.1:

$$Q = K \cdot V_p^n \quad (\text{equação 2.1})$$

onde:

- Q = taxa de desgaste, em kg/s;
- K = constante empírica;
- Vp = velocidade de impacto da partícula erodente;
- n = expoente obtido experimentalmente.

A constante K está correlacionada a parâmetros do ensaio que não são controlados analiticamente, como a densidade e forma das partículas. O valor esperado para o expoente “n” varia entre 2 e 3, para partículas sólidas, ligeiramente acima de qualquer previsão com base na energia cinética da partícula. O expoente “n” é uma constante obtida experimentalmente, dependendo de propriedades das partículas e do sistema utilizado para os ensaios e tem papel fundamental na severidade do desgaste. A Tabela 2.1 apresenta alguns valores do expoente “n” apresentados por HUTCHINGS (1992).

Tabela 2.1 - Valores para o expoente “n” em ensaios de erosão com ângulos normais (HUTCHINGS, 1992).

| Material | Abrasivo | Expoente “n” |
|-------------|---------------------------|--------------|
| Cu, OFHC | 82 µm - SiC | 3 |
| Cu, OFHC | Vários tamanhos | 2,8 |
| Aço, 11% Cr | 138 µm – esferas de vidro | 3,4 |
| Al 1100-0 | 250 µm - SiC | 2,9 |
| Al, 99,9% | 1,58 mm – esferas de WC | 3,3 |
| Liga de Al | 138 µm – esferas de vidro | 2,4 |
| Al | 430 µm – esferas de aço | 2,5 |
| Al 6061-T6 | 550 µm – esferas de vidro | 3 |

De acordo com a definição de energia cinética (equação 2.2) o valor de n deveria ser próximo a 2, o que pode ser observado para materiais metálicos, conforme apresentado na Tabela 2.1. Valores muito acima de 2 para este podem indicar que outras condições de impacto ou propriedades do material estão exercendo influência no mecanismo de desgaste.

$$E_c = (1/2) \cdot m \cdot V_{pa}^2 \quad (\text{equação 2.2})$$

onde:

- E_c = energia cinética da partícula, em J;
- m = massa da partícula, em kg;
- V_{pa} = velocidade da partícula, em m/s.

A dependência da taxa de desgaste em função da velocidade de impacto das partículas foi estudada por LINDSLEY e MARDER (1999), no qual, para as mesmas condições de ensaio, variou-se a velocidade em valores compreendidos entre 20 e 64 m/s. A Figura 2.2 apresenta os resultados obtidos para a erosão de uma amostra de aço (0,6% C) temperado e revenido erodido por partículas de alumina com tamanho médio de 355 µm (LINDSLEY e MARDER, 1999). Nota-se o aumento do desgaste em função do aumento da velocidade de impacto.

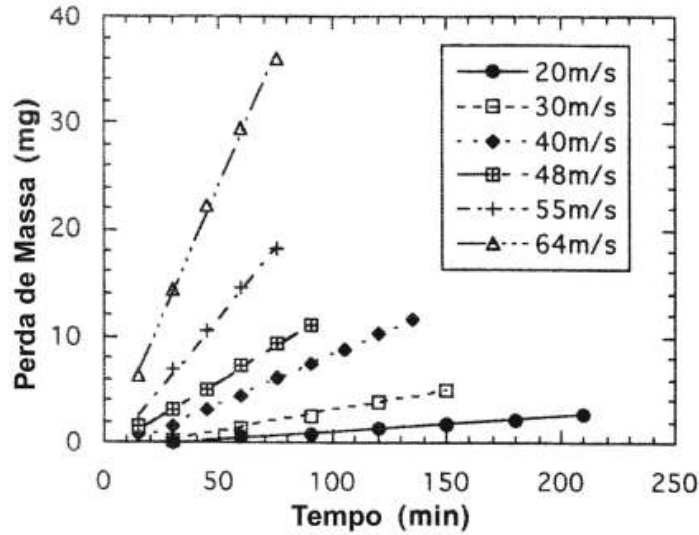


Figura 2.2 - Desgaste x tempo para seis velocidades de impacto. Condições de ensaio: ângulo de impacto - 90°; temperatura - 25°C; fluxo de partículas - 90 g/min (LINDSLEY e MARDER, 1999).

LINDSLEY e MARDER (1999) também avaliaram a evolução da taxa de desgaste, em mg/min, em função da velocidade de impacto, para o mesmo material sujeito a tratamentos térmicos diferentes, conforme apresentado na Figura 2.3. Nota-se que a variação da dureza da amostra, proporcionada pelo tratamento térmico, provocou alteração no coeficiente “n”, conforme as equações indicadas no gráfico.

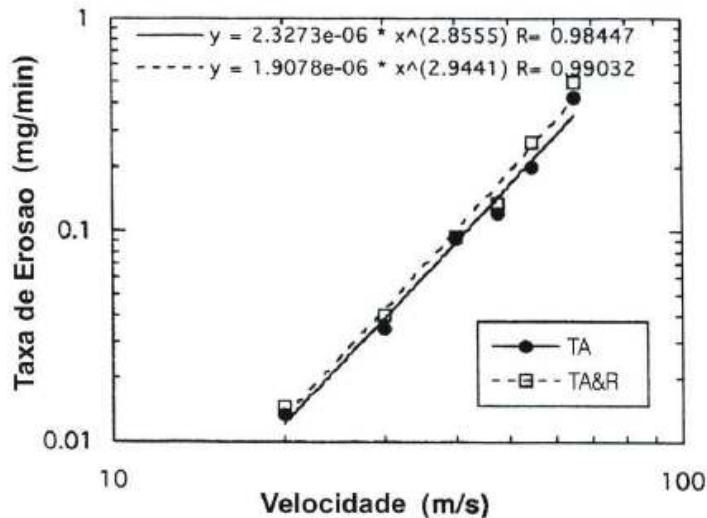


Figura 2.3 - Taxa de erosão pela velocidade de impacto para uma liga de Fe-0,6%C temperada em água (TA) e outra temperada em água e revenida (TA&R). Condições do ensaio: ângulo - 90°; temperatura - 25°C; erodente - alumina 355 µm; fluxo de partículas: 90 g/min (LINDSLEY e MARDER, 1999).

Fatores relacionados à partícula também exercem influência na dependência da taxa de desgaste com relação à velocidade de impacto das partículas. Formas e volumes diferentes de partículas erodentes resultam em um volume diferente pelo qual a energia vai ser transferida para a superfície do material sob desgaste, resultando em densidades diferentes de energia aplicadas a superfície (FIGUEIREDO, 2005). Quanto maior for a partícula e mais acelerada estiver, mais largas e profundas serão as identações provocadas na superfície (OKA *et. al.*, 1997).

2.1.2 Propriedade das partículas

As características que exercem influência no desgaste erosivo são relativas ao tamanho, massa, dureza (principal meio de caracterização das propriedades mecânicas) e geometria das partículas. Uma breve abordagem sobre cada propriedade será apresentada.

2.1.2.1 Tamanho e massa das partículas

Partículas utilizadas nos ensaios tribológicos de erosão têm tamanhos variados, compreendendo em sua maioria na faixa de 4 a 500 μm . Vários tamanhos de partícula apresentam eficiência na remoção de material, porém a bibliografia nos traz a informação de que a taxa de remoção cai sensivelmente para tamanhos menores do que 100 μm . Isto pode ser explicado pelo fato da tensão de escoamento de um pequeno volume de material ser mais alta do que a de um volume maior de material (HUTCHINGS, 1992). Uma razão provável para este fenômeno é a dificuldade de nucleação e movimentação das discordâncias em um volume pequeno de material. Isto justifica a influência do tamanho de partícula na taxa de desgaste em materiais dúcteis (por processo de deformação plástica). Para o desgaste em materiais frágeis, o tamanho da partícula é ainda mais relevante, pois o mecanismo de desgaste envolve fratura frágil e, a energia transferida da partícula para a superfície é diretamente proporcional ao tamanho das partículas.

A variação no tamanho, e conseqüentemente na massa das partículas, na faixa típica de aplicações de engenharia, pode causar alterações fundamentais no mecanismo de erosão presente. STACHOWIACK e BATCHELOR (2005) afirmam, baseado em estudos com uma série de ensaios de erosão em vidro, aço, grafite e cerâmica, que conforme aumenta-se o diâmetro das partículas de 8,75 μm a 127 μm , o mecanismo de erosão altera de dúctil pra frágil. Isto provoca uma alteração no pico de erosão de aproximadamente 30° para 80° no ângulo de impacto, conforme pode-se observar na Figura 2.4.

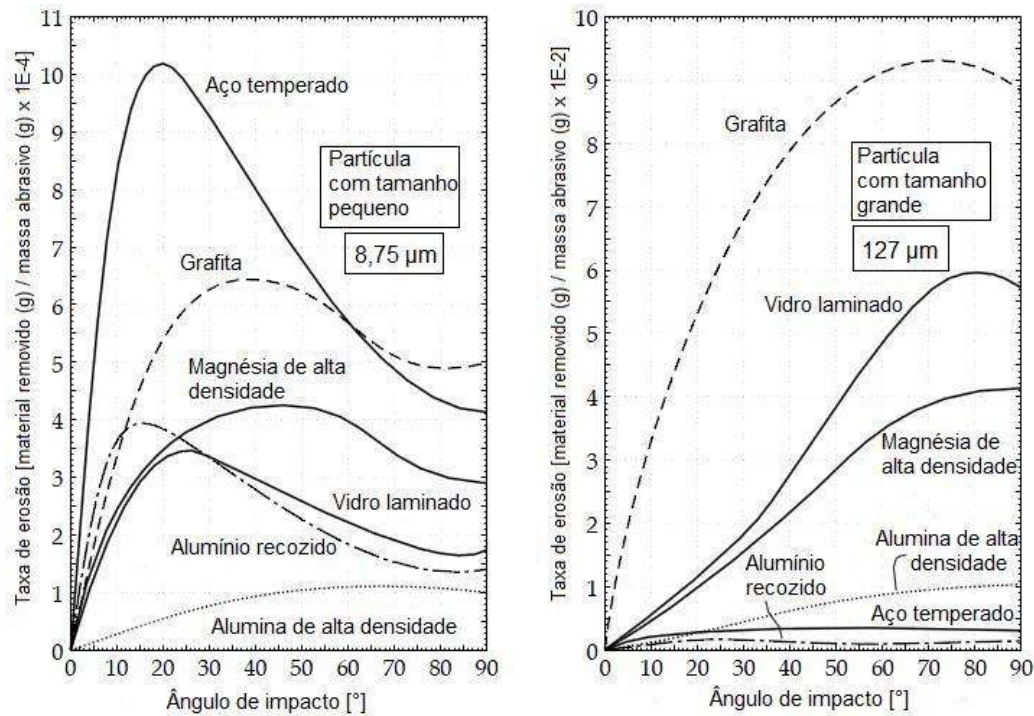


Figura 2.4 - Efeito do tamanho da partícula na taxa de desgaste erosivo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Esta alteração no mecanismo de erosão pode ser atribuída à relação entre o tamanho das partículas e a presença de pequenos defeitos na superfície erodida. A parte do substrato atingida é fortemente deformada, em uma região logo abaixo e com o formato aproximado ao da partícula. Para partículas com tamanhos menores, a área deformada será menor e a erosão ocorrerá predominantemente pelo mecanismo de repetidas deformações plásticas, impulsionada pela ausência de defeitos na região do impacto. O desprendimento de material, em sua maioria, será proveniente das rebarbas que são formadas após a deformação que, encruarão após sucessivos impactos e fatalmente serão arrancadas da superfície. No caso de partículas maiores, a probabilidade de existir um defeito na região deformada pelo impacto é maior, o que favorece a remoção de material pelo mecanismo da formação e propagação de trincas que correm paralelamente à superfície e, ao encontrarem-se entre si ou com a superfície, desprendem uma lasca de material do substrato. Pode-se chamar este de modo frágil de erosão, sendo este mecanismo mais acelerado do que o descrito anteriormente para partículas com uma distribuição de tamanho menor.

2.1.2.2 Dureza das partículas

As propriedades mecânicas das partículas são importantes no desgaste abrasivo, sendo comumente representadas pela dureza. A variação da erosão relativa

com a dureza pode ser observada no gráfico da Figura 2.5. Os ensaios foram realizados em um aço ABNT 1060 temperado, erodido por partículas com durezas variadas (HUTCHINGS, 1992).

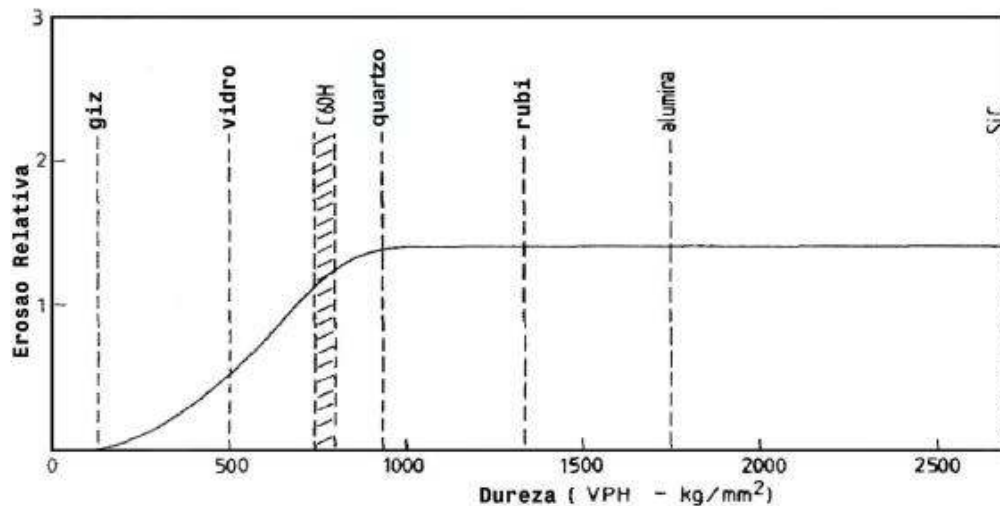


Figura 2.5 - Dependência da taxa de erosão em relação a dureza das partículas, tendo como superfície de ataque um aço endurecido, ensaiado com partículas de vários materiais suspensas em gás (HUTCHINGS, 1992).

Nota-se que para valores de dureza das partículas acima da dureza da superfície erodida o desgaste é bem mais severo do que para os valores menores. Pode-se atribuir isto à presença de micro corte no mecanismo de dano (fator mais acentuado em partículas angulares). A partir de um determinado valor de dureza, a erosão relativa torna-se praticamente constante, pois não ocorre alteração no mecanismo de dano reinante no processo erosivo. Para valores de dureza da superfície maiores que das partículas, a taxa de desgaste torna-se mais sensível ao valor da relação de dureza entre a partícula erodente (abrasivo) “Ha” e a superfície “Hs” (Ha/Hs).

2.1.2.3 Geometria das partículas

A forma das partículas interfere na taxa de desgaste tanto para a erosão por deformação plástica quanto por fratura frágil. Partículas mais arredondadas são menos severas para ambos os casos de erosão, sendo que, quanto mais próximas da forma esférica, menor a taxa de desgaste. Para a erosão por deformação plástica em materiais dúcteis a baixos ângulos de impacto (aproximadamente 20°), esta diminuição na taxa de desgaste é mais acentuada devido ao mecanismo de dano reinante. Neste caso, partículas arredondadas provocam sulcamento e partículas angulares cortam a superfície.

A determinação da angularidade de uma partícula é muito difícil de ser realizada na prática. Um método para esta determinação faz-se a partir da medição do perímetro e da área gerada a partir da projeção bidimensional da partícula (geralmente através de microscópio ótico). Com esses dois valores determina-se o “*roundness factor*”, ou fator de arredondamento “F” (equação 2.3). F é definido como sendo a razão entre a área projetada pela área de um círculo com o mesmo perímetro que a projeção da partícula (HUTCHINGS, 1992).

$$F = 4\pi A / p^2 \quad (\text{equação 2.3})$$

onde:

- F = fator de arredondamento;
- A = área da projeção da partícula;
- p = perímetro da projeção da partícula.

Para uma partícula circular, o fator de arredondamento atinge o valor unitário.

Na erosão com ângulo normal de impacto (90°), ainda por deformação plástica, o desprendimento de material da superfície ocorre somente após sucessivos impactos terem provocado muitos ciclos de deformação plástica. Este processo tende a apresentar uma baixa taxa de erosão. Para o caso extremo de partículas esféricas com ângulo de impacto de 90°, o mecanismo de corte não existe, podendo o mecanismo de dano ser modelado de duas formas: assumindo que o material é arrancado da superfície quando o acúmulo de deformações plásticas atinge um valor crítico ou tratando o problema como fadiga de baixo ciclo provocada por deformações plásticas cíclicas associadas a sucessivos impactos de partículas.

A forma da partícula influencia o padrão da região deformada plasticamente em torno de cada indentação e também a proporção de material deslocada para formar rebarbas. Partículas mais arredondadas tendem a uma menor deformação localizada e um número maior de impactos é necessário para desprender cada fragmento de detritos.

Partículas esféricas apresentam menor dispersão de velocidades e menor dispersão do fluxo após deixar o tubo de aceleração (SHIPWAY e HUTCHINGS, 1994). Este comportamento é atribuído grau de interação entre as partículas, que aumenta conforme diminui o fator de arredondamento “F”.

2.1.3 Propriedade mecânica da superfície erodida

As propriedades mecânicas do material erodido são muito importantes no processo de desgaste, principalmente a dureza, a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade. A dureza é uma propriedade que apresenta boa correlação com o desgaste erosivo, sendo largamente utilizada para caracterizar as propriedades dos materiais envolvidos. Durante o processo erosivo a dureza da superfície erodida sofre alteração em relação ao seu valor inicial devido aos sucessivos impactos que vão encruando a superfície, fazendo com que as propriedades mecânicas não sejam mais as mesmas do que as existentes antes do processo erosivo. Para meios práticos, adotam-se os valores de dureza inicial para caracterizar os materiais envolvidos.

A ilustração da Figura 2.6 apresenta como a variação do módulo de elasticidade do material da superfície exposta ao desgaste age para reduzir ou evitar o desgaste. Para um maior valor do módulo de elasticidade (dureza elevada), ao colidir as partículas irão ricochetear ou quebrar, evitando os mecanismos de deformação plástica e corte e, conseqüentemente o desgaste. Materiais com menor valor do módulo fazem com que a superfície absorva a energia do impacto da partícula através da deformação no regime elástico (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

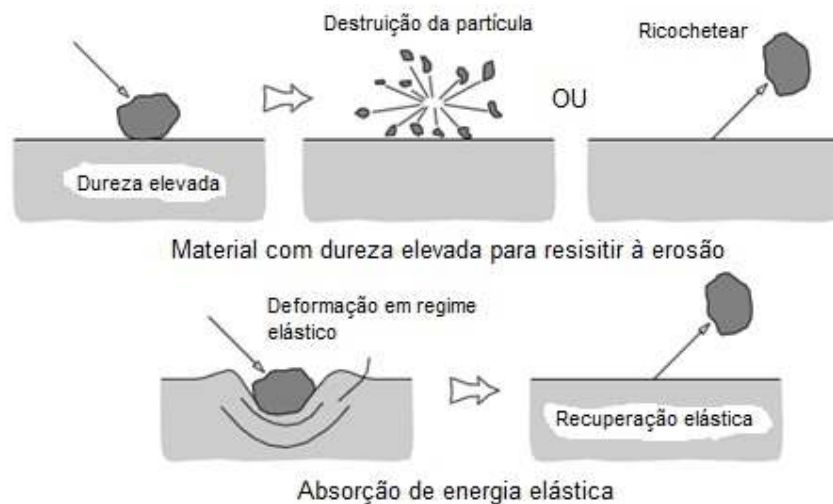


Figura 2.6 - Comparação entre materiais com elevado e reduzido valor do módulo de elasticidade para resistir ao desgaste (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Para o desgaste por deformação plástica pode-se dizer que a taxa de desgaste é inversamente proporcional ao valor da dureza da superfície. O aumento da dureza faz com que o mecanismo de dano passe a ser por fratura frágil, ficando esta alteração mais evidenciada para ângulos mais próximos da normal.

2.1.4 Ângulo de Impacto

O ângulo de impacto é o ângulo formado entre a superfície erodida e a trajetória da partícula imediatamente antes do impacto (HUTCHINGS, 1992), conforme apresentado na Figura 2.7. Este parâmetro do processo erosivo exerce forte influência na taxa de remoção do material, sendo determinante para estabelecer o mecanismo de dano reinante.

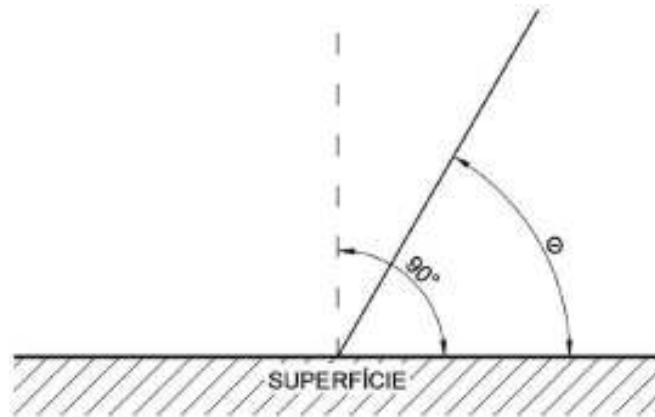


Figura 2.7 - Esquema de medição do ângulo de impacto.

Existe uma relação entre o ângulo de impacto e a dureza das superfícies envolvidas na erosão, sendo os materiais com valores de dureza mais elevados erodidos mais severamente por ângulos próximos a 90° e materiais mais macios por ângulos menores, próximos a 20° . Esta relação pode sofrer variações para alguns materiais, como aços e ligas e deve-se tomar muito cuidado ao empregar os termos dúctil e frágil para a erosão. Outras propriedades como a tenacidade e a ductilidade podem influenciar a taxa de desgaste com maior intensidade do que a dureza, fazendo com que aços com um valor de dureza considerado elevado apresentem as maiores taxas de desgaste para ângulos próximos a 20° .

Materiais considerados frágeis, como cerâmicas, vidros e alguns polímeros geralmente apresentam taxas de desgaste elevadas a ângulos próximos a normal. No entanto, algumas variáveis relacionadas às partículas podem variar o valor do ângulo que apresenta maior taxa de desgaste e o processo de erosão pode passar de frágil para dúctil, conforme Figura 2.8.

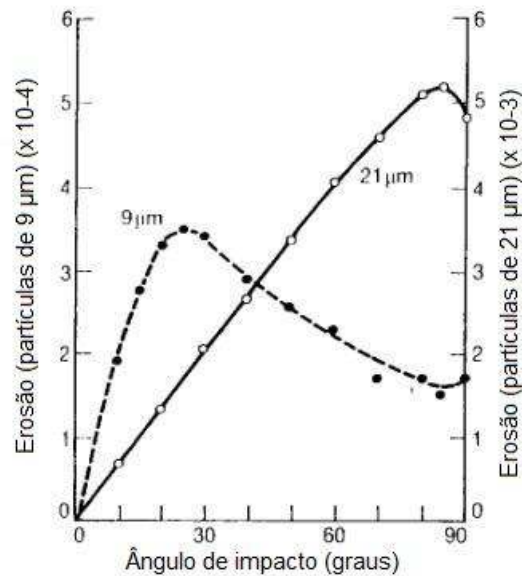


Figura 2.8 - Dependência da taxa de erosão e do ângulo de impacto para partículas de vidro calco-sódico com 9 µm e partículas de carbeto de silício com 21 µm a 136 m/s (HUTCHINGS, 1992).

Este comportamento pode ser atribuído ao fato da fratura ocorrer somente após a indentação provocada pelo impacto da partícula atingir um tamanho superior a um certo limiar. O tamanho da indentação é determinado pelo tamanho da partícula e pela velocidade de impacto e, ao reduzir o tamanho da partícula, é possível afirmar que o comportamento erosivo mantém-se plástico e o desgaste é similar ao de uma superfície dúctil.

Os gráficos da Figura 2.9 apresentam a variação da taxa de erosão com o ângulo de impacto para materiais com comportamento mecânico dúctil e frágil. Nota-se que os materiais dúcteis apresentam maiores taxas de desgaste para ângulos menores (pico em torno de 20° aproximadamente), já os materiais frágeis para ângulos próximos a 90°.

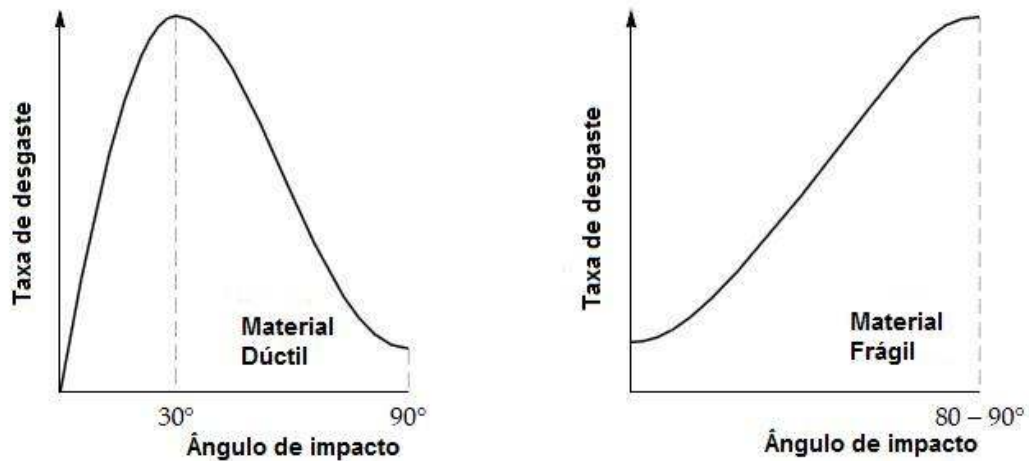


Figura 2.9 - Representação esquemática de efeito do ângulo de impacto nas taxas de desgaste de materiais com comportamento dúctil e frágil (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Para baixos valores de ângulo de impacto podem ser observados basicamente dois mecanismos de dano; o de corte, assemelhando-se muito ao desgaste por abrasão a dois corpos, e o de deformação plástica. Essa variação no mecanismo ocorre devido à forma e orientação das partículas. Partículas arredondadas tendem a formar um sulco na superfície após o impacto, arrancando material na forma de detritos após sucessivos impactos terem atingido as rebarbas (abas) formadas nas extremidades dos sulcos, as quais são endurecidas e fragilizadas pelos impactos.

Partículas angulares colidindo contra a superfície a baixos ângulos de impacto provocam desgaste pelo mecanismo de corte, podendo apresentar variações conforme a orientação e sentido de rotação da partícula. Se a mesma rotacionar no sentido a favorável ao da direção de impacto, provocará uma indentação na superfície, formando uma aba com material deslocado da cavidade (ou rebarba), que ficará vulnerável a impactos subseqüentes sendo posteriormente arrancada após certo número de impactos. O aspecto da superfície após ser submetida a este mecanismo de dano pode ser observado na Figura 2.10(b).

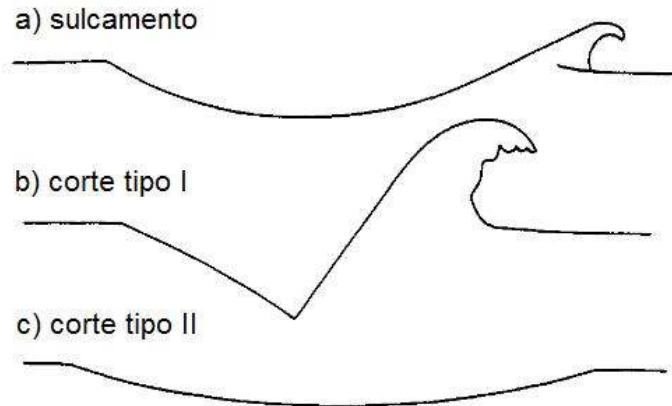


Figura 2.10 - Seções de áreas impactadas por partículas duras em um metal dúctil, mostrando as formas típicas. A direção do impacto é da esquerda para a direita. (a) Sulcamento formado por partícula esférica; (b) Corte tipo I provocado por partícula angular rotacionando no sentido a favor da direção de impacto; (c) corte tipo II provocado por partícula angular rotacionando no sentido contrário à direção de impacto (HUTCHINGS, 1992).

Caso a partícula rotacione em sentido contrário à direção de impacto, a superfície será cortada por um processo semelhante ao de usinagem, sendo o material arrancado da superfície. O aspecto de uma superfície erodida por este mecanismo está apresentado na Figura 2.10(c). Este tipo de mecanismo de dano ocorre apenas em uma pequena faixa de geometrias de partículas e orientações de impacto (HUTCHINGS, 1992).

Para ângulos de impacto próximos a normal, o mecanismo de corte praticamente não está presente e o desgaste erosivo pode ser atribuído a sucessivas deformações plásticas, podendo algumas vezes agir como um processo de fadiga de baixo ciclo. Os materiais com comportamento frágil apresentam taxas de desgaste mais elevadas para estas condições de impacto e o material é arrancado da superfície em lascas, formadas pela união de trincas entre si ou com a superfície.

2.1.5 Fluxo de Partículas

O fluxo de partículas, determinado pela massa em função do tempo, é um fator de grande influência na taxa de desgaste por erosão. Teoricamente, todas as partículas atingem a amostra com a mesma velocidade e ângulo de impacto, porém na prática isto não ocorre (KRISBNAMOORTHY *et. al.*, 1993) (ANAND, 1987). O aumento no fluxo de partículas provoca aumento na interação entre as partículas e, para ângulos de impacto próximos a 90° , pode ocorrer a formação de uma espécie de escudo (*shielding*), formado por partículas que rebatem da amostra, diminuindo a eficiência no desgaste (SHIPWAY e HUTCHINGS, 1994). As fotografias apresentadas

na Figura 2.11 mostram como a dispersão do fluxo após sair do tubo de aceleração e a trajetória de algumas partículas após rebaterem na amostra.

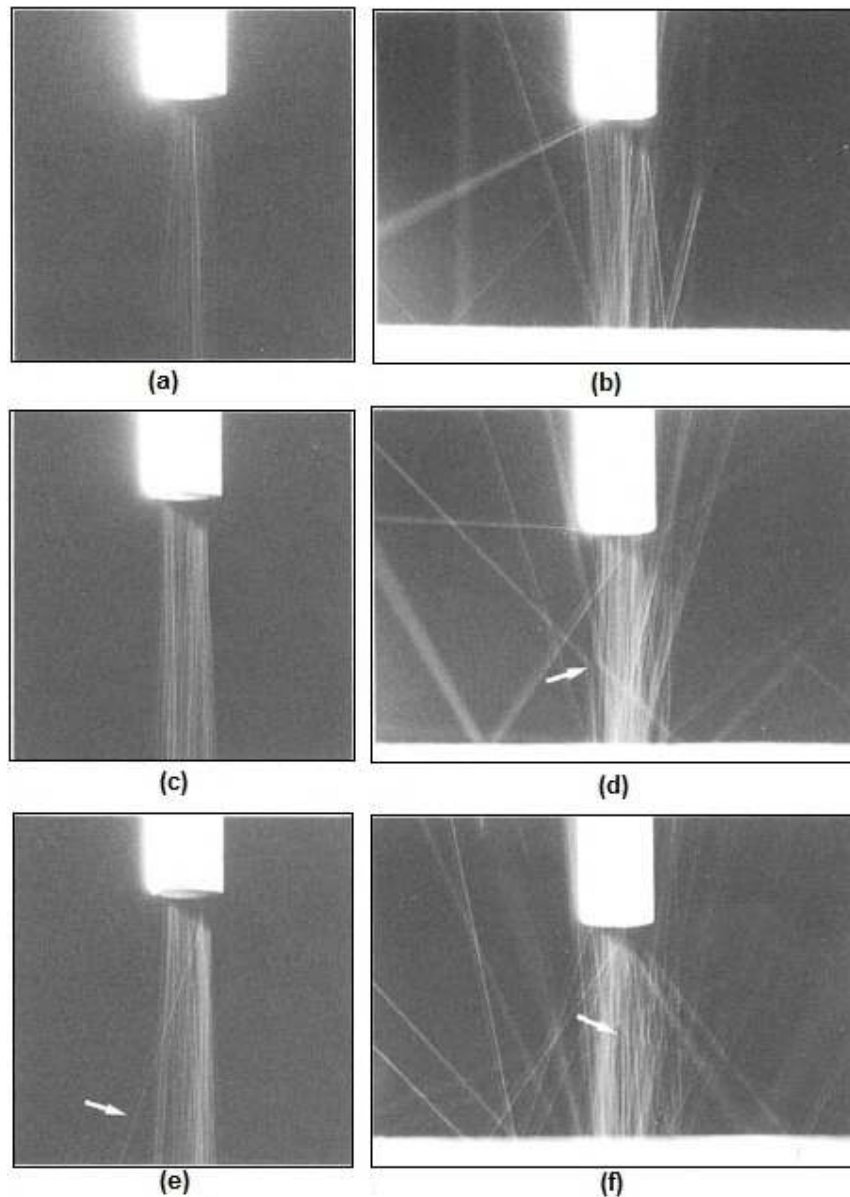


Figura 2.11 – Fotografias de trajetórias de partículas esféricas (650 – 750 μm de tamanho médio) saindo do tubo de aceleração (diâmetro externo de 6,35 mm). Fluxo de partículas: (a), (b) $2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; (c), (d) $9,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; (e), (f) $26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. As fotografias (a), (c) e (e) mostra as trajetórias sem amostra; as fotografias (b), (d) e (f) as partículas colidem com uma amostra, posicionada a 20 mm do tubo, com ângulo de impacto de 90° (SHIPWAY e HUTCHINGS, 1994).

O aumento no fluxo de partículas pode provocar turbulência no fluxo (ar mais partículas), causado principalmente pela interação entre as partículas erodentes e entre estas com as paredes internas do tubo de aceleração (SHIPWAY e

HUTCHINGS, 1994). Esta turbulência faz com que ocorra maior dispersão das partículas ao sair do tubo de aceleração, fazendo com que impactos ocorram com ângulos diferentes ao da direção do fluxo, conforme apresentado na Figura 2.12.

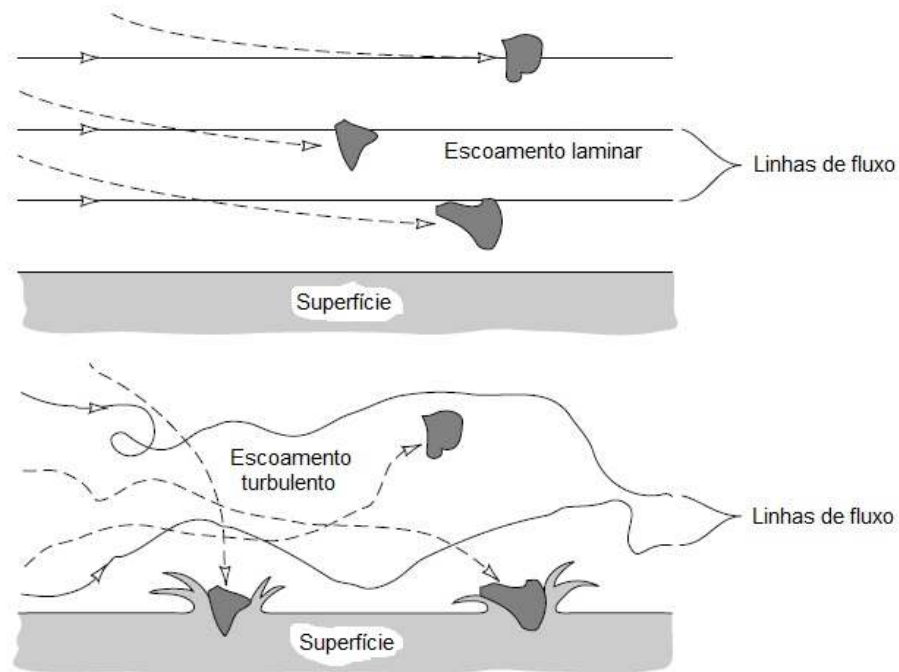


Figura 2.12 - Efeito do escoamento do fluxo no desgaste erosivo (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

2.1.6 Mecanismos de desgaste

A Figura 2.13 ilustra alguns dos mecanismos de dano presentes no processo erosivo, variando-se o ângulo de impacto, a velocidade da partícula e a dureza da superfície.

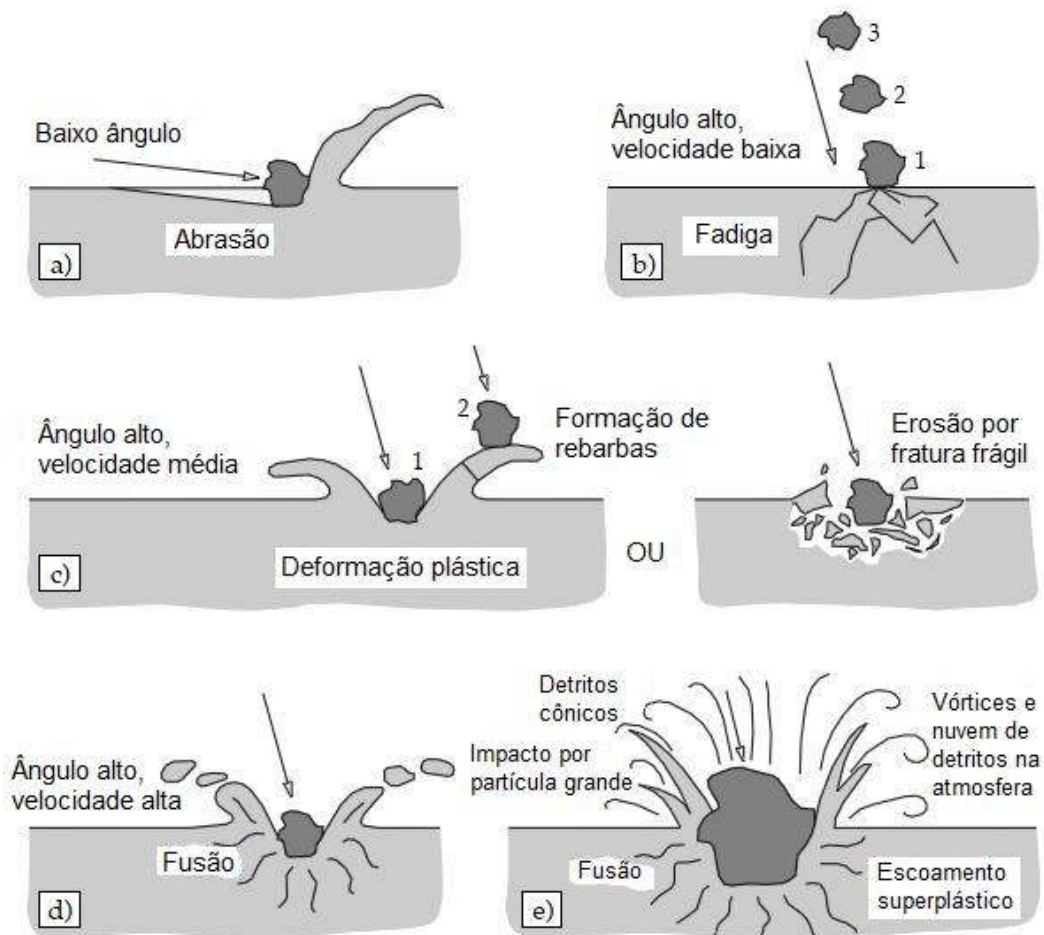


Figura 2.13 - Mecanismos de erosão; (a) erosão a baixo ângulo de impacto; (b) Fadiga superficial durante impacto a baixa velocidade e alto ângulo; (c) Deformação plástica ou fratura frágil a velocidade média e alto ângulo de impacto; (d) Fusão superficial a altas velocidades de impacto; (e) Erosão macroscópica com efeitos secundários (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

A Figura 2.13(a) apresenta uma ilustração do mecanismo de dano provocado por uma partícula angular impactando a um baixo ângulo contra a superfície. Nota-se que a partícula arranca material da superfície por um mecanismo que se assemelha ao corte, deixando rebarbas (ou abas) que podem ser arrancadas pela própria partícula ou por impactos subseqüentes, dependendo do sentido em que a partícula está rotacionando em torno do próprio eixo, conforme explicado anteriormente. Este mecanismo ocorre preferencialmente em superfícies com baixo valor de dureza. A Figura 2.13(b) apresenta o mecanismo de dano de fadiga de baixo ciclo, provocada por superfícies com um valor mais elevado de dureza sofrendo impacto com ângulos próximos à normal com baixa velocidade. Superfícies com maior dureza apresentam menor capacidade de absorver a energia do impacto das partículas por deformação elástica ou plástica, sendo a tensão gerada pelo impacto aliviada através da formação

de trincas subsuperficiais, conforme mostra a ilustração. Como o valor da energia fornecida pela partícula não é elevado, devido a baixa velocidade de impacto, as trincas necessitam de alguns ciclos de impacto até se encontrarem ou aflorarem à superfície e, somente então, serão desprendidas lascas de material, provocando o desgaste.

A Figura 2.13(c) apresenta uma comparação entre duas superfícies com propriedades mecânicas diferentes sendo erodidas sob as mesmas condições. A superfície da esquerda possui baixo valor de dureza superficial e pode ser notada a formação de rebarbas provocadas por deformação plástica na região do impacto. As partículas numeradas explicam como ocorre o arrancamento de material da superfície. A partícula 1 forma as rebarbas que serão arrancadas por impactos posteriores de outras partículas, no caso representadas pela partícula número 2. Normalmente são necessários vários impactos sobre as rebarbas até que haja o desprendimento das mesmas, pois este somente ocorrerá após o material da região da rebarba ser encruado. A ilustração da direita representa o mecanismo de dano para uma superfície com alto valor de dureza. O dano ocorre por fratura frágil, assemelhando-se ao mecanismo observado na Figura 2.13(b), porém neste caso a velocidade da partícula é mais elevada, aumentando o valor da energia fornecida pelo impacto, podendo ocorrer o desprendimento de material da superfície pelo encontro das trincas formadas, conforme ilustra a figura. No caso da Figura 2.13(d), o mecanismo de dano é semelhante ao apresentado na Figura 2.13(c) (ilustração da esquerda), porém como neste caso a energia fornecida pela partícula é maior devido ao aumento na velocidade de impacto, pode ser notada a fusão de material na região do impacto. Nota-se a formação de rebarbas e o desprendimento de uma porção de material ainda fundido das rebarbas, causando desgaste em apenas um impacto.

A Figura 2.13(e) ilustra o caso em que uma partícula de grandes dimensões impacta uma superfície. Devido ao tamanho da partícula, a energia fornecida pelo impacto é elevada e pode ser notada uma região deformada a uma taxa e carga elevadas, deformando superplasticamente a região. Nota-se também uma região em que houve fusão de material. As rebarbas formadas apresentam um formato cônico, devido ao tamanho da partícula (elevada energia fornecida à superfície) e ao fato do material sofrer fusão, motivo esse também responsável pela formação de uma nuvem de detritos provenientes de material fundido na região do impacto. Esta condição de erosão insere tensões residuais na região do impacto, uma vez que ocorre fusão de material e um volume considerável de material sofre escoamento superplástico.

Os mecanismos de desgaste reinantes no processo erosivo podem ser observados através da morfologia das superfícies após a erosão. A Figura 2.14 apresenta fotografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras de aço baixo carbono (AISI 1015), erodidas a ângulos de impacto de 10, 20, 30, 60 e 90 graus. As partículas erodentes são constituídas por cinzas provenientes da queima de bagaço e possui como elemento mais abrangente o óxido de silício (SiO_2). As partículas apresentam distribuição de tamanho médio entre 80 e 250 μm e foram aceleradas a uma velocidade de 20 m/s antes do impacto (ZHANG *et. al.*, 2001).

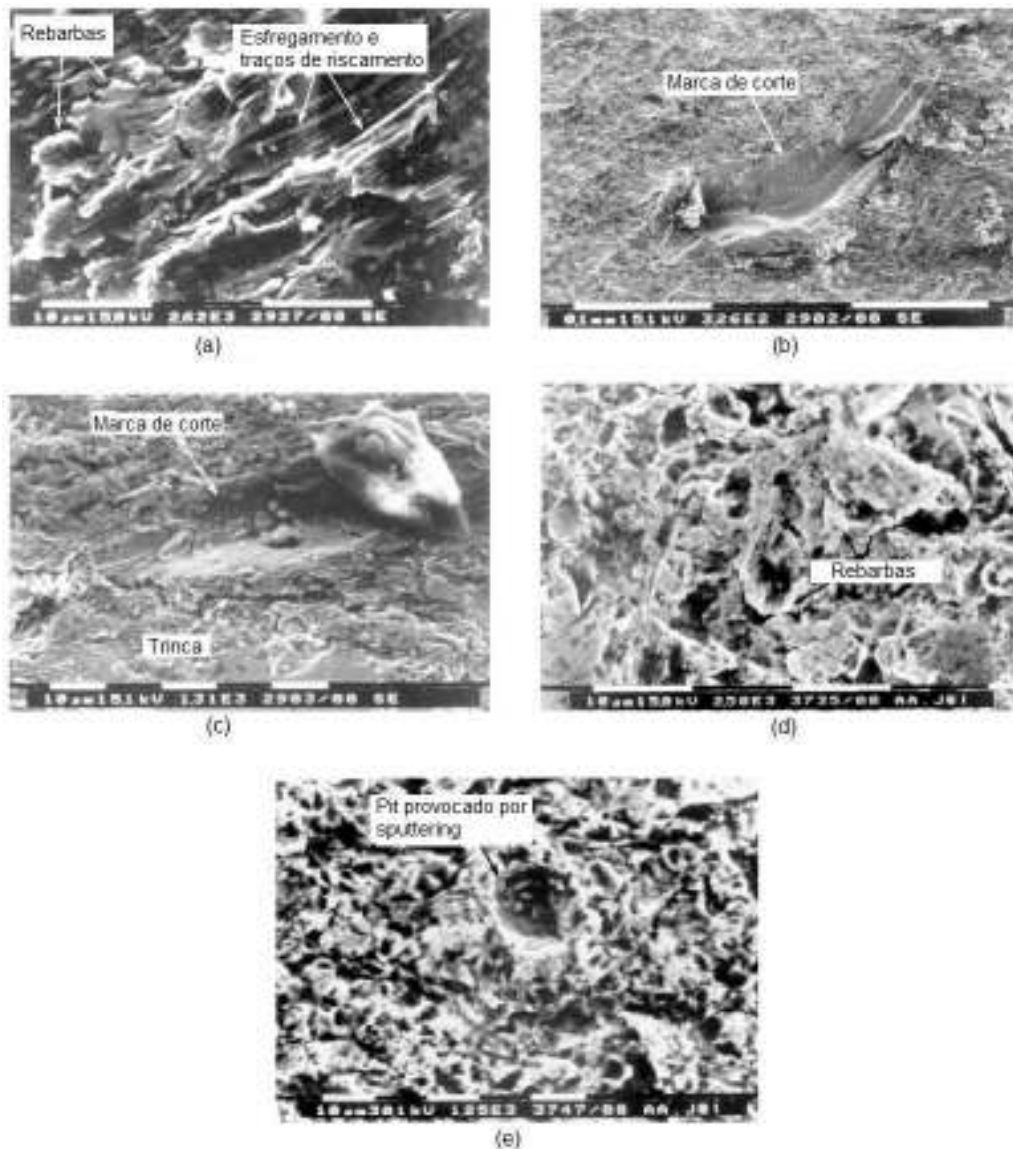


Figura 2.14 - Fotografias obtidas por MEV de superfícies erodidas com ângulos de impacto de (a) 10°, (b) 20°, (c) 30°, (d) 60°, (e) 90°. Condições de impacto: velocidade 20 m/s e tempo de 5 min (ZHANG *et. al.*, 2001).

A Figura 2.14(a) apresenta a fotografia de uma amostra erodida com ângulo de impacto de 10°. Pode-se notar marcas de esfregamento e ranhuras na superfície, bem como a presença de rebarbas originadas por deformação plástica de material. O mecanismo de dano presente neste caso é muito semelhante ao de abrasão a dois corpos, sendo a componente tangencial da força de impacto a principal responsável pelo desgaste. A taxa de desgaste para estas condições é relativamente baixa. Para ângulos de impacto de 20 e 30 graus (Figura 2.14(b) e (c), respectivamente), o mecanismo de corte torna-se o responsável pelo arrancamento de material da superfície. A componente normal da força de impacto aumenta e as partículas penetram na superfície e, como a força tangencial ainda é forte o suficiente, ocorre o corte de lascas de material. Marcas de corte e trincas paralelas ao sentido do impacto das partículas são notadas para estas condições de ensaio.

Para o ângulo de impacto de 60 graus (Figura 2.14 d), o mecanismo de dano de corte já não é mais notado e a deformação plástica prevalece como principal agente no desgaste. O mecanismo presente para estas condições é muito semelhante ao ilustrado na Figura 2.9(c), com a formação de rebarbas na região do impacto. A Figura 2.14(e) apresenta a fotografia da superfície erodida com ângulo normal de impacto. Neste caso, como no anterior, o mecanismo de dano reinante é por deformação plástica, porém pode-se notar que os pits formados pela indentação das partículas são mais profundos e um novo mecanismo de dano é notado, o *sputtering* (ZHANG *et. al.*, 2001). O desgaste por *sputtering* ocorre quando trincas sub-superficiais (paralelas à superfície), formadas pelo alívio da tensão residual presente no material após os impactos, fragilizam uma quantidade de material (ZHANG *et. al.*, 2001). Ao chocar-se com esta região fragilizada, a partícula adere ao material e, ao desprender-se da superfície, carrega consigo o material aderido, provocando desgaste.

2.2 EMISSÃO ACÚSTICA

O fenômeno da emissão acústica pode ser descrito basicamente como uma transformação de energia, que pode ser química, mecânica ou elétrica, em ondas mecânicas (energia sonora) (JAQUES, 2009). Através do conhecimento e aplicação deste fenômeno surgiu a técnica de ensaio não destrutivo denominada emissão acústica (EA). Esta técnica pode ser aplicada sem a necessidade de inserir modificações físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais no material, tendo como um dos principais objetivos detectar, avaliar e interpretar discontinuidades em amostras, componentes mecânicos ou equipamentos (TIBONI *et. al.*, 2009).

Em contraste com a maioria dos métodos de END os sinais detectados de EA são gerados pelo objeto em teste, mediante a aplicação de um estímulo, conforme a Figura 2.15, detectando-se as discontinuidades durante o processo de degradação da integridade da estrutura (MILLER e MCINTIRE, 1987).

O princípio da técnica de EA está no fato de que o crescimento de discontinuidades, causadas por um campo localizado de tensões, libera ondas elásticas transientes, de natureza mecânica, que viajam pelo material e são capturadas pelos sensores (transdutores), que transformam esta oscilação mecânica em um sinal elétrico, que é amplificado e parametrizado pelo sistema de EA (SOARES e MOURA, 2007). A Figura 2.15 ilustra o princípio de funcionamento da técnica.

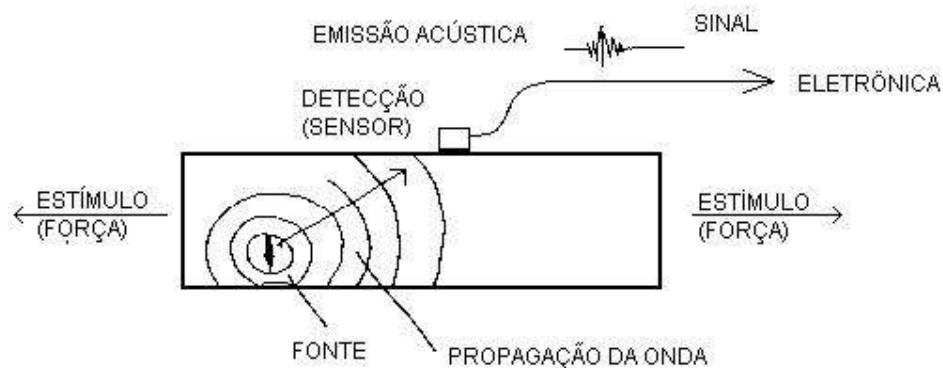


Figura 2.15 - Princípio de detecção de falhas por EA (SOARES e MOURA, 2007).

Conforme ilustrado na Figura 2.15 a fonte de EA emite a onda mecânica em todas as direções, caracterizando o sinal de emissão acústica como uma frente de onda de forma esférica, podendo estabelecer uma analogia com a propagação das ondas ultra-sônicas (KRAUTKRAMER, 1997). A forma esférica das ondas de emissão acústica permite que sensores sejam posicionados em arranjos regulares na estrutura para a detecção de sinais de EA, sendo esta característica o maior contraste exibido quando se compara o método de ensaio por emissão acústica com os demais métodos de END (SOARES, 2008).

A inspeção por EA é um método global, em outras palavras, pode ser realizada simultaneamente por toda a amostra (em oposição à inspeção por ultra-som, por exemplo, que é caracterizada como pontual) e pode ser aplicada sobre uma ampla variedade de estruturas, tais como: tanques de armazenamento, tubulações, vasos de pressão, transformadores de potência, entre outros. Esta técnica é também aplicável

em uma ampla variedade de materiais e espessuras à temperatura ambiente ou altas temperaturas (TIBONI *et. al.*, 2009).

2.2.1 Fontes de emissão acústica

Partindo do princípio que qualquer sinal sonoro (proveniente de ondas mecânicas) é considerado como emissão acústica, as fontes de EA podem ser diversas, como abalos sísmicos, passagem de fluidos por orifícios (vozes, sons animais, vazamentos), impacto de objetos, arcos e descargas elétricas e até transformações de fase em materiais. Porém, a atual aplicação da técnica é restrita a uma determinada gama destas ondas mecânicas, relativas à manutenção de equipamentos, estudo de vida útil de estruturas e prevenção de desastres geológicos.

A emissão acústica pode ser gerada pelo vazamento de fluidos em vasos de pressão e tubulações; por fenômenos que envolvem deformação como escoamento (MOORTHY *et. al.*, 1995), maclagem (VALLEN, 2010) e crescimento de trincas (em metais, madeira (LANDIS e WHITTAKER, 2000) e concreto (LANDIS e BAILLON, 2002)); pelo aparecimento de trincas em revestimentos e também pelo descolamento entre o substrato e filmes superficiais (PIOTRKOWSKI *et. al.*, 2004). A corrosão em fundos de tanques também pode gerar emissão acústica, através do desprendimento da camada de óxido e formação de bolhas de gás (VALLEN, 2010).

RUZZANTE (1998) divide as fontes de EA em dois grupos, o primeiro envolvendo apenas os fenômenos microestruturais e o segundo todos os fenômenos que não estão relacionados com a microestrutura do material (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Classificação de fontes de EA (RUZZANTE, 1998).

| Fontes de EA | |
|---|---|
| Grupo I | Grupo II |
| Movimento das paredes dos domínios magnéticos | Perdas de gases ou líquidos |
| Multiplicação e movimento de discordâncias | Processos de soldagem |
| Transformações martensíticas | Desgaste de rolamentos |
| Decoação de precipitados | Detecção de peças soltas |
| Crescimento e propagação de trincas | Detecção de descargas parciais em transformadores de potência |
| Processos de corrosão | |

2.2.2 Propagação de ondas mecânicas

Quando um átomo ou molécula é deslocado da sua posição de equilíbrio por uma força, tensões internas agem de modo a restaurar as partículas às suas posições originais. Devido às forças interatômicas entre partículas adjacentes de material, o deslocamento de um ponto induz deslocamentos nos pontos vizinhos, propagando assim uma onda elástica (ASM METALS HANDBOOK, 1989). Assumindo que o meio em estudo é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem são rigidamente ligadas mas podem oscilar em qualquer direção, pode-se então classificar as ondas acústicas em quatro tipos:

a. Ondas longitudinais (ondas de compressão)

São ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda, deslocando no material como uma série de compressões e rarefações (Figura 2.16) (ANDREUCCI, 2006). Estas ondas podem propagar em sólidos, líquidos e gases.

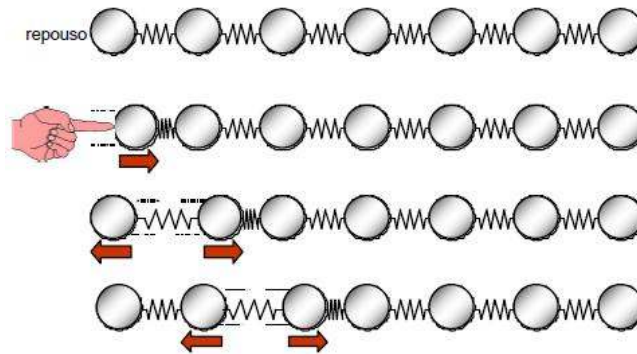


Figura 2.16 - Ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2006).

Dentre os tipos de onda aqui analisados, as longitudinais são as mais velozes.

b. Ondas transversais (ondas de cisalhamento)

Uma onda transversal é notada quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao sentido de propagação (ANDREUCCI, 2006). Neste caso, os planos de partículas mantêm-se na mesma distância entre si, movendo-se apenas verticalmente, conforme ilustrado na Figura 2.17.

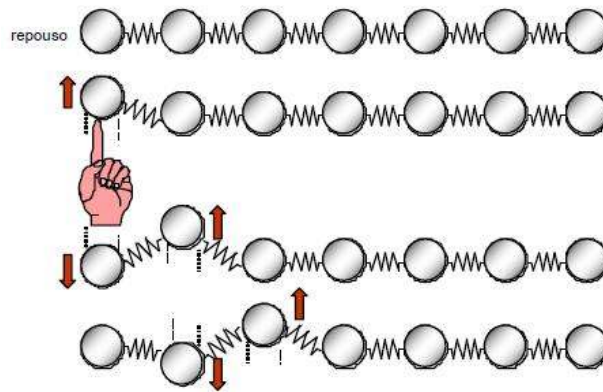


Figura 2.17 - Ondas transversais (ANDREUCCI, 2006).

Este tipo de onda mecânica não se propaga em líquidos e gases, e a sua velocidade é aproximadamente 50 a 60% da velocidade das ondas longitudinais.

c. Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh

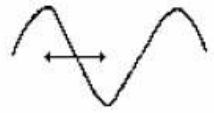
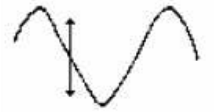
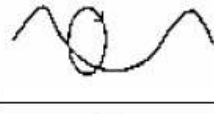
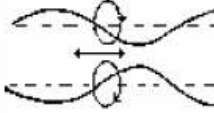
São assim chamadas por propagar na superfície dos sólidos. Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é aproximadamente 10% inferior à de uma onda transversal.

d. Ondas de Lamb

São ondas que percorrem chapas muito finas de material, tipicamente na ordem de alguns comprimentos de onda. As condições de propagação deste tipo de onda dependem de características do material, como densidade, propriedades elásticas e espessura (ANDREUCCI, 2006).

A Tabela 2.3 apresenta um resumo com os tipos de onda e as velocidades relativas de propagação.

Tabela 2.3 - Velocidades relativas de propagação das ondas mecânicas (KRAUTKRAMER, 1977).

| Movimento da partícula | Direção de propagação | Tipo de onda | Velocidade relativa |
|---|-----------------------|---|-------------------------------------|
|  | → | Longitudinal | Rápida $V_L = 1$ |
|  | → | Transversal | Lenta $V_S \approx 0,6 V_L$ |
|  | → | Superficial ou Rayleigh | Mais lenta $V_R \approx 0,5 V_L$ |
|  | → | Ondas guiadas de Lamb ou chapa Simétricas ou assimétricas | Fase e grupos de velocidade variam |

2.2.3 Sensor de emissão acústica

O sensor mais comumente utilizado em ensaios de emissão acústica é do tipo piezoelétrico. O material piezoelétrico é montado entre duas placas metálicas que suportam a tensão e atuam como eletrodos. Se nenhuma tensão é aplicada as cargas positivas e negativas têm a mesma magnitude e não existe nenhum momento de dipolo molecular (polarização zero). Ao aplicar uma tensão, uma distribuição não simétrica das cargas é notada, gerando um momento de dipolo. Isso causa um acúmulo de carga nos eletrodos e a uma diferença de potencial entre estes (CHEEKE, 2002). Assim, a propagação de uma onda mecânica (onda sonora) na superfície do material gera uma diferença de potencial no sensor piezoelétrico que é transferida para o sistema de aquisição. A Figura 2.18 apresenta o corte de um sensor de EA.

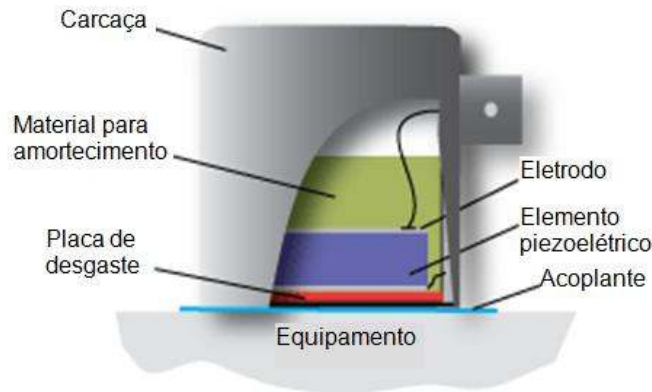


Figura 2.18 - Esquema de um sensor de emissão acústica (FILIPPIN *et. al.*, 2009).

Os sensores piezoelétricos podem ser encontrados na forma de transdutores ressonantes em uma determinada faixa de frequência ou de banda larga. Os sensores de banda larga ressonam, ou seja, apresentam resposta em tensão em uma larga faixa de frequências, tipicamente entre 100 e 900 kHz. Em geral, este tipo de sensor possui menor sensibilidade quando comparado aos ressonantes. Os sensores ressonantes detectam, com boa resposta em tensão, apenas uma faixa restrita de frequências no entorno da máxima resposta nominal do sensor (150 kHz – valor mais comum encontrado para este tipo de sensor) (PACNDT, 2011). A Figura 2.19 apresenta curvas de calibração para um sensor de banda larga (a) e um ressonante em 150 kHz (b).

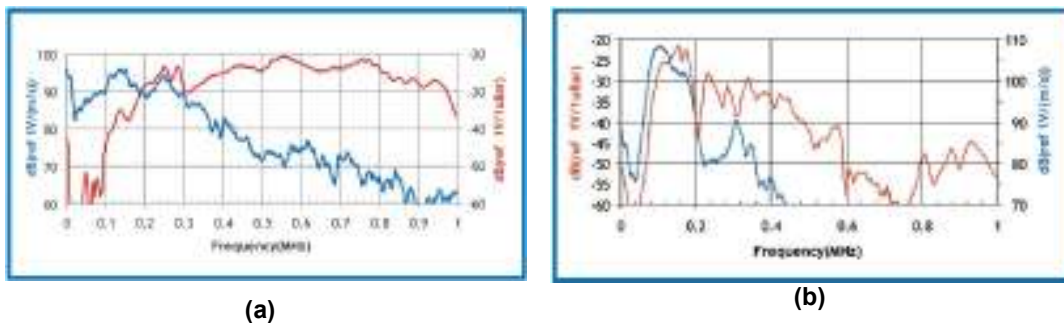


Figura 2.19 - Curvas de calibração para sensor de banda larga (a) e ressonante em 150 kHz (b) (PACNDT, 2011).

As curvas de calibração foram fornecidas pelo fabricante, realizadas conforme ASTM E1106 (2007) - curva azul e ASTM E976 (2008) - curva vermelha (PACNDT, 2011).

Os sensores de EA podem ter um pré-amplificador integrado. O sinal é amplificado logo após o sensor para evitar que seja atenuado ao longo do cabo de transmissão do sinal ou mascarado pelo ruído provocado pelo próprio sistema de EA

(placa de aquisição, conectores BNC e cabo de transmissão). Os pré-amplificadores mais utilizados fornecem um ganho de 100 vezes (ou 40 dB).

2.2.4 Detecção e parametrização do sinal de EA

Após ser percebido pelo sensor e amplificado, o sinal é direcionado à placa de aquisição de sinais de EA onde é novamente amplificado e filtrado. Isso é realizado por circuitos comparadores que geram uma saída digital cada vez que o sinal de EA excede uma tensão selecionada como limiar (*threshold*) (JAQUES, 2009). O evento acústico é então condicionado e direcionado para os circuitos de filtros escolhidos pelo usuário. O sinal filtrado é digitalizado a taxas de até 10 MHz por um módulo conversor analógico/digital (A/D) de 16 bits. Após ser digitalizado, o sinal passa por um circuito onde são formados os sinais de EA (denominados *hits de EA*) e extraídos os parâmetros (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

Os *hits* de EA e sua parametrização são determinados com base em parâmetros de tempo determinados pelo usuário do sistema. Neste caso, serão citadas as configurações utilizadas no sistema de emissão acústica modelo DISP da Physical Acoustics Corporation (utilizado nos ensaios em laboratório) (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005). O *Peak Definition Time* (PDT) é o intervalo de tempo utilizado para a determinação do pico de amplitude do sinal de EA. O PDT é ativado quando o primeiro sinal cruza o limiar e inicia a contagem regressiva até zero (a partir do valor de tempo estabelecido pelo usuário), a menos que um valor maior de tensão (amplitude) seja registrado e, neste caso, inicia-se novamente a contagem regressiva de tempo. O *Hit Definition Time* (HDT) é utilizado para determinar o final do *hit*, finalizar os processos de medição e armazenar os atributos do sinal. O HDT é ativado após a definição do pico de amplitude e é reativado cada vez que o sinal ultrapassa o limiar. Quando o sinal não cruzar o limiar até o tempo estabelecido pelo HDT, o sistema determina o final do *hit*. O *Hit Lockout Time* (HLT) tem como função evitar a aquisição de ecos produzidos pelas ondas acústicas e, conseqüentemente, aumentar a taxa de aquisição dos dados. Durante o tempo pelo HLT o sistema de EA não coleta dados. A Figura 2.20 apresenta um *hit* de EA com os parâmetros de tempo (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

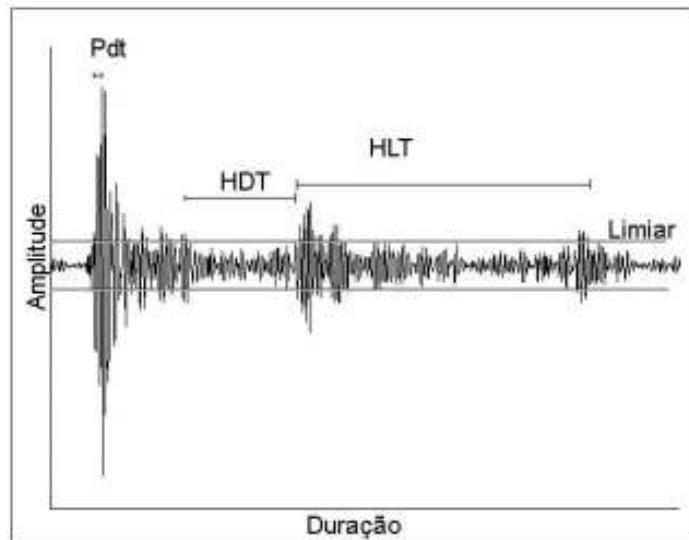


Figura 2.20 - Parâmetros de tempo utilizados para formação e parametrização dos *hits* de EA (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

2.2.5 Parâmetros de sinal de EA

A Figura 2.21 apresenta um sinal transiente típico de EA, indicando os principais parâmetros retirados da onda. Nota-se que os parâmetros são todos referenciados no limiar de referência (*threshold*), que funciona basicamente como um filtro passa alta de tensão, com exceção à amplitude, que é referenciada em zero Volt. Será apresentada uma breve revisão dos principais parâmetros de EA.



Figura 2.21 - Parâmetros de um sinal de EA (TIBONI, *et. al.*, 2009).

Amplitude: é o maior pico de tensão atingido pelo sinal de EA e está relacionado à magnitude da fonte do evento. Este parâmetro é expresso em decibéis (dB), conforme apresentado na equação 2.4, tem resolução de 1 dB e faixa de medição de 0 a 100 dB (sistema PAC).

$$Amp = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{\max}}{1\mu V}\right) - (\text{ganho_do_pré_amplificador}) \quad (\text{equação 2.4})$$

2.4)

onde Amp é a amplitude em dB e V_{\max} é a tensão máxima gravada para a onda. O ganho do pré-amplificador deve ser informado pelo usuário ao sistema de EA (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

Contagem: é o número de vezes que o sinal cruzou o limiar de referência (*threshold*). Este parâmetro depende da magnitude da fonte do evento e das propriedades acústicas e natureza reverberante do material e do sensor. É expresso em número de contagens, tem resolução unitária e faixa de medição de 1 a 65535 contagens (sistema PAC) (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

Energia de EA: chamada de MARSE (*Measured Area of the Rectified Signal Envelope*) é a área medida abaixo da envoltória do sinal retificado, representada pela área azul no gráfico da Figura 2.21. Este parâmetro é sensível a amplitude e a duração do sinal.

Duração: é o intervalo de tempo entre a primeira e última vez que o sinal ultrapassa o limiar. Este parâmetro é dependente dos mesmos fatores que o parâmetro contagem. Duração é expressa em microsegundos, com resolução de 1 μ s e faixa de medição de 0 a 65535 μ s (sistema PAC) (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

RMS (*Root Mean Square*): é a raiz média quadrática dos picos de tensão do sinal dentro de determinado intervalo de tempo, independente do hit de EA. Parâmetro muito sensível para detectar pequenas variações em um sinal constante (ruído). É expresso em milivolts, possui resolução de 0,15 mV e faixa de medição de 0 a 6 V (sistema PAC) (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

Tempo de subida: é o intervalo de tempo entre a primeira vez que o sinal cruza o limiar de referência e o momento em que o pico de amplitude é atingido. O tempo de subida é expresso em microsegundos, com resolução de 1 μ s (PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION, 2005).

2.2.6 Aplicações de emissão acústica em Tribologia

A técnica de EA pode ser utilizada com uma eficiente ferramenta *online* para monitorar aspectos tribológicos, tais como taxa de desgaste (RAVINDRA *et. al.*, 1997) e propagação de falhas em materiais (LI e LI, 1995). No desgaste erosivo, especificamente, a literatura mostra que os parâmetros RMS e energia de EA são

possíveis de ser correlacionados com o tipo de mecanismo de remoção de material. Isto é, quando o mecanismo de dano da fratura altera de intergranular para a transgranular (MOMBER *et. al.*, 1999), ou quando muda do processo de raspagem para fratura (ZHANG *et. al.*, 2001), são percebidas alterações nos sinais de EA coletados.

O parâmetro de energia de EA apresenta uma boa correlação com a quantidade de material removido (TIBONI *et. al.*, 2009) e com o mecanismo de dano envolvido no processo erosivo (ZHANG *et. al.*, 2001). O gráfico da Figura 2.22 apresenta a variação dos valores de energia de EA com o ângulo de impacto para um material dúctil erodido por partículas angulares. Baseado em análises morfológicas das amostras, foram estabelecidos os principais mecanismos de dano em função do ângulo de impacto. Estes foram correlacionados com sinais de EA, no caso com o parâmetro energia de EA (ZHANG *et. al.*, 2001).

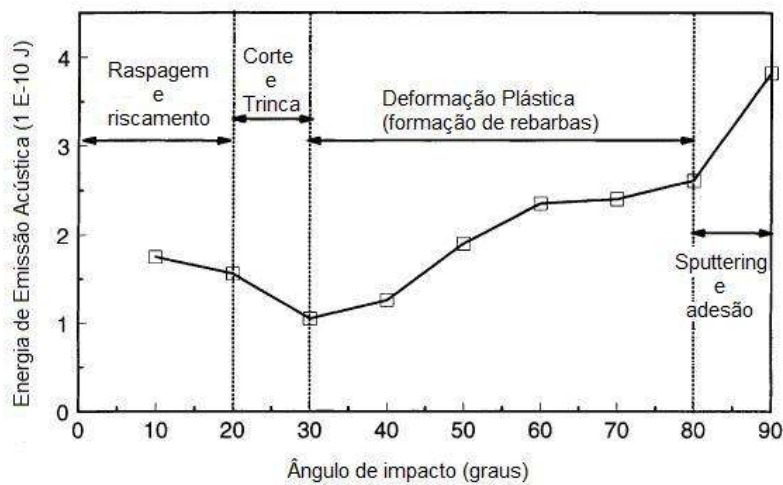


Figura 2.22 - Variação da energia de EA em função do ângulo de impacto para amostras de aço baixo carbono erodidas por partículas angulares com velocidade de 20m/s (ZHANG *et. al.*, 2001).

MOMBER *et. al.*, (1999) avaliaram a evolução da energia acústica dos sinais de EA devido ao impacto de partículas de vidro, aceleradas por fluido no estado líquido (água), em termos da energia cinética destas partículas, a partir de três ângulos de incidência (Figura 2.23). A energia cinética é determinada segundo o valor da massa da partícula abrasiva e a velocidade com que esta deixa o bocal. A primeira consideração importante é que, embora a energia captada pelo sensor de EA seja pequeníssima (da ordem de 1/10000 da energia cinética incidente), foi confirmado que há proporcionalidade entre a energia acústica e a energia cinética incidente. Durante o impacto da partícula na superfície do material, 1% a 5% da energia cinética incidente é dissipada dentro do material na forma de energia elástica e estes dois tipos de energia

são proporcionais entre si (HUTCHINGS, 1992). Assim, pode-se deduzir que a energia acústica mensurada para cada impacto representa menos que 1% da energia elástica total transmitida ao material.

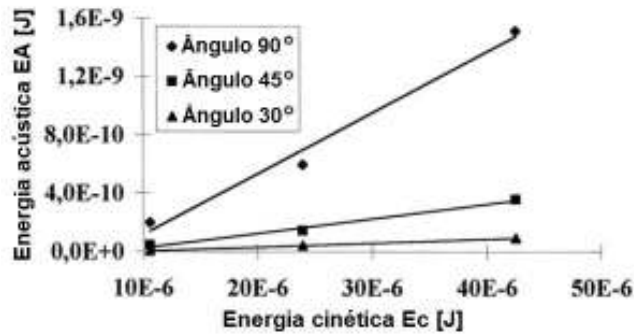


Figura 2.23 - Correlação entre a energia acústica devido ao impacto da partícula e a energia cinética (MOMBER, *et. al.*, 1999).

Notou-se também que o coeficiente de proporcionalidade entre a energia acústica e a energia cinética aumenta com o ângulo de impacto. Dois efeitos podem explicar tal fato. Por um lado, o ângulo de incidência controla a hidrodinâmica da erosão por lama na superfície da amostra e, particularmente, a influência da camada-limite hidrodinâmica. Esta camada tende a retardar a partícula, o que se torna ainda mais significativo quando o ângulo de impacto é pequeno. Por outro lado, a energia elástica transmitida ao alvo durante um impacto diminui com ângulos de incidência mais baixos.

A Figura 2.24 mostra a evolução da freqüência dos estouros de EA em termos da amplitude destes sinais e da velocidade do fluido ao deixar o bocal. Foi constatado que os parâmetros de amplitude e a freqüência aumentam com a velocidade do fluido. Quando a velocidade for maior do que 10 m/s, sinais de EA caracterizados por baixos valores de amplitude e freqüência são detectados. A altos valores de velocidade do fluxo, micro-bolhas são geradas em diferentes localidades, especialmente na saída da bomba centrífuga.

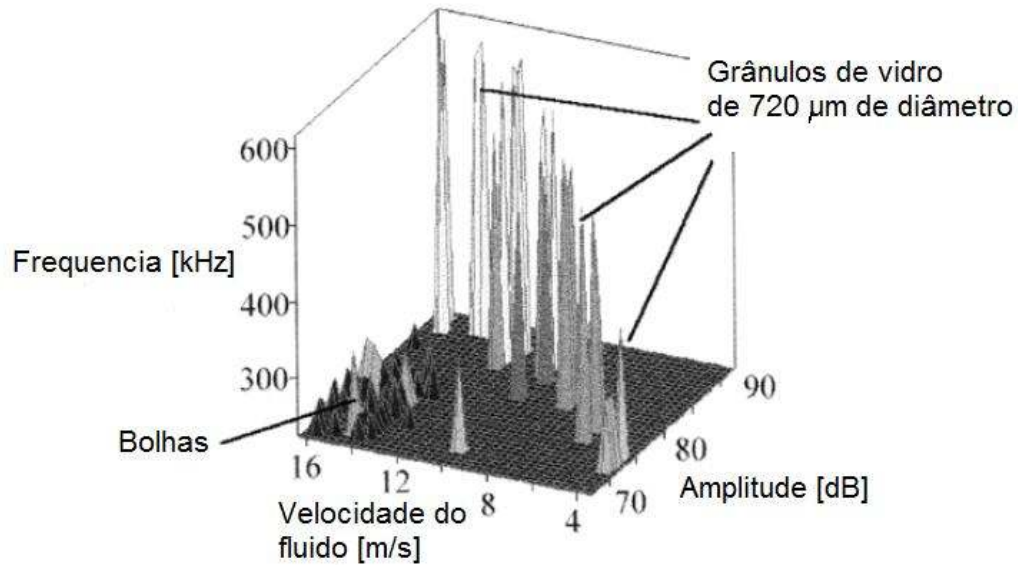


Figura 2.24 - Evolução da frequência do sinal de EA com a velocidade do fluido e magnitude dos hits (MOMBER *et. al.*, 1999).

Li e Li (1995) realizaram um estudo correlacionando sinais de EA com defeitos em rolamentos. O processamento da emissão acústica pela frequência característica do defeito torna possível detectar e diagnosticar em qual parte do rolamento encontra-se a falha. Defeitos em diferentes partes (anel interno, anel externo e esferas) terão frequências características nas quais os sinais são gerados. O sinal acústico de um rolamento danificado consiste em "estouros" (*bursts de EA*) periódicos de emissão acústica. Se a frequência do impulso gerado é similar à frequência característica do defeito e a sua força é significativa, um classificador padrão caracterizará este rolamento como danificado.

WARREN e GUO (2007) avaliaram a vida em fadiga de um sistema esfera contra plano. Pôde-se perceber que, em geral, a amplitude do sinal de emissão acústica é o parâmetro mais sensível e confiável para o monitoramento dos corpos-de-prova durante os testes de fadiga, até a falha. Além disso, constatou-se que os parâmetros RMS e energia absoluta são mais afetados pela adição de lubrificante ou pela propagação de trincas.

RAVINDRA *et.al.* (1997) estudaram as características dos sinais de EA com o desgaste da ferramenta de corte sob diversas condições de trabalho. Os parâmetros: tempo de subida, energia e RMS apresentaram boa correlação com a taxa de desgaste da ferramenta e com as condições de corte. O lascamento da ferramenta causa, principalmente, elevação no valor do parâmetro RMS, porém pode-se perceber uma diminuição no valor do parâmetro tempo de subida.

MERCADO e PADOVESE (2004) apresentaram o método não-destrutivo de EA como monitoramento para detectar o colapso do filme de lubrificante em mancais de deslizamento com carga radial. Este método permite, então, diagnosticar a transição do regime de lubrificação de um estágio em que não há contato para um estágio em que ocorre o contato entre as superfícies em movimento relativo. Os sinais de EA foram obtidos com diferentes condições de carga aplicada sobre o mancal. A análise do espectro de vibração em diferentes bandas de frequência (parâmetro RMS) permite que o estudo do processo de lubrificação seja realizado.

PIOTRKOWSKI *et.al.* (2005) apresentaram um estudo sobre a adesividade de revestimentos de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de cromo (CrN) utilizando um sistema de macroesclerometria para a determinação da carga crítica destes revestimentos. Nestes experimentos, a técnica de emissão acústica foi utilizada para auxiliar na determinação da carga crítica dos revestimentos. O aparato utilizado nos ensaios está apresentado na Figura 2.25.

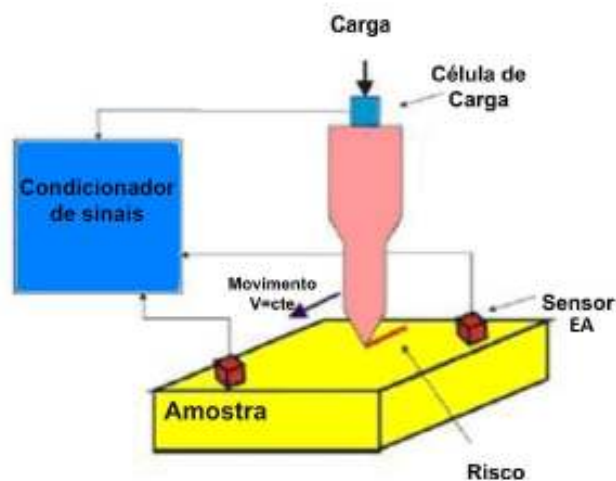


Figura 2.25 - Aparato utilizado para os ensaios de macroesclerometria monitorados por EA (PIOTRKOWSKI *et.al.*, 2005).

Através da variação dos valores da carga aplicada e da energia de EA acumulada pelo movimento relativo, foram definidos 4 estágios de desgaste de revestimento, conforme gráfico da Figura 2.26. O estágio I foi atribuído à deformação plástica do revestimento e no estágio II já estão presentes trincas transversais ao sentido de riscamento. Nos estágios III e IV já estão presentes trincas transversais e laterais, sendo o último correspondente a um alto grau de desgaste.

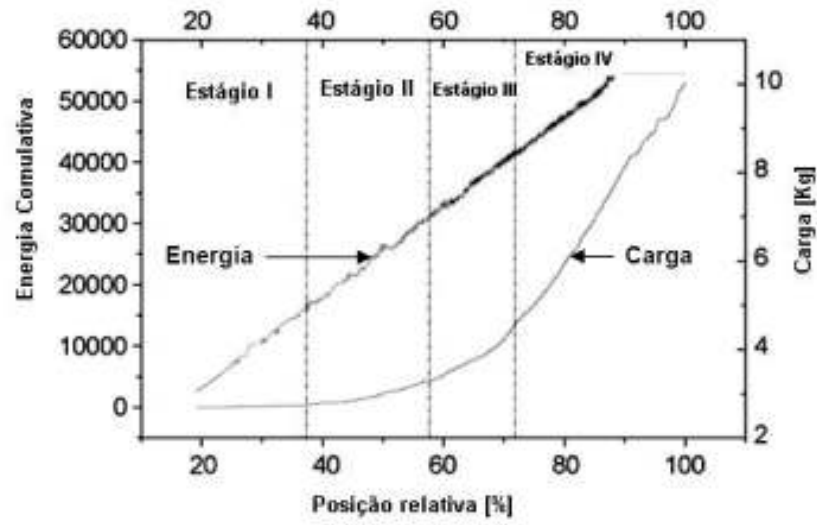


Figura 2.26 - Variação da energia acumulada de EA e da carga aplicada pelo deslocamento relativo em revestimento de TiN (PIOTRKOWSKI *et. al.*, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os elementos envolvidos no sistema tribológico do ensaio de desgaste erosivo estão apresentados na Figura 3.1.

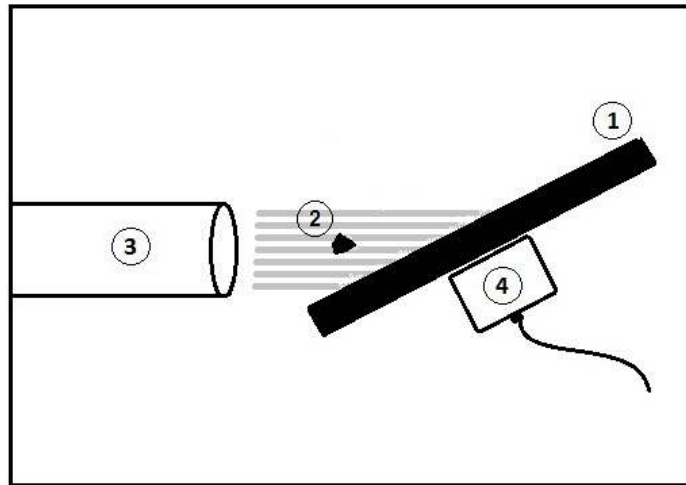


Figura 3.1 - Tribossistema do ensaio de desgaste erosivo.

Legenda:

1. Corpo (amostra de aço carbono);
2. Meio: Fluxo (ar comprimido + partículas);
3. Tubo de aceleração do equipamento de ensaio de desgaste (erosímetro);
4. Sistema de aquisição de sinais (emissão acústica – EA).

Neste capítulo serão detalhados todos os elementos envolvidos neste tribossistema, bem como as variáveis e componentes relevantes dos equipamentos utilizados para gerar e monitorar o desgaste erosivo.

3.1 MATERIAIS

A amostra e as partículas erodentes serão caracterizadas com relação à geometria, dureza, microestrutura e propriedades mecânicas.

3.1.1 Corpo: amostra de aço-carbono

As amostras, com dimensões de 140 mm x 100 mm x 6 mm, foram confeccionadas a partir de chapa laminada a quente comercial de aço com baixo teor de carbono. A propriedade mecânica de maior relevância para os ensaios de erosão

pode ser representada pela dureza superficial, que para o tipo de material utilizado apresentou valores médios de $80,5 \pm 1,7$ HV. A dureza Vickers das amostras foi determinada por um indentador piramidal, com carga de 98,10 N aplicada por 10 segundos. A Figura 3.2 apresenta uma foto de amostra para erosão, onde pode-se destacar os furos para fixação no porta amostra e a marca de erosão na região central.



Figura 3.2 - Corpo de prova para ensaio de desgaste erosivo.

Não foi realizada preparação especial da superfície da amostra para a realização dos ensaios de erosão, como retificação ou lixamento, sendo feita somente uma limpeza superficial com álcool isopropílico para a remoção de impurezas.

Um exame metalográfico foi realizado para caracterizar a microestrutura do aço dos corpos de prova. Nota-se (ver Figura 3.3) a presença de grãos de ferrita com forma e distribuição de tamanho irregulares. Não foi constatada a presença de perlita (estrutura lamelar composta por ferrita e cementita), supondo assim que o carbono esteja presente na forma de carbeto nos contornos de grão. Esta microestrutura indica que o material é um aço de baixo carbono.

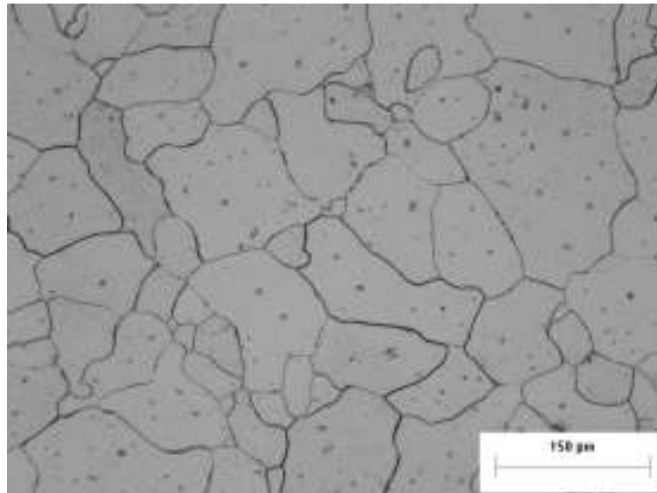


Figura 3.3 - Micrografia do corpo de prova utilizado nos ensaios de desgaste erosivo.

3.1.2 Partícula erodente

O material utilizado como abrasivo foi óxido de alumínio (Al_2O_3), também chamado de alumina, na forma de partículas angulares com diâmetro médio de 190 μm . A medição da distribuição de tamanho das partículas abrasivas foi realizada no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), utilizando um granulômetro modelo CILAS 920. O princípio de funcionamento deste equipamento é a partir da utilização de teorias de difração de Fraunhofer e métodos matemáticos aplicados em fenômenos de dispersão produzidos pela incidência de feixes de luz com raios paralelos sobre a partícula.

O histograma de distribuição de tamanho das partículas obtido pelo granulômetro pode ser observado na Figura 3.4.

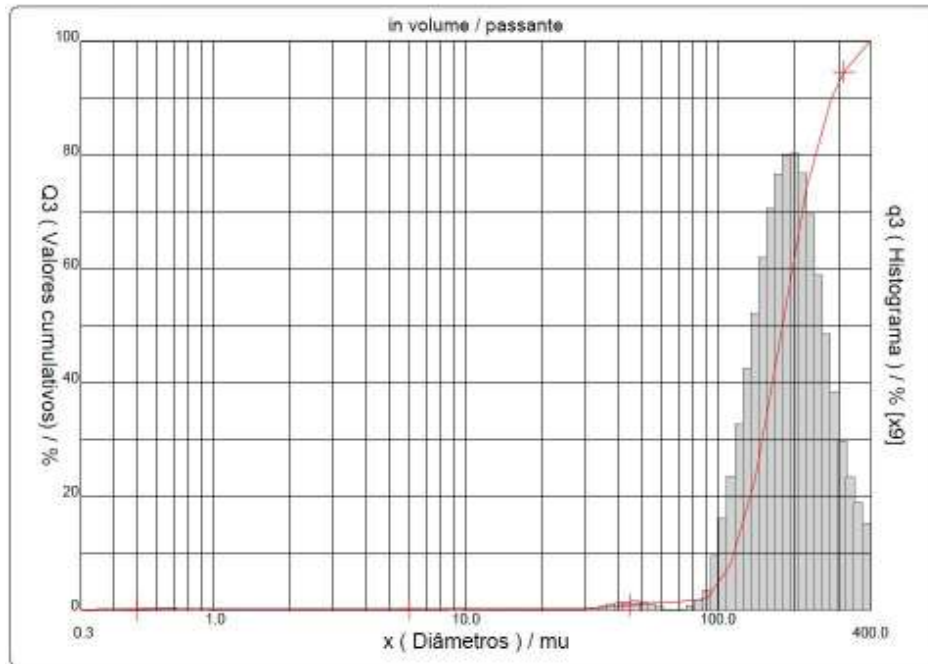


Figura 3.4 - Histograma com a distribuição de tamanho das partículas de alumina.

A alumina utilizada possui forma angular, conforme verificado pelas fotografias apresentadas na Figura 3.5. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no laboratório de materiais do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC.

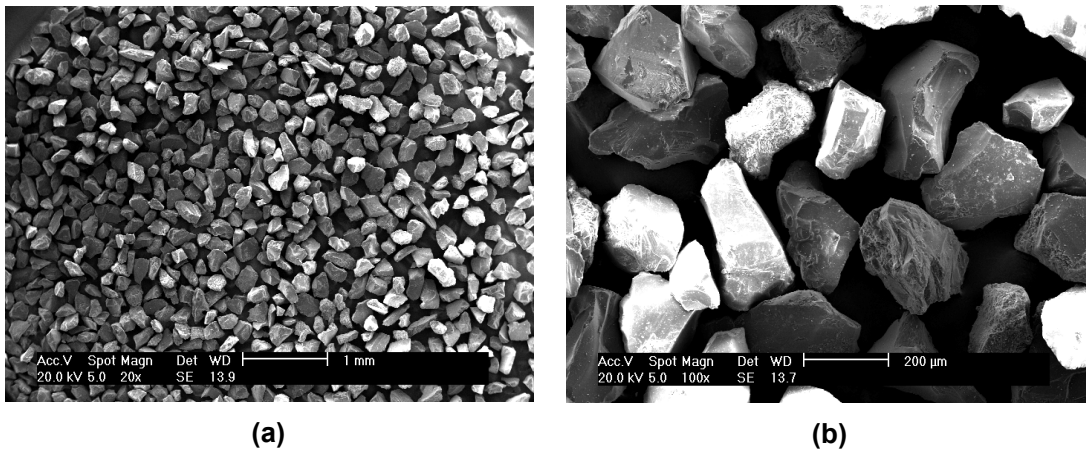


Figura 3.5 - Fotografias obtidas por MEV. (a) Amplificação de 20 vezes e (b) amplificação de 100 vezes.

Uma análise por espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) foi realizada para confirmar o alumínio como componente principal das partículas. O espectro obtido pode ser visualizado na Figura 3.6.

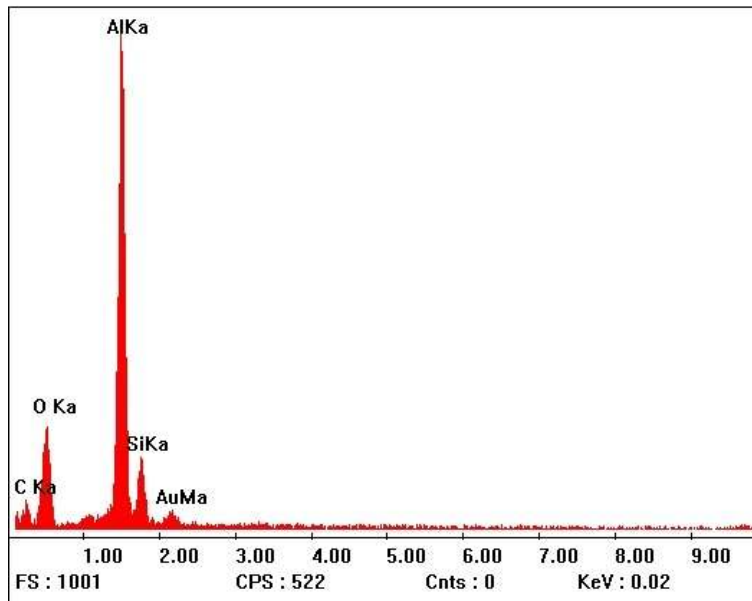


Figura 3.6 - Espectro de EDS de uma partícula de alumina.

A microdureza Vickers das partículas de alumina foi medida, aplicando-se uma carga de 500 g com um indentador piramidal. A Figura 3.7 mostra um exemplo de marcas de indentações de microdureza Vickers em uma partícula de alumina.

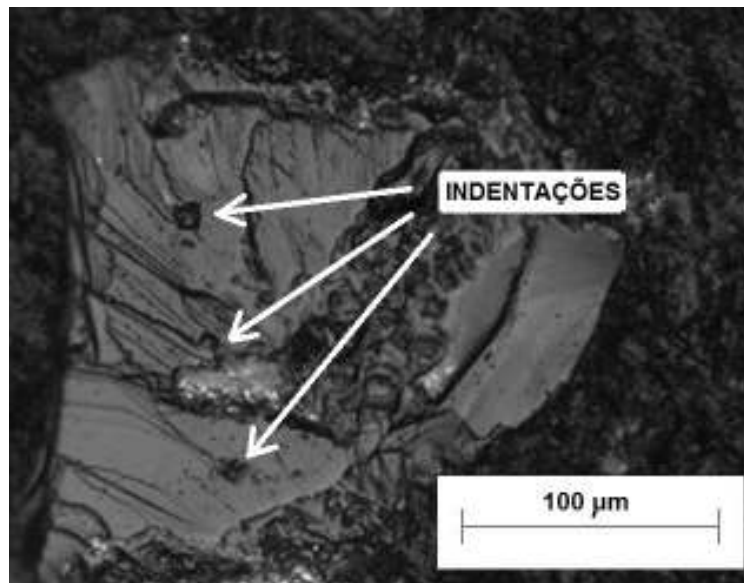


Figura 3.7 - Localização dos pontos onde foram feitas as medições de microdureza Vickers na partícula.

Os valores de microdureza obtidos estão listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de microdureza da partícula de alumina. A localização dos pontos de medição pode ser observada na Figura 3.7.

| Medição | Microdureza Vickers [HV] |
|---------|--------------------------|
| 1 | 1999 |
| 2 | 1722 |
| 3 | 2044 |
| Média | 1922 ± 174 |

3.2 MÉTODOS

Neste item serão descritos os equipamentos e a metodologia utilizada para a realização dos ensaios de desgaste erosivo. O equipamento utilizado, denominado aqui como erosímetro, e o sistema de aquisição dos dados de emissão acústica terão os seus componentes e principais variáveis detalhados.

3.2.1 Erosímetro

O erosímetro é um equipamento projetado e construído para simular diferentes condições de desgaste erosivo monitorando o corpo de prova com um sensor de emissão acústica. As principais condições de operação do equipamento estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Condições de operação do erosímetro.

| Parâmetro do ensaio | Condição de operação |
|-------------------------|--------------------------|
| Ângulo de impacto | 20 a 90 [°] |
| Velocidade da partícula | 20 a 70 [m/s] |
| Pressão de trabalho | 4,5 [bar] |
| Temperatura | Ambiente (\cong 21°C) |

A Figura 3.8 apresenta um desenho esquemático do erosímetro com seus principais componentes.

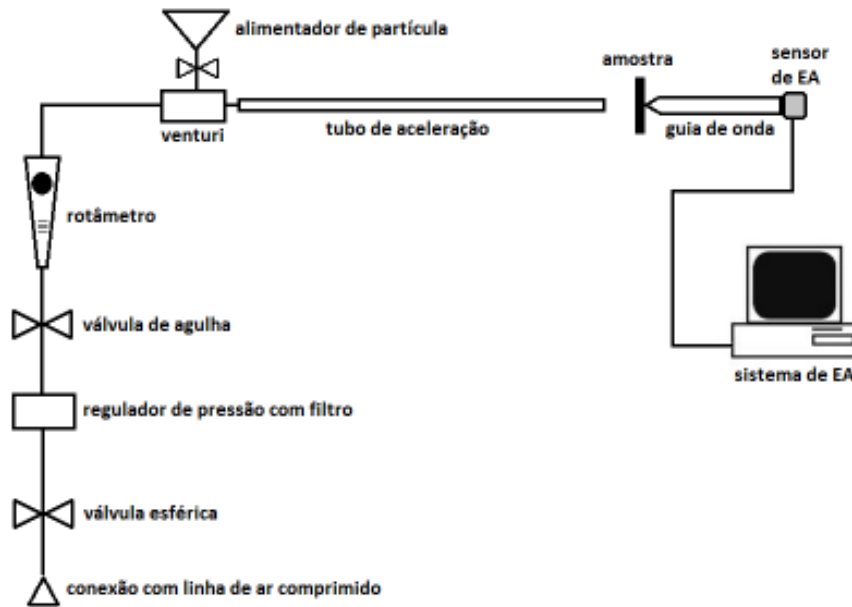


Figura 3.8 - Diagrama esquemático do erosímetro.

3.2.1.1 Sistema de ar comprimido

O ar comprimido utilizado é proveniente da rede de ar de um laboratório de emissões veiculares (LACTEC / LEME). Esta linha opera a uma pressão de 6 bar e possui desumidificador e filtro para contenção de partículas e impurezas sólidas. O controle da pressão e monitoramento da vazão do ar para os ensaios foi realizado pelos instrumentos indicados na Figura 3.9. A especificação dos principais componentes será apresentada a seguir.

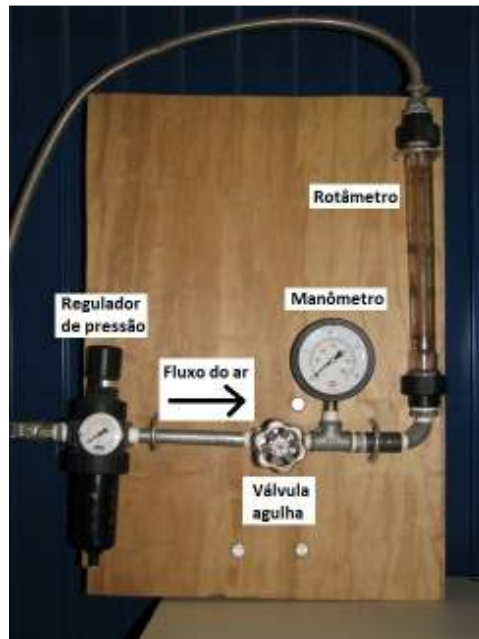


Figura 3.9 - Instrumentos utilizados para controle da pressão e monitoramento da vazão do ar comprimido utilizado nos ensaios de desgaste erosivo.

3.2.1.2 Válvula reguladora de pressão

A válvula utilizada para regular a pressão de saída do ar comprimido possui faixa operativa entre 0 e 10 bar para a entrada e 0,14 e 8,5 bar para a saída de pressão. Esta também possui um filtro para a retirada de contaminantes, como impurezas, umidade e óleo, com capacidade para a retenção de impurezas sólidas de diâmetro médio mínimo de 5 μm . A montagem do regulador de pressão no sistema de controle do ar comprimido pode ser observada na fotografia da Figura 3.9.

3.2.1.3 Medidor de vazão de ar – Rotâmetro

O medidor de vazão utilizado é do tipo bóia, com escala de medição entre 0 e 40 m^3/h , com precisão de 1 m^3/h . O medidor foi calibrado, pelo fabricante, para utilização com ar comprimido a 2 bar e temperatura de 21°C. A pressão de ar comprimido utilizada nos ensaios de desgaste foi de 4,5 bar, acima da utilizada na calibração do rotâmetro. Para determinar a vazão real de ar comprimido é necessário fazer uma conversão, conforme a equação 3.1:

$$Q_{\text{real}} = Q_{\text{rot}} \cdot [(P_{\text{man}} + 0,918)/2]^{1/2} \quad (\text{equação 3.1})$$

onde:

- Q_{real} = vazão real de ar comprimido em m^3/h ;
- Q_{rot} = vazão de ar comprimido indicada no rotâmetro, em m^3/h ;

- P_{man} = pressão indicada no manômetro, em bar.

As medidas de vazão real de ar comprimido obtidas estão listadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores de vazão de ar comprimido convertidos para a pressão utilizada nos ensaios - 4,5 bar.

| Vazão lida no rotâmetro [Nm ³ /h]* - Q_{rot} | Vazão real de ar comprimido [m ³ /h] - Q_{real} |
|---|--|
| 10 | 16,46 |
| 15 | 24,69 |
| 20 | 32,92 |

* Nm³/h = Normal metro cúbico por hora. Unidade padrão do fabricante a 2 bar e 21° C.

3.2.1.4 Alimentador de partículas

O alimentador de partículas é composto basicamente por um reservatório cônico (ver Figura 3.10) construído em material polimérico e por uma válvula para liberar ou interromper o fluxo de partículas.

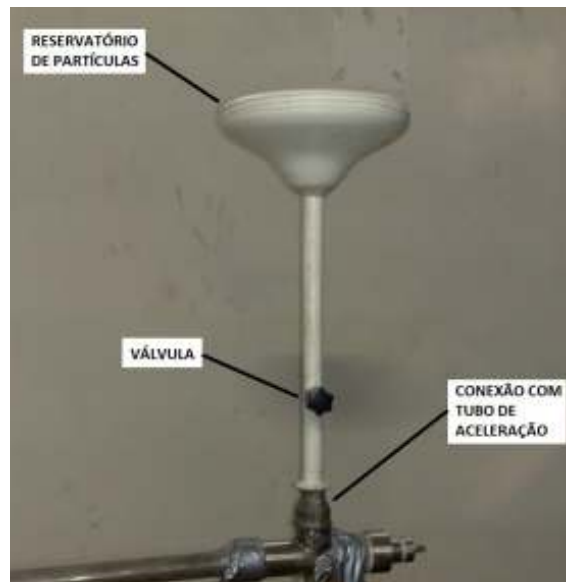


Figura 3.10 - Alimentador de partículas.

A válvula do alimentador não tem precisão suficiente para regular a quantidade de partículas, sendo utilizada somente nas posições totalmente aberta e fechada. Para obter a passagem de partículas na quantidade desejada, foi usinado um dispositivo em poliamida (*Nylon*®), que é inserido no interior do tubo do alimentador de partículas entre a válvula e o Venturi. A Figura 3.11 mostra fotografias do dispositivo.

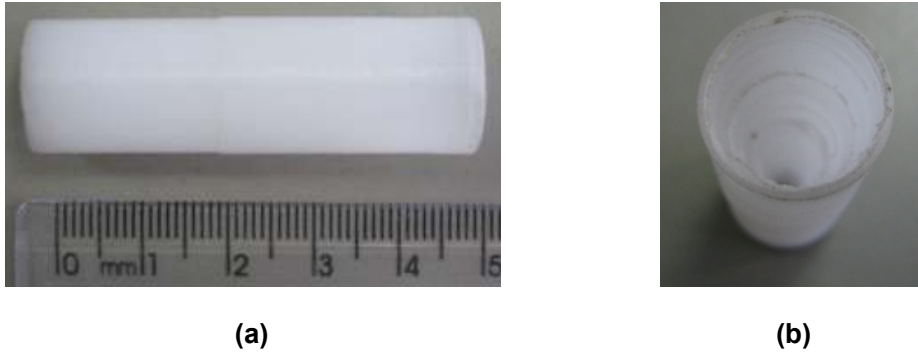


Figura 3.11 - Dispositivo para regular a vazão de partículas. (a) vista lateral e (b) vista superior.

O dispositivo apresenta uma redução gradual no valor do diâmetro interno, com o formato aproximado de um cone, atingindo um orifício 2,5 mm de diâmetro na extremidade inferior, como pode ser observado na Figura 3.12.

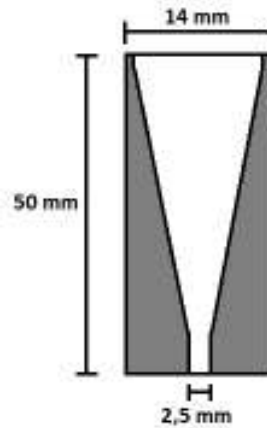


Figura 3.12 - Desenho dimensional do dispositivo utilizado para regular vazão de partículas.

3.2.1.5 Venturi

Dispositivo com restrição interna regulável, capaz de provocar uma depressão e succionar as partículas de abrasivo, quando submetidas ao fluxo de ar comprimido. Neste venturi a vazão do ar é regulada através de um punção roscado que ao deslocar-se restringe a passagem e acelera a massa de ar resultando na redução da pressão na saída do alimentador de partículas, conforme mostrado na Figura 3.13.

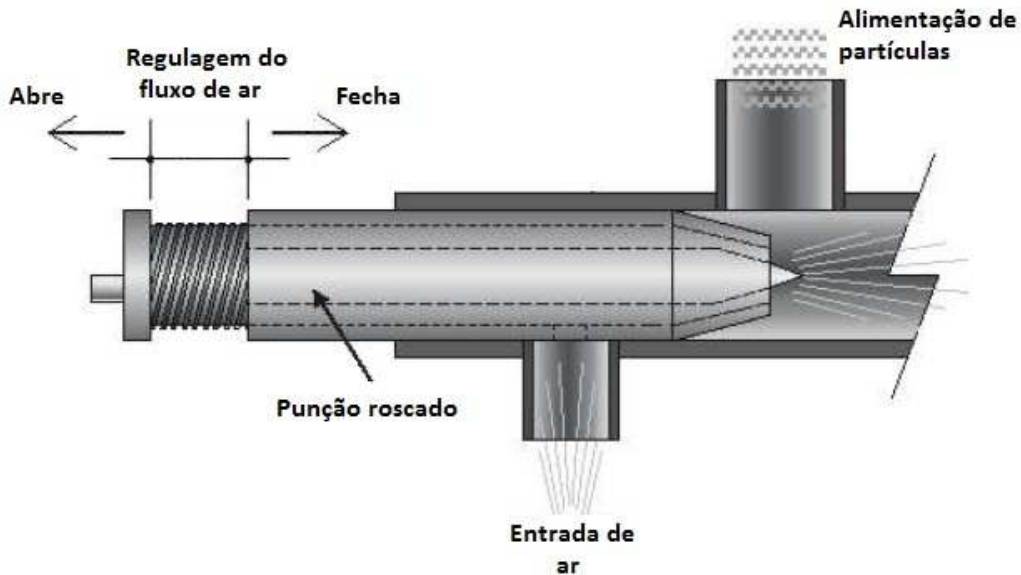


Figura 3.13 - Desenho esquemático do venturi (FIGUEIREDO, 2005).

3.2.1.6 Tubo de aceleração

Na saída do Venturi está acoplado o tubo de aceleração, composto por um tubo de material cerâmico (óxido de alumínio – alumina) inserido dentro de um tubo de aço inoxidável. Este componente possui 1400 mm de comprimento e diâmetro interno de 10 mm.

A relação comprimento/diâmetro do tubo de aceleração é muito relevante em alguns aspectos importantes do ensaio, como na aceleração e velocidade final das partículas e no regime de escoamento do fluido. Se o comprimento do tubo for pequeno, não haverá tempo suficiente para acelerar as partículas até o momento de impacto com a amostra e para o fluido atingir um regime mais laminar de escoamento. STEVENSON e HUTCHINGS (1995) definem essa distância (comprimento do tubo) para que o escoamento deixe de ser turbulento conforme equação 3.2:

$$C = 0,693.d.Re^{1/4} \quad (\text{equação 3.2})$$

onde:

- C = comprimento do tubo de aceleração, em m;
- d = diâmetro interno do tubo, em m;
- Re = número de Reynolds para o fluido ar mais partículas.

Para a determinação do número de Reynolds do fluido ar mais partículas é necessário calcular a massa específica equivalente do fluido. Este cálculo deve ser feito para cada vazão de ar comprimido, uma vez que a vazão mássica de partículas não é a mesma para os três casos.

Os valores da massa específica equivalente (ρ_{eq}), do número de Reynolds e do comprimento do tubo para o escoamento deixar de ser turbulento (C) estão listados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados para a verificação do regime de escoamento do fluido em função do comprimento do tubo de aceleração.

| Vazão de ar comprimido [m ³ /h] | Massa específica equivalente - ρ_{eq} [kg/m ³] | Número de Reynolds | Comprimento do tubo - C [m] |
|--|---|--------------------|-----------------------------|
| 16,5 | 461,5 | 1,50E+07 | 0,43 |
| 24,7 | 364,4 | 2,19E+07 | 0,47 |
| 32,9 | 278,1 | 1,87E+07 | 0,45 |

A metodologia utilizada para a determinação dos valores listados na Tabela 3.4 pode ser observada no Apêndice A. Nota-se que o comprimento do tubo de aceleração é suficiente para que o escoamento do fluido deixe de ser turbulento, de acordo com STEVENSON e HUTCHINGS (1995).

3.2.1.7 Porta amostra

O porta amostra tem a capacidade de posicionar a amostra variando-se o ângulo em relação à direção do fluxo do fluido (ar comprimido + partículas) e de coletar dados de EA durante ensaios de desgaste erosivo. A Figura 3.14 apresenta um desenho do porta amostra com os principais componentes identificados.

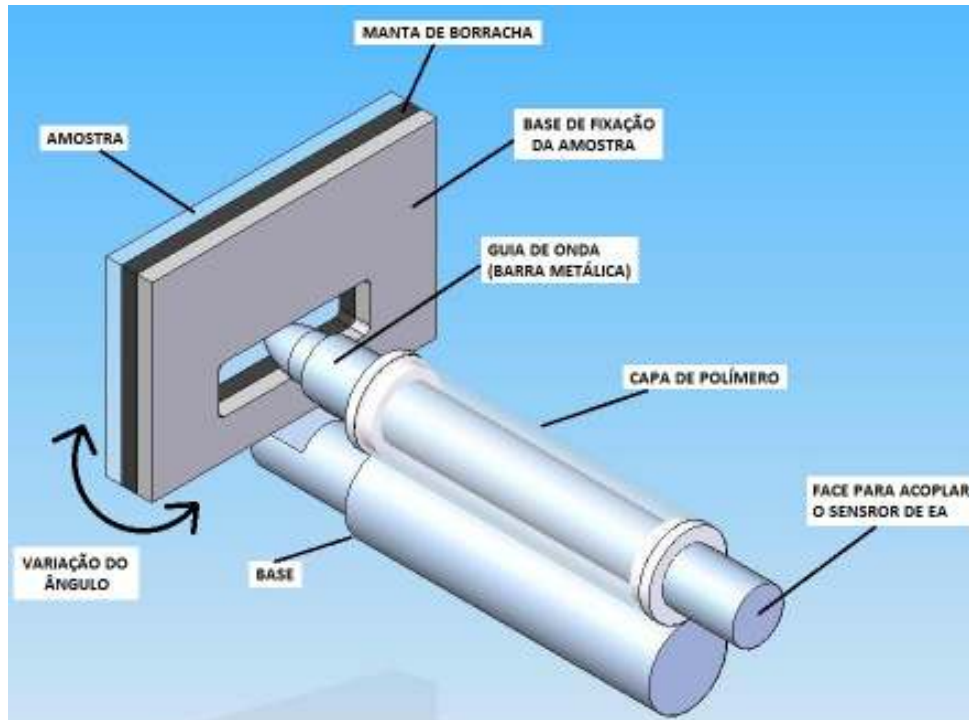


Figura 3.14 – Sistema composto pelo porta amostra e guia de ondas de EA.

A amostra é fixada no porta amostra por parafusos e porcas. O porta amostra permite uma variação do ângulo de impacto na faixa de 20 a 90° entre a amostra e a direção do fluxo do ar mais as partículas. A verificação do ângulo é realizada por gabaritos confeccionados em Eucatex, conforme apresentado na Figura 3.15.

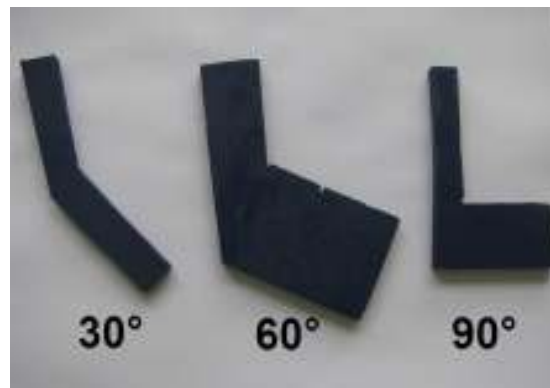


Figura 3.15 - Gabaritos utilizados para determinar o ângulo de impacto das partículas sobre a amostra.

O ângulo de impacto utilizado para os ensaios deste trabalho é de 30 graus, conforme mostrado na Figura 3.16.

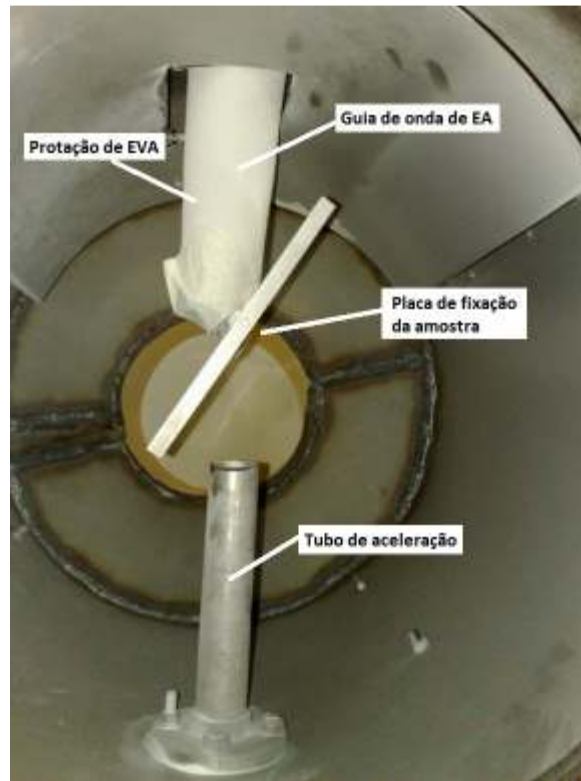


Figura 3.16 – Porta amostra mostrando a montagem com ângulo de 30 graus entre a amostra e o fluxo de ar mais partículas.

As ondas mecânicas geradas pelo impacto das partículas na amostra propagarão pelo guia de onda e serão captadas pelo sensor de EA que está acoplado na extremidade do guia, conforme desenho esquemático (Figura 3.17).

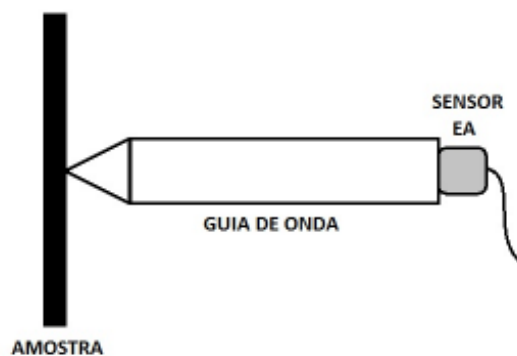


Figura 3.17 - Desenho esquemático simplificado do guia de onda de EA.

Cuidados, como a utilização de uma manta de borracha entre a amostra e a base de fixação e a colocação de um tubo de polímero em volta do guia de onda foram

implementados para que somente sinais de EA oriundos do impacto das partículas com a amostra fossem coletados pelo sensor. Conforme a concepção do erosímetro o sensor de EA ficará na parte externa do coletor de partículas, conforme apresentado na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Vista isométrica do coletor de partículas com posicionamento do porta amostra, tubo de aceleração e local para acoplamento do sensor de EA.

3.2.1.8 Separador de partículas

As partículas sólidas foram separadas do ar comprimido através de um ciclone, cujo princípio de funcionamento pode ser observado na Figura 3.19. Após a passagem pelo ciclone o ar foi eliminado para o ambiente e as partículas coletadas em um recipiente.

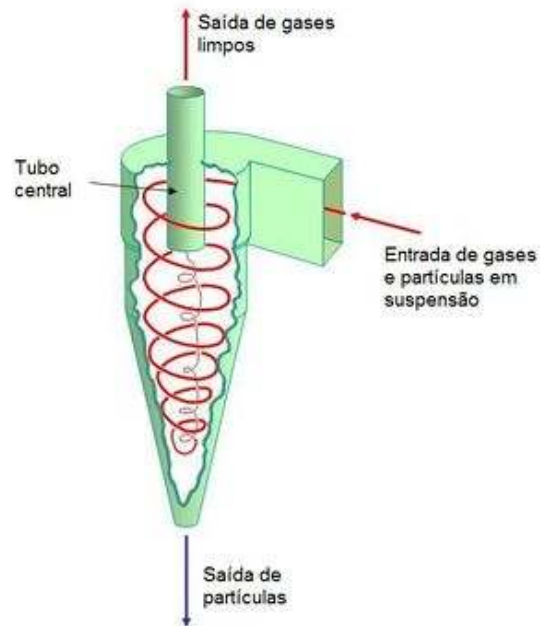


Figura 3.19 - Princípio de funcionamento do separador de partículas.

As partículas são extraídas através de um processo de centrifugação dos gases induzida por um escoamento rotativo no interior do ciclone. Muito mais densas que os gases, as partículas tem maior tendência em permanecer na trajetória tangente ao escoamento rotativo e assim colidir com as paredes da câmara, perdendo velocidade e caindo em direção ao fundo da câmara. Os gases saem através do tubo central do ciclone e as partículas coletadas em um recipiente acoplado no fundo da câmara. A Figura 3.20 apresenta uma fotografia do ciclone separador de partículas montado no erosímetro.



Figura 3.20 - Montagem do ciclone separador de partículas no erosímetro.

3.2.1.9 Ensaios de calibração do erosímetro

Neste item será apresentada a metodologia utilizada e os resultados obtidos nos ensaios para determinar algumas variáveis importantes do ensaio de desgaste, como a velocidade e vazão mássica das partículas e a perda de massa das amostras.

3.2.1.9.1 Determinação da velocidade da partícula erodente

A velocidade das partículas é medida experimentalmente, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 3.21.

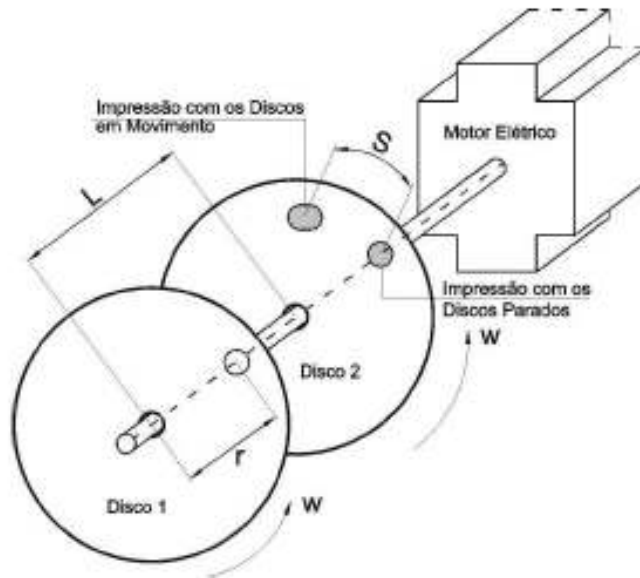


Figura 3.21 - Desenho esquemático com parâmetros utilizados para a determinação da velocidade das partículas (FIGUEIREDO, 2005).

Inicialmente faz-se uma marca (a partir do fluxo e ar comprimido mais partículas) no disco 2, com os discos em repouso. Em seguida faz-se a segunda marca com os dois discos em rotação. A segunda marca encontra-se deslocada em relação à primeira marca de uma distância “S”. A velocidade da partícula é calculada conforme a equação 3.3:

$$V_p = \frac{2.\pi.r.w.L}{S} \quad (\text{equação 3.3})$$

onde:

- V_p = velocidade experimental da partícula, em m/s;
- r = distância entre o centro do orifício e o centro do disco, em m;
- w = rotação do motor em, rps;
- L = distancia entre os discos, em m;
- S = distância entre as duas marcas, em m.

O aparato construído para a determinação da velocidade é composto por dois discos, cortados a partir de chapas de aço carbono galvanizado, com 100 mm de diâmetro cada, montadas em um eixo de motor elétrico de corrente contínua, conforme

fotografia apresentada na Figura 3.22. O primeiro disco possui um orifício circular de 6 mm de diâmetro por onde o fluxo de partículas incide.



Figura 3.22 - Aparato utilizado para determinação da velocidade das partículas.

Os parâmetros do ensaio para a determinação da velocidade das partículas estão listados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros utilizados nos ensaios para a determinação da velocidade das partículas.

| Parâmetros do ensaio | Valor utilizado |
|---------------------------|-----------------|
| Rotação do motor | 60 rps |
| Diâmetro do orifício | 6 mm |
| Distância entre os discos | 0,06 m |
| Distância r* | 0,03 m |

A caracterização das marcas de desgaste inseridas no segundo disco metálico foi obtida por análise de imagem a partir de software de CAD (Autodesk AutoCAD®). A partir da análise de imagem foi medido o comprimento do arco formado entre os círculos formados no disco 2 (ver Figura 3.23).

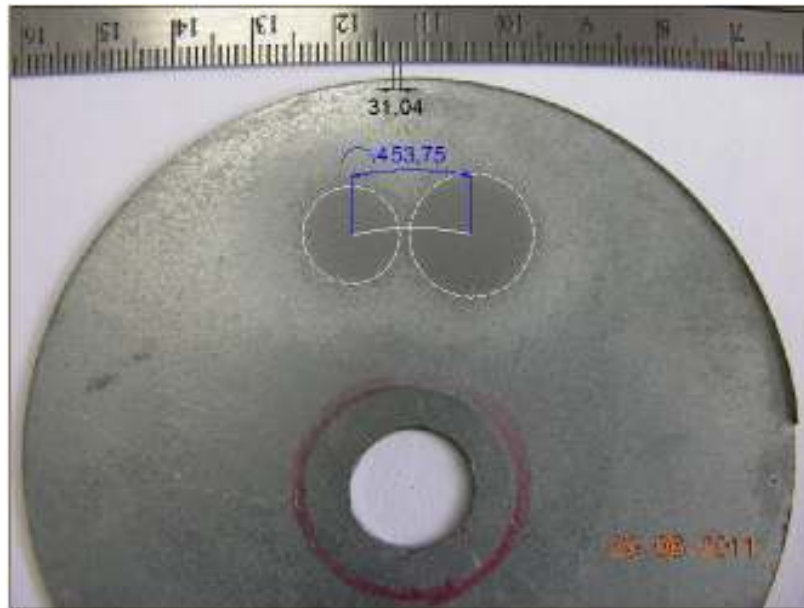


Figura 3.23 - Análise de imagem para a caracterização do desgaste no disco para a determinação da velocidade das partículas.

As velocidades obtidas para os três valores de vazão de ar utilizados estão listadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Velocidades das partículas obtidas experimentalmente.

| Vazão de ar [m ³ /h] | Velocidade da partícula [m/s] |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 16,5 | 45 |
| 24,7 | 57 |
| 32,9 | 67 |

3.2.1.9.2 Vazão mássica de partículas erodentes

A vazão de partículas foi determinada experimentalmente medindo-se o tempo gasto para esgotar uma massa conhecida de abrasivo inserida no reservatório do alimentador de partículas. A medição do tempo foi realizada por um cronômetro digital. A Tabela 3.7 apresenta os valores médios (relativos a seis ensaios) obtidos para cada vazão de ar utilizada.

Tabela 3.7 - Vazão mássica de partículas para cada condição de ensaio.

| Vazão de ar [m ³ /h] | Vazão mássica de partículas [g/min] |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 16,5 | 193 ± 18 |
| 24,7 | 211 ± 10 |
| 32,9 | 194 ± 08 |

3.2.1.9.3 Medição do desgaste – perda de massa

Foi utilizada uma balança digital com precisão de 0,001 g para a medição da massa das amostras antes e após cada ensaio. A massa das partículas utilizadas em cada ensaio também foi determinada, pois a duração dos ensaios foi controlada pela quantidade de partícula e não pelo tempo exposto ao desgaste.

Foram utilizadas duas formas para a medição do desgaste: pela taxa de desgaste mássica e pela taxa de desgaste. A taxa de desgaste mássica foi determinada a partir da relação entre a massa inicial menos a massa final da amostra pela massa total de partículas utilizada no ensaio, conforme a equação 3.4.

$$Q_m = (m_i - m_f)/m_p \quad (\text{equação 3.4})$$

onde:

- Q_m = taxa de desgaste mássica, em mg/g;
- m_i = massa inicial da amostra, em mg;
- m_f = massa final da amostra, em mg;
- m_p = massa de partículas erodentes utilizada no ensaio, em g.

A taxa de desgaste foi determinada pela relação entre a perda de massa pelo tempo total de exposição ao desgaste, conforme apresentado na equação 3.5:

$$Q = (m_i - m_f)/t \quad (\text{equação 3.5})$$

onde:

- Q = taxa de desgaste, em mg/min;
- t = tempo de ensaio, em min.

3.2.2 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. Os dados de emissão acústica foram coletados utilizando o *software* desenvolvido pela PAC denominado AEWin®. O *software* AEWin®, construído em plataforma Windows® gerencia a coleta de dados, permitindo a aquisição dos parâmetros de emissão acústica.

O sensor de EA utilizado foi o PAC WDI, com pré-amplificador de 40 dB integrado e frequência ressonante na faixa de 90 a 900 kHz, ligado à placa através de conectores tipo BNC e cabo coaxial de 50 ohms. Optou-se por este tipo de sensor com o objetivo de possibilitar a avaliação do sinal no espectro da frequência. Estima-se que com esta metodologia de análise seja possível separar as diferentes fontes de sinal.

Após a detecção os sinais são armazenados em arquivos eletrônicos que podem ser lidos pelo *software* AEWin® ou convertidos em arquivos ASCII para utilização por softwares universais de leitura de dados.

Para uma adequada aquisição de dados de EA devem ser realizados alguns ajustes e calibrações no sistema conforme será detalhado a seguir.

3.2.2.1 Calibração do sensor / Sistema de EA

Os dados coletados durante um ensaio de EA podem ter sua confiabilidade contestada devido a problemas operacionais e de instrumentação, como ruídos gerados pelos cabos coaxiais, perda do acoplamento ou mau funcionamento dos transdutores acústicos. Sendo assim, a verificação da resposta dos sensores de EA a um estímulo conhecido é fundamental para assegurar uma adequada coleta de dados durante o ensaio. Um método normalizado e usualmente empregado para a verificação dos transdutores de EA é através da inserção e análise de um sinal acústico gerado pela quebra de uma mina de grafite (0,3 mm dureza 2H) na superfície na qual o sensor está acoplado (ASTM E 2075, 2010).

Este trabalho adotou a sistemática de verificar o sistema, através da quebra de mina de grafite sobre a barra metálica do guia de onda e sobre a amostra, antes e após a realização de cada ensaio. Foram realizadas 3 quebras de grafite em cada situação e anotados os valores médios de amplitude do sinal coletado. Os valores adotados como mínimos para garantir a confiabilidade do sistema de EA estão listados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Critérios adotados para a verificação do sistema de EA com geração de sinal acústico padrão a partir da quebra de minas de grafite.

| | Barra metálica do guia de onda | Amostra |
|--|--------------------------------|-----------------|
| Amplitude média para 03 quebras de grafite | Maior que 95 dB | Maior que 70 dB |
| Diferença entre o maior e o menor valor de amplitude para 03 quebras de grafite. | Menor que 4 dB | Menor que 4 dB |

3.2.2.2 Atenuação do guia de onda

Ao utilizar um guia de onda deve-se realizar um estudo para conhecer a atenuação que este irá inferir no sinal acústico. A atenuação foi determinada através da comparação entre sinais acústicos inseridos em uma amostra em contato com o guia de onda (Figura 3.24 - 1) com sinais inseridos na própria barra metálica do guia de onda (Figura 3.24 - 2). Os sinais foram gerados pela quebra de mina de grafite, o qual gera um sinal acústico com alta intensidade e rápido amortecimento.

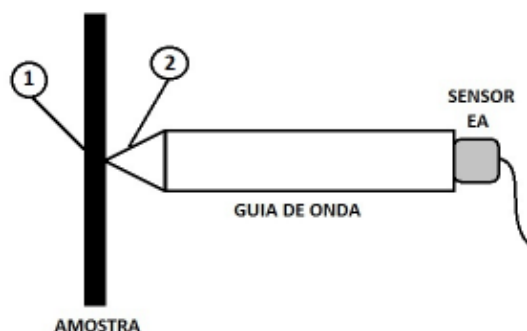


Figura 3.24 - Inserção de sinais acústicos, pela quebra de grafite, para estudo da atenuação do guia de onda. (1) sinais inseridos na amostra e (2) na barra metálica do guia de onda.

Esta metodologia permite avaliar a atenuação causada pela interface entre a ponta do guia de onda e a amostra. O resultado do estudo de atenuação do guia de onda pode ser observado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Resultados obtidos para a atenuação do guia de onda.

| | Energia de EA | Amplitude [dB] | RMS [V] |
|---|---------------|----------------|---------------|
| Barra metálica do guia de onda (Figura 3.24 - 2)Figura 3.24 | 4476 ± 1027 | 99 | 0,090 ± 0,020 |
| Amostra (Figura 3.24 - 1)Figura 3.24 | 1864 ± 378 | 74 ± 2 | 0,016 ± 0,003 |
| Atenuação (%) | 58,35 | 25,25 | 82,83 |

Nota-se que o sinal sofre um amortecimento refletido mais na duração do que na magnitude do sinal, devido principalmente ao fato do guia de onda não estar metalurgicamente unido à amostra (soldado). Os parâmetros de energia de EA e RMS, mais representativos do sinal como um todo, sofrem uma maior atenuação do que a amplitude, representativa somente ao pico de tensão do sinal (magnitude). Pode-se atribuir este comportamento à reflexões que o sinal sofre na interface da ponta do guia de onda com a amostra, unidas entre si somente por contato mecânico. A atenuação inferida no sinal pelo próprio guia de onda foi considerada desprezível.

3.2.2.3 Ajuste do Limiar de Referência

Neste trabalho o valor do limiar de referência (*threshold*) foi empiricamente definido em decibel (dB). A determinação do limiar é baseada no fato de que pode ocorrer saturação na coleta dos sinais quando utilizados valores relativamente baixos para o *threshold*, assim o sistema não é capaz de processar todos os sinais coletados pelo sensor. Portanto, os valores estabelecidos para cada condição de ensaio foram ligeiramente superiores ao limite de saturação.

O fenômeno da saturação dos sinais pode ser caracterizado através da interface gráfica do *software*, por parâmetros acústicos como RMS e Contagem de picos. A Figura 3.25 apresenta dois gráficos demonstrando tais exemplos. No gráfico “*RMS x TIME*”, a saturação é caracterizada por uma linha pontilhada, indicando uma forte redução na taxa de coleta dos sinais. Na Figura 3.25 (a) os sinais indicados pelo número 1 são provenientes da quebra da mina de grafite no corpo de prova quando não havia saturação na gravação dos sinais. Os sinais representados pelo número 2 foram gerados da mesma maneira, porém com o fenômeno de saturação presente. Nota-se que os sinais representados pelo número 2 têm um maior valor de contagem que os de número 1.

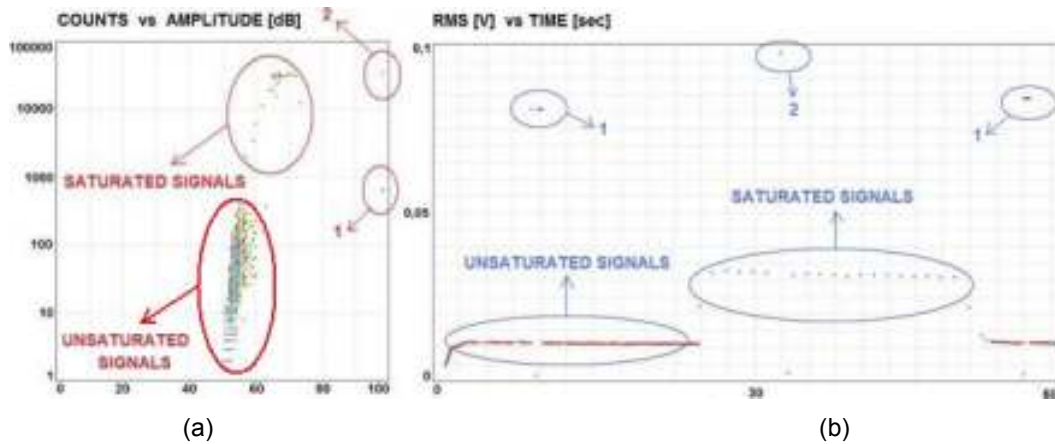


Figura 3.25 - Fenômeno de saturação dos sinais caracterizados pelos parâmetros de (a) contagem e amplitude e (b) RMS (TIBONI et. al., 2009).

Os valores do limiar de referência (*threshold*) utilizados estão listados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Valores de limiar de referência utilizados para as três condições utilizadas nos ensaios de desgaste erosivo.

| Vazão de ar [m ³ /h] | Limiar de referência [dB] |
|---------------------------------|---------------------------|
| 16,5 | 61 |
| 24,7 | 65 |
| 32,9 | 67 |

3.2.3 Ensaio de desgaste erosivo

Foram realizadas três baterias de ensaios de desgaste erosivo, utilizando seguinte metodologia:

- 1) Preparação da amostra – limpeza com álcool isopropílico;
- 2) Medição da massa inicial da amostra;
- 3) Medição da massa de partículas erodentes selecionadas para o ensaio;
- 4) Fixação da amostra no porta amostra;
- 5) Calibração do sistema de EA – quebra de grafite na barra do guia de onda e na amostra conforme 3.2.2.1;

- 6) Regulagem da vazão do ar comprimido desejada para o ensaio – ajuste da posição do punção roscado do venturi;
- 7) Ajuste das configurações do sistema de EA (*threshold*) e início da gravação dos dados;
- 8) Abertura da válvula do alimentador de partículas;
- 9) Erosão da amostra por toda a massa de partículas erodentes selecionadas para o ensaio;
- 10) Interrupção da alimentação de ar comprimido;
- 11) Encerramento da aquisição dos dados de EA;
- 12) Calibração do sistema de EA conforme 3.2.2.1;
- 13) Retirada da amostra para a medição da massa.

Os parâmetros utilizados para os ensaios de desgaste erosivo realizados neste trabalho estão listados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Parâmetros do ensaio de desgaste erosivo e do sistema de emissão acústica utilizados para a realização deste trabalho.

| Parâmetros do processo erosivo | Utilizado nos ensaios |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Velocidade da partícula | 45, 57 e 67 m/s |
| Vazão de ar | 16,5, 24,7 e 32,9 m ³ /h |
| Pressão de ar | 4,5 bar |
| Ângulo de impacto | 30 graus |
| Corpo (amostra) | Aço com baixo teor de carbono |
| Partícula abrasiva | Alumina (tamanho médio 190 µm) |

| Parâmetros do sistema de EA | Utilizado nos ensaios |
|------------------------------------|--|
| Tipo do sensor | WDI (banda larga de frequência - 90 a 900 kHz) |
| <i>Threshold</i> | 61, 65 e 67 dB |
| <i>Peak definition time</i> - PDT | 400 µs |
| <i>Hit definition time</i> - HDT | 800 µs |
| <i>Hit lenght time</i> - HLT | 1000 µs |

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho foram realizadas 3 baterias de ensaios:

- 1ª Bateria: Ensaios com 3 níveis de velocidade e quantidade fixa de partícula erodente (800 gramas), para determinação da taxa de desgaste com reduzida quantidade de abrasivo. A medição da massa das amostras foi feita antes e após cada ensaio.
- 2ª Bateria: Ensaios com 3 níveis de velocidade e quantidade fixa de partícula de erodente (1600 gramas), para determinação da taxa de desgaste com quantidade de abrasivo mediana. Foram feitas 4 repetições para cada condição de velocidade (4 amostras), num total de 12 ensaios. A medição da massa das amostras foi feita antes e após cada ensaio.
- 3ª Bateria: Ensaios com 3 níveis de velocidade e quantidade fixa de partícula de erodente (3000 gramas), para determinação da taxa de desgaste ao longo do ensaio. A medição da massa das amostras foi feita a cada 300 gramas de partículas erodentes.

A Tabela 3.12 mostra a divisão das amostras por ensaio e as medições da perda de massa de cada etapa.

Tabela 3.12 - Divisão da quantidade de amostra e metodologia para a determinação da perda de massa para cada ensaio de desgaste erosivo.

| Ensaio | Amostras | Massa de partículas erodentes [g] | Velocidade [m/s] | Medida do desgaste [mg] |
|-------------------------------|--|-----------------------------------|------------------|-------------------------|
| Primeira bateria (3 amostras) | CP1 | 800 | 45 | Pesagem da amostra |
| | CP2 | 800 | 57 | Pesagem da amostra |
| | CP3 | 800 | 67 | Pesagem da amostra |
| Segunda bateria (12 amostras) | CP4 | 1600 | 45 | Pesagem da amostra |
| | CP5 | 1600 | 57 | Pesagem da amostra |
| | CP6 | 1600 | 67 | Pesagem da amostra |
| | CP7 | 1600 | 45 | Pesagem da amostra |
| | CP8 | 1600 | 57 | Pesagem da amostra |
| | CP9 | 1600 | 67 | Pesagem da amostra |
| | CP13 | 1600 | 45 | Pesagem da amostra |
| | CP14 | 1600 | 57 | Pesagem da amostra |
| | CP15 | 1600 | 67 | Pesagem da amostra |
| | CP16 | 1600 | 45 | Pesagem da amostra |
| Terceira bateria (3 amostras) | CP10 (massa total de abrasivo de 3.000g) | 300 | 45 | 1ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 2ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 3ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 4ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 5ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 6ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 7ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 8ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 9ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 45 | 10ª pesagem da amostra |
| | CP11 (massa total de abrasivo de 3.000g) | 300 | 57 | 1ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 2ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 3ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 4ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 5ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 6ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 7ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 8ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 9ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 57 | 10ª pesagem da amostra |
| | CP12 (massa total de abrasivo de 3.000g) | 300 | 67 | 1ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 2ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 3ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 4ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 5ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 6ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 7ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 8ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 9ª pesagem da amostra |
| | | 300 | 67 | 10ª pesagem da amostra |

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelos ensaios de desgaste erosivo, com enfoque às características e evolução da taxa de desgaste, aos mecanismos de dano presentes no processo e à correlação constatada entre os parâmetros do processo erosivo e os dados coletados pela técnica de ensaio não-destrutivo de emissão acústica.

4.1 ENSAIO DE EROSÃO

A caracterização do desgaste erosivo é realizada pela determinação da perda de massa da amostra em função das variáveis envolvidas no sistema tribológico. Esta foi realizada neste trabalho pela medição da taxa de desgaste nos ensaios e por uma análise morfológica da superfície erodida através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

4.1.1 Taxa de Desgaste

A terceira bateria de ensaios foi realizada para verificar a evolução da taxa de desgaste com o tempo de ensaio e a influência da temperatura sobre o comportamento da amostra com relação ao desgaste. Os resultados da perda de massa em função do tempo de ensaio apresentaram uma tendência linear de aumento, indicando que o desgaste está ocorrendo em um regime constante para os intervalos de tempo utilizados. Este comportamento indica que o regime constante (*steady-state*) foi alcançado logo no início do ensaio e foi observado para todas as velocidades de impacto avaliadas, conforme apresentado na Figura 4.1.

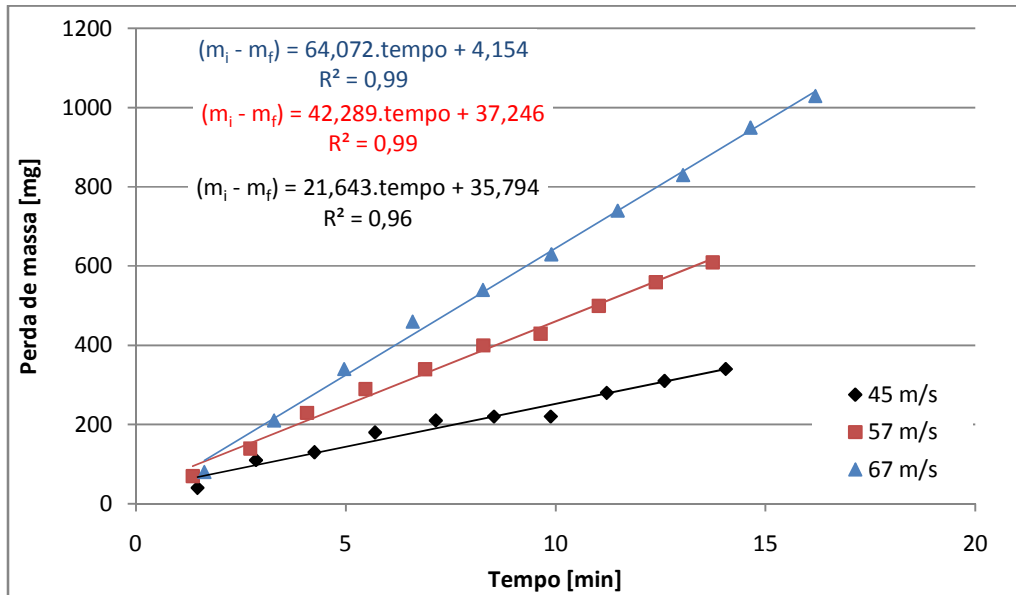
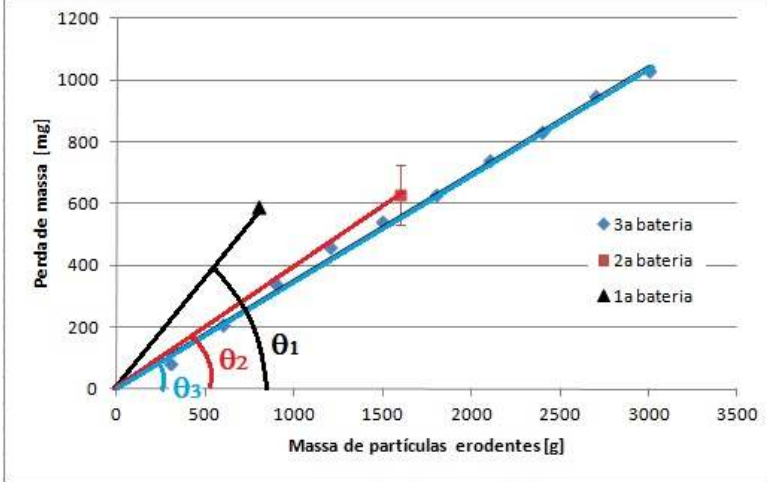
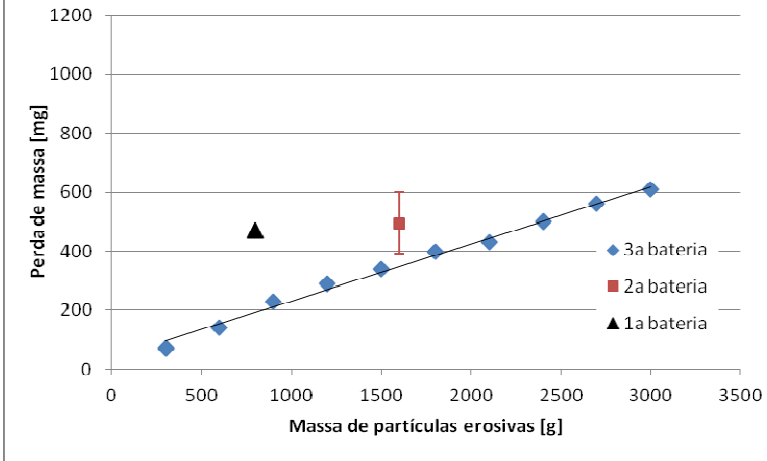
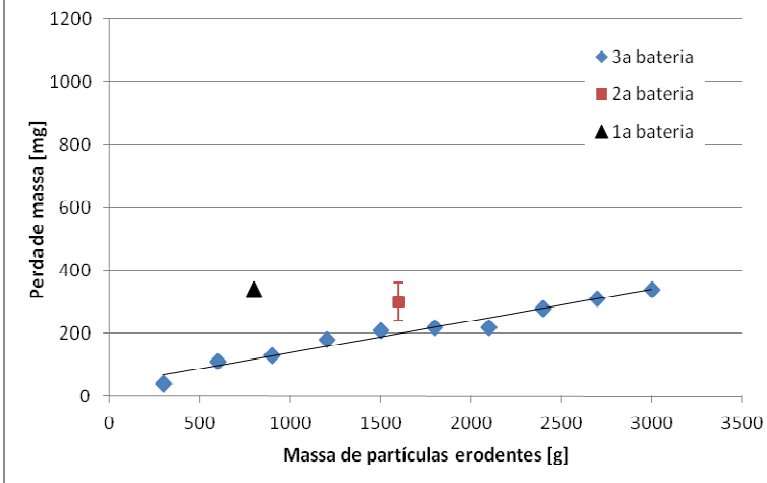


Figura 4.1 - Perda de massa em função do tempo de ensaio para três velocidades de impacto (300 g de partículas por etapa de ensaio).

Uma comparação entre as três baterias de ensaio foi realizada, conforme apresentado na Tabela 4.1. Nota-se uma diferença marcante e repetitiva entre a taxa de desgaste medida em intervalos mais curtos de pesagem (3ª bateria) em comparação com as medidas com intervalos mais longos (1ª e 2ª bateria). Nos gráficos (perda de massa x massa de partículas abrasivas), a taxa de desgaste mássica pode ser representada pelo ângulo de inclinação da reta, conforme mostrado no gráfico para a velocidade de 67 m/s (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Relações entre a perda de massa pela massa de partículas erodentes para três velocidades de impacto.

| Velocidade de impacto | Perda de massa x massa de partícula erodente |
|-----------------------|---|
| 67 m/s |  <p>The graph for 67 m/s shows a linear relationship between the mass of eroding particles (x-axis, 0 to 3500 g) and the mass loss (y-axis, 0 to 1200 mg). Three data series are shown: 3a bateria (blue diamonds), 2a bateria (red squares), and 1a bateria (black triangles). The 3a bateria series shows the highest mass loss for a given mass of eroding particles, followed by 2a and then 1a. The angles θ_1, θ_2, and θ_3 represent the slopes of these three series, with θ_1 being the steepest and θ_3 the shallowest.</p> |
| 57 m/s |  <p>The graph for 57 m/s shows a linear relationship between the mass of eroding particles (x-axis, 0 to 3500 g) and the mass loss (y-axis, 0 to 1200 mg). Three data series are shown: 3a bateria (blue diamonds), 2a bateria (red squares), and 1a bateria (black triangles). The 3a bateria series shows the highest mass loss for a given mass of eroding particles, followed by 2a and then 1a. The 1a bateria data point at approximately 800 g eroding particles and 480 mg mass loss is an outlier above the main trend line.</p> |
| 45 m/s |  <p>The graph for 45 m/s shows a linear relationship between the mass of eroding particles (x-axis, 0 to 3500 g) and the mass loss (y-axis, 0 to 1200 mg). Three data series are shown: 3a bateria (blue diamonds), 2a bateria (red squares), and 1a bateria (black triangles). The 3a bateria series shows the highest mass loss for a given mass of eroding particles, followed by 2a and then 1a. The 1a bateria data point at approximately 800 g eroding particles and 350 mg mass loss is an outlier above the main trend line.</p> |

É possível notar que, para qualquer velocidade da partícula, a perda de massa (desgaste) é menor quando se interrompe o ensaio periodicamente para fazer a medição da perda de massa (3ª bateria) do que quando a pesagem é feita somente no final do ensaio (1ª e 2ª baterias). Este comportamento pode ser atribuído a um efeito da temperatura, que ao aumentar pode provocar diminuição na resistência ao desgaste das amostras (LINDSLEY e MARDER, 1999).

Nota-se que a dispersão dos resultados de perda de massa para a segunda bateria de ensaios (com quatro repetições para cada velocidade de impacto) apresentou valores aceitáveis, com maior dispersão de aproximadamente 20% observada para a velocidade de 57 m/s. Essa variação nos valores de desgaste é esperada devido a fatores inerentes ao ensaio, como a oscilações de fluxo de partículas, concordando com a literatura (ZHANG *et. al.*, 2001), (LINDSLEY e MARDER, 1999), (SHIPWAY e HUTCHINGS, 1994).

A taxa de desgaste apresentou tendência de aumento com a velocidade de impacto, conforme apresentaram (LINDSLEY e MARDER, 1999), (HUTCHINGS, 1992). A principal força envolvida no processo de desgaste erosivo é proveniente da energia cinética das partículas, influenciada fortemente pela velocidade de impacto. Quanto maior a energia cinética das partículas erosivas, maior a taxa de desgaste registrada, conforme os resultados apresentados na Figura 4.2. O Apêndice B apresenta tabela com todos os resultados da perda de massa e taxa de desgaste das amostras desgastadas neste trabalho.

Para a configuração adotada nestes ensaios, com ângulo de impacto de 30° e amostra com comportamento dúctil, o mecanismo de desgaste mais atuante, o corte, tem sua capacidade de remoção de material intensificada com o aumento da velocidade. Uma das causas deste aumento na capacidade do corte está relacionada ao aumento da componente normal da força de impacto (comparando com a abrasão a dois corpos), que proporciona uma maior profundidade de penetração da partícula erodente, concordando desta forma com o que é apresentado por HUTCHINGS (1992).

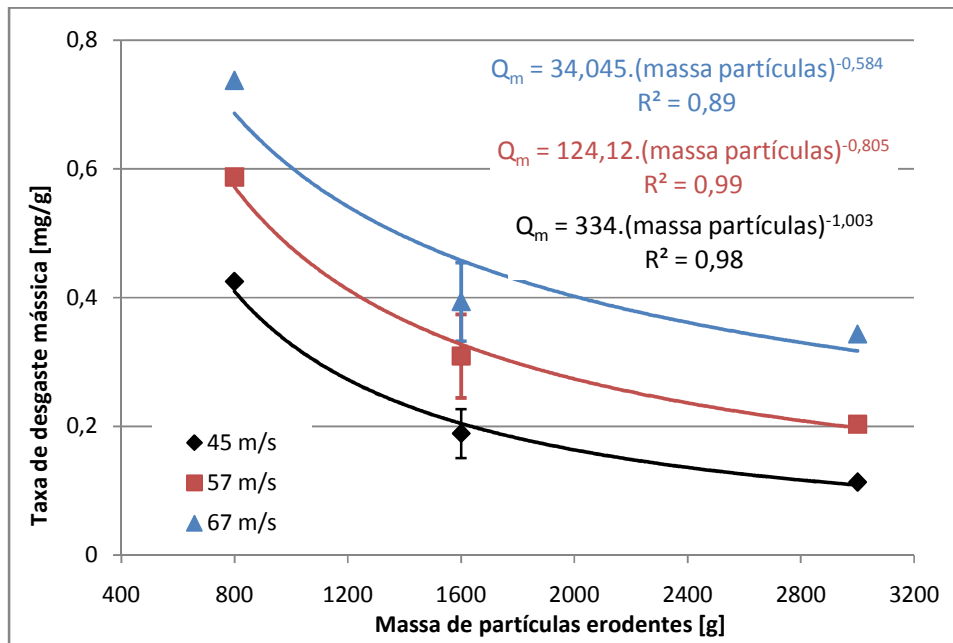


Figura 4.2 - Taxa de desgaste mássica pelo tempo de ensaio para três velocidades de impacto.

A taxa de desgaste mássica tende a diminuir com o decorrer do ensaio, conforme observado pelas linhas de tendência traçadas para cada velocidade de impacto das partículas e pelos gráficos apresentados na Tabela 4.1. Este comportamento, em geral, é correlacionado com o aumento da resistência mecânica da amostra que, em geral, é provocado pela ocorrência do fenômeno do encruamento. O encruamento ocorreria após sucessivas deformações plásticas provocadas pelo impacto das partículas e pode ser correlacionado com o aumento no valor da dureza na região superficial afetada.

O perfil de microdureza das amostras, desgastadas por 3000 gramas de partículas erodentes, pode ser observado na Figura 4.3. É possível observar que não foi comprovada, mediante o uso da técnica de medição do perfil de microdureza, a elevação da resistência mecânica do aço carbono a partir da superfície erodida.

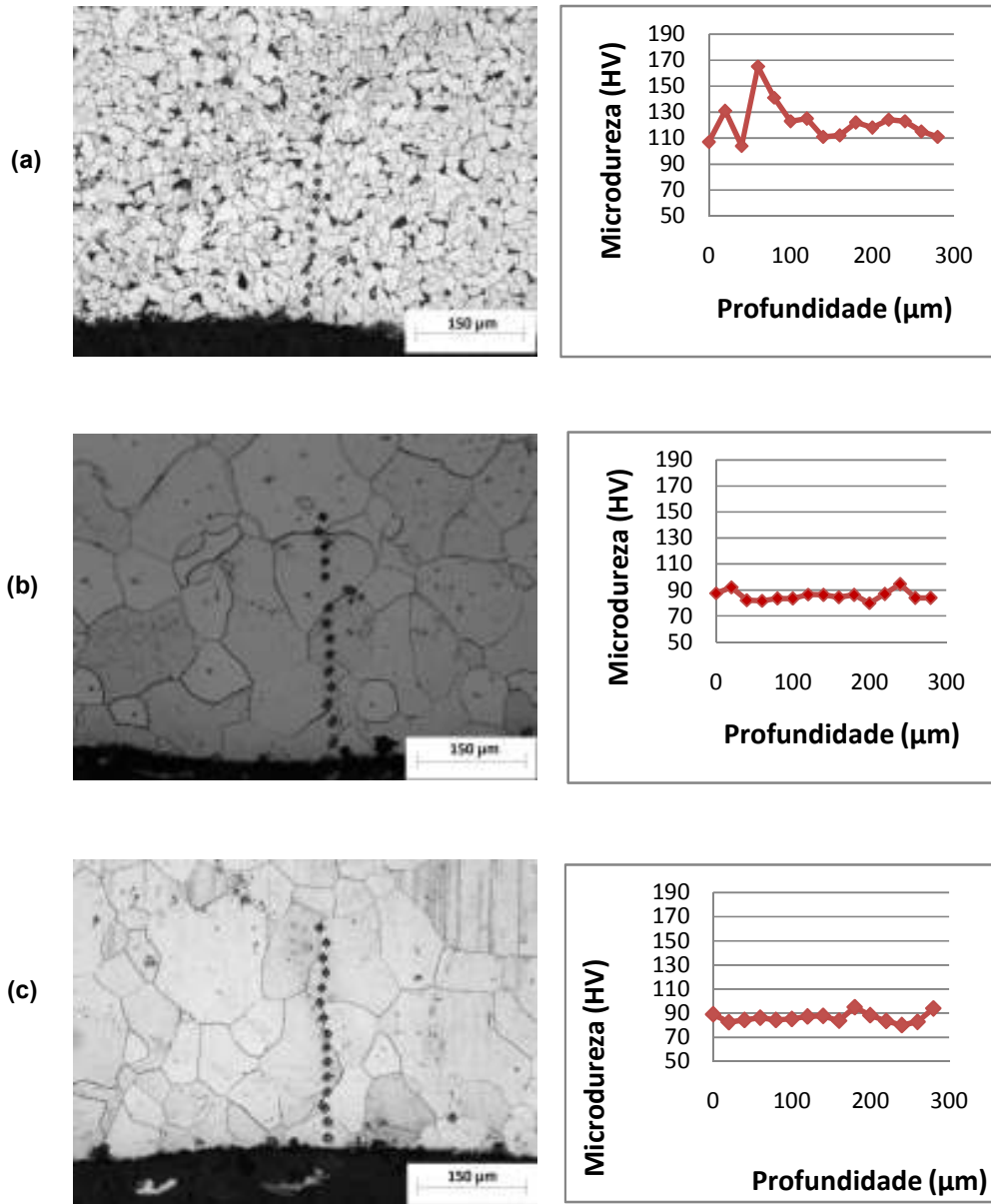


Figura 4.3 - Marcas das identações provocadas pelas medições de microdureza Vickers e o perfil com os valores obtidos para amostras erodidas por 3000g de partículas erodentes com velocidades de impacto de: (a) 67 m/s (CP10), (b) 57 m/s (CP11) e (c) 45 m/s (CP12).

Ao observar a microestrutura da Figura 4.3 (a) nota-se uma grande diferença para o material adotado como base para a realização dos ensaios, cuja microestrutura está apresentada na Figura 3.3. Este material apresenta grãos menores e a presença da estrutura lamelar de perlita, composta por ferrita e cementita (ver Figura 4.4). Esta estrutura proporciona ao material uma maior resistência mecânica, que será refletida nos valores de dureza.

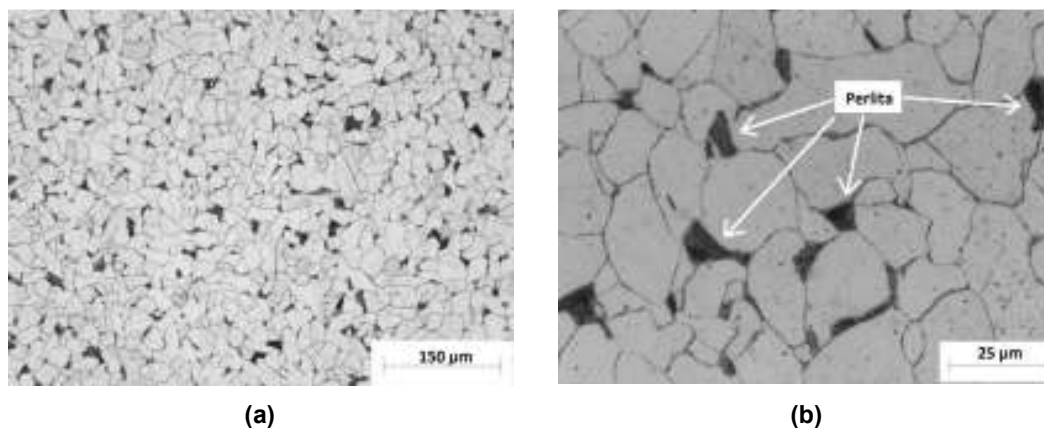


Figura 4.4 - Caracterização das amostras com maior teor de carbono. (a) Microestrutura e (b) microestrutura ampliada com indicação da estrutura perlítica.

O pico observado no perfil de microdureza da Figura 4.3 (a), na marca de indentação em cima de um grão de perlita, indica um maior teor de carbono na estrutura, característica da cementita presente na estrutura lamelar da perlita.

Com o objetivo de verificar se mais amostras possuem esta estrutura, foi realizada medição de dureza em todas as amostras. Das dezoito amostras erodidas, três possuem maior teor de carbono (CP 10, CP13 e CP18), constatado nas medições de dureza, apresentando valor médio de 104,3 HV. Apesar do cuidado tomado na compra da matéria-prima em um só lote, o fornecedor acabou enviado dois materiais diferentes. Isto reforça a necessidade de caracterizar todos os materiais utilizados em trabalhos científicos. Na Tabela 4.2 estão listados os resultados dos ensaios de desgaste obtidos para as amostras com dureza mais elevada. Observações referentes à influência destas amostras nos resultados de desgaste serão feitas conforme a necessidade.

Tabela 4.2 - Resultados dos parâmetros do processo de desgaste erosivo para as amostras com valor de dureza elevado.

| Amostra | Bateria de ensaio | Massa de partículas [g] | Velocidade impacto [m/s] | Perda de massa [mg] | Taxa de desgaste mássica [mg/g] | Tempo de ensaio [min] | Fluxo partículas [g/min] | Taxa de desgaste [mg/min] |
|---------|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| CP 10 | 3ª | 3000 | 67 | 1030 | 0,34 | 16,19 | 185,3 | 63,62 |
| CP 13 | 2ª | 1600 | 45 | 330 | 0,21 | 7,68 | 208,38 | 42,98 |
| CP 18 | 2ª | 1600 | 45 | 230 | 0,14 | 7,77 | 205,8 | 29,58 |

Outra hipótese para justificar a redução na taxa de desgaste com o tempo de ensaio seria a presença de partículas de alumina aderidas na superfície da amostra.

Pela análise morfológica, através de microscopia eletrônica de varredura, não foi constatada a presença de partículas de alumina, comprovada por uma análise de EDS em algumas regiões, que não indicou o alumínio como principal componente, conforme indicado na Figura 4.5.

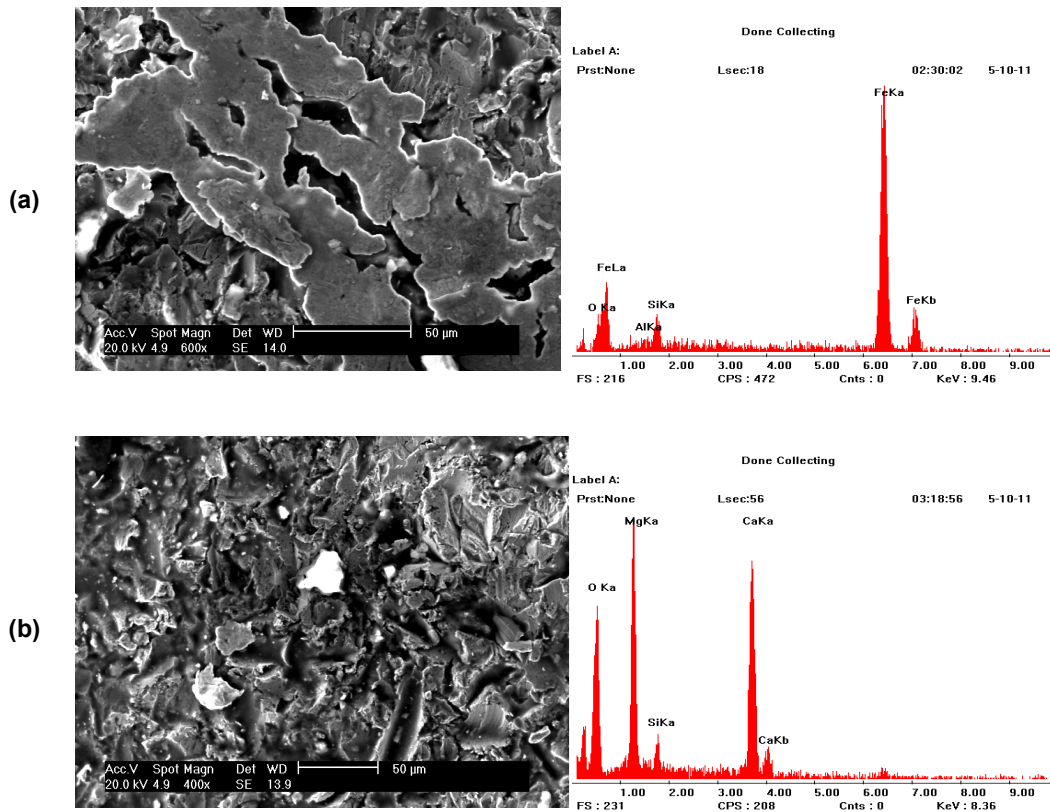


Figura 4.5 - Fotografias obtidas por MEV e espectro de EDS de amostras erodidas por 3000g de abrasivo a velocidades de impacto de (a) 57 m/s e (b) 67 m/s.

O material ensaiado por EDS mostrado na Figura 4.5 (a) é uma placa de material (detrito) arrancado durante o processo erosivo e a partícula (branca) da Figura 4.5 (b) também é proveniente da amostra, provavelmente uma impureza ou um óxido. As amostras não passaram por um processo mecânico de preparação superficial, como retífica ou fresamento. Isso significa que existe uma camada de óxido na superfície que é arrancada com maior facilidade pelas partículas erodentes, no início do ensaio.

A taxa de desgaste apresenta uma correlação com a velocidade de impacto das partículas através da equação 2.2, onde o expoente n é uma constante obtida experimentalmente. A Figura 4.6 apresenta o gráfico utilizado para determinar a

correlação entre a taxa de desgaste e a velocidade de impacto. O coeficiente n é representado pelo expoente da equação exponencial de ajuste dos dados. Para as condições erosivas adotadas nos ensaios deste trabalho, o valor de n é de 1,92.

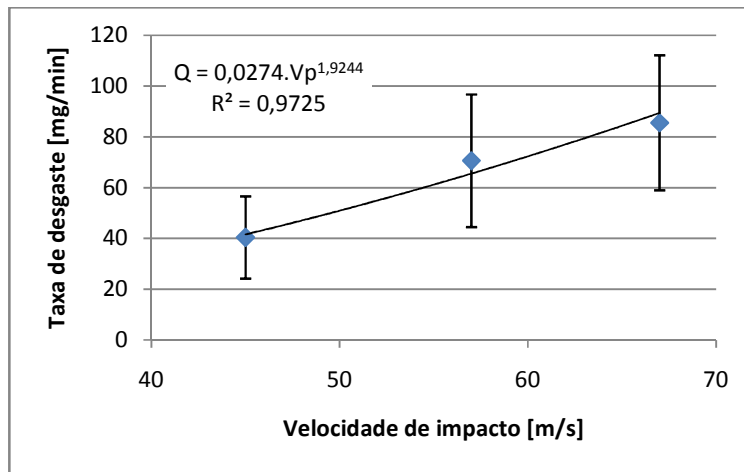


Figura 4.6 - Taxa de desgaste pela velocidade de impacto das partículas. Valores médios obtidos a partir de seis ensaios realizados para cada velocidade de impacto.

O valor obtido para o coeficiente “n” é próximo a 2 (dois), concorda com a energia cinética das partículas que variam com o quadrado da velocidade. Este resultado indica que a variação do parâmetro velocidade das partículas influencia exponencialmente a taxa de desgaste, comprovando a energia cinética como a principal fonte de energia envolvida neste sistema tribológico.

Os valores do expoente n obtidos por LINDSLEY e MARDER (1999) foram superiores aos obtidos nestes ensaios (ver Figura 2.2), atribuído ao fato do ângulo de impacto e das propriedades mecânicas das amostras serem diferentes.

A Figura 4.7 apresenta os resultados da variação da taxa de desgaste em função da velocidade de impacto para as três quantidades de partículas utilizadas nos ensaios. Nota-se uma diferença entre as taxas de desgaste e o coeficiente “n”. O efeito da temperatura pode justificar este comportamento, porém mais ensaios, com maiores tempos de exposição ao desgaste e diferentes velocidades de impacto devem ser conduzido para comprovar esta hipótese.

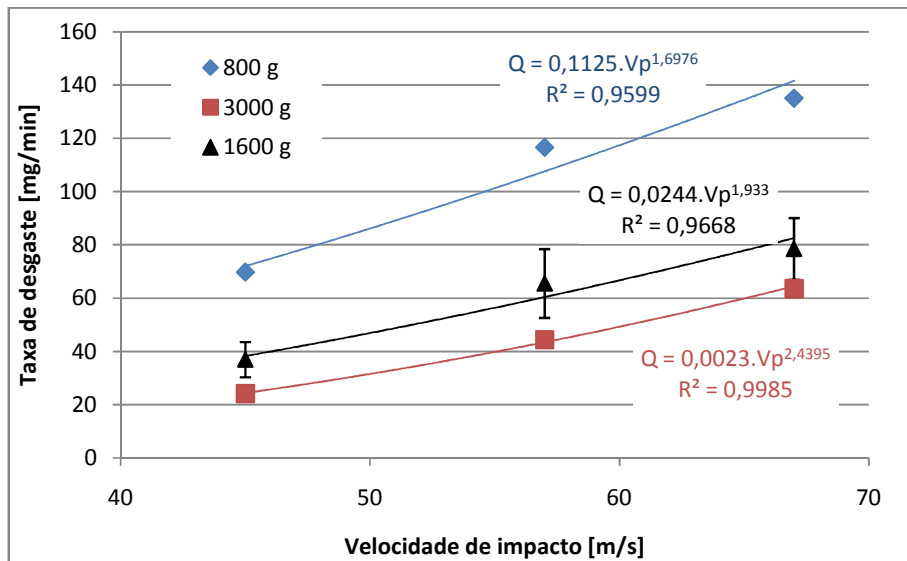


Figura 4.7 - Variação da taxa de desgaste em função da velocidade de impacto para as diferentes quantidades de partículas utilizadas nos ensaios.

4.1.2 Mecanismos de desgaste

A morfologia da amostra erodida traz informações muito relevantes para a caracterização dos mecanismos de dano presentes no desgaste erosivo. A análise da superfície erodida foi realizada através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Segundo HUTCHINGS (1992), partículas angulares, com dureza elevada em relação à amostra ($H_a/H_s = 29,8$), colidindo a baixos ângulos de impacto (próximos a 20 graus), provocam desgaste pelo mecanismo de corte. Nas fotografias apresentadas será evidenciado que outros mecanismos de dano, além do corte, estão presentes no desgaste erosivo dos ensaios realizados neste trabalho. A Figura 4.8 apresenta uma fotografia de uma amostra erodida por partículas angulares impactando a amostra a 67 m/s de velocidade média.

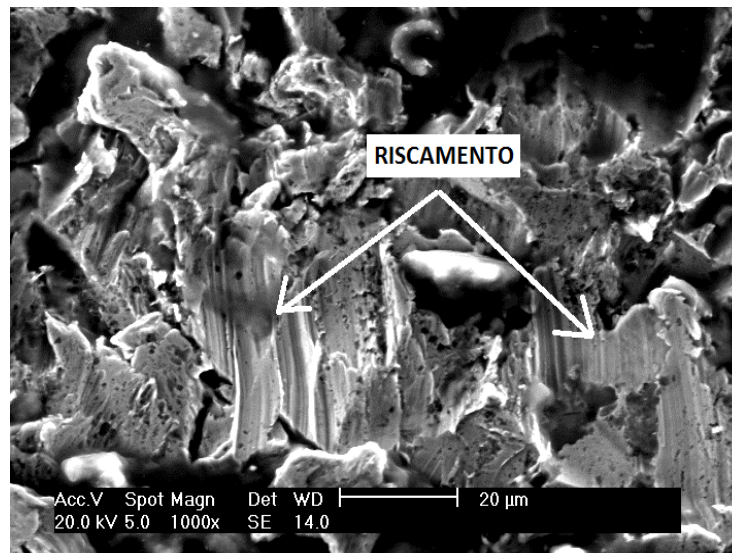


Figura 4.8 - Fotografia obtida por MEV de amostra erodida por partículas angulares, com ângulo e velocidade de impacto de 30 graus e 67 m/s, respectivamente, por aproximadamente 8 minutos.

Nota-se a presença de marcas de riscamento e ranhuras, provenientes de partículas atingindo a amostra a ângulos muito baixos, provavelmente menores de 20 graus. Nestas condições, a componente tangencial da força de impacto torna-se a principal fonte de energia responsável pelo mecanismo de desgaste. Este mecanismo de corte no desgaste erosivo assemelha-se muito à abrasão a dois corpos.

O ângulo ajustado entre a amostra e o tubo de aceleração foi de 30 graus, porém isto não garante que todas as partículas colidam a este ângulo. Fatores como a rugosidade da parede interna do tubo de aceleração e a interação entre as partículas durante o escoamento do fluxo (ar mais partículas) provocam uma dispersão na trajetória das partículas ao sair do tubo de aceleração, conforme ilustração da Figura 2.12. Estes fatores, ao provocar variação no ângulo de impacto, são a principal causa da presença dos diferentes mecanismos de dano nas amostras desgastadas nos experimentos deste trabalho.

A Figura 4.9 apresenta uma região do corpo de prova desgastada pelo mecanismo de corte, propiciado pelo aumento da componente normal da força de impacto. Este ocorre a ângulos mais próximos ao valor ajustado entre a amostra e o tubo de aceleração (30 graus) e somente por partículas angulares.

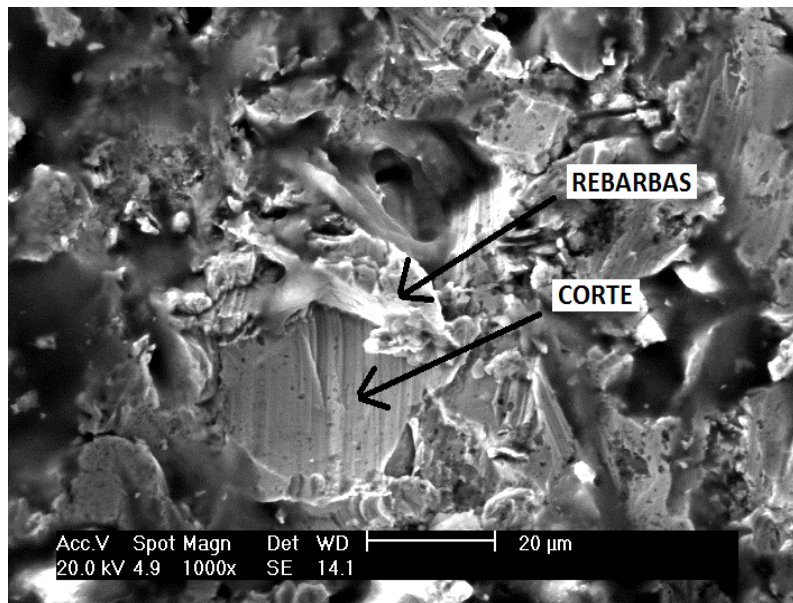


Figura 4.9 - Fotografia obtida por MEV de amostra erodida por partículas angulares, com ângulo e velocidade de impacto de 30 graus e 67 m/s, respectivamente, por aproximadamente 8 minutos.

No desgaste erosivo provocado pelo corte, as partículas erodentes arrancam lascas de material, podendo estas ser arrancadas no primeiro impacto ou, formarem rebarbas (Figura 2.10 b), que serão arrancadas por partículas subseqüentes que irão colidir com a amostra.

Partículas atingindo a amostra a ângulos próximos a 30 graus irão, através do mecanismo de deformação plástica, formar um sulco na superfície, deixando rebarbas nas bordas do sulco provocado pela partícula. A fotografia apresentada na Figura 4.10 mostra uma região com a presença deste mecanismo de desgaste.

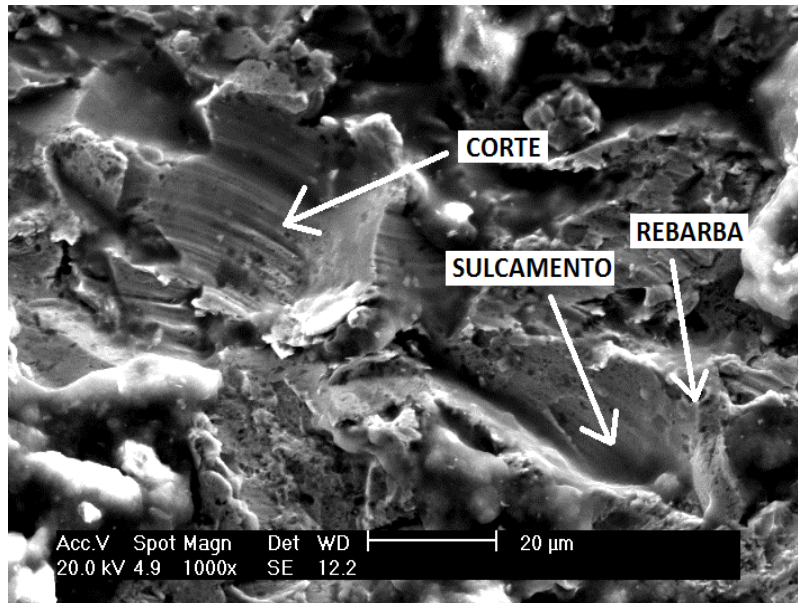


Figura 4.10 - Fotografia obtida por MEV de amostra erodida por partículas angulares, com ângulo e velocidade de impacto de 30 graus e 67 m/s, respectivamente, por aproximadamente 16 minutos.

4.2 DESGASTE x EMISSÃO ACÚSTICA

Serão apresentadas correlações entre os principais parâmetros do ensaio de desgaste erosivo e os dados de emissão acústica coletados, avaliando qualitativamente a eficiência de cada parâmetro de EA para detectar o desgaste.

As principais fontes de EA presentes no desgaste erosivo podem ser divididas em dois grupos: provenientes do fluxo de ar e das partículas erodentes. O fluxo de ar escoando sobre a superfície da amostra gera sinais acústicos pela perda de energia e recirculação de ar nos vórtices, conforme ilustrado na Figura 4.11.

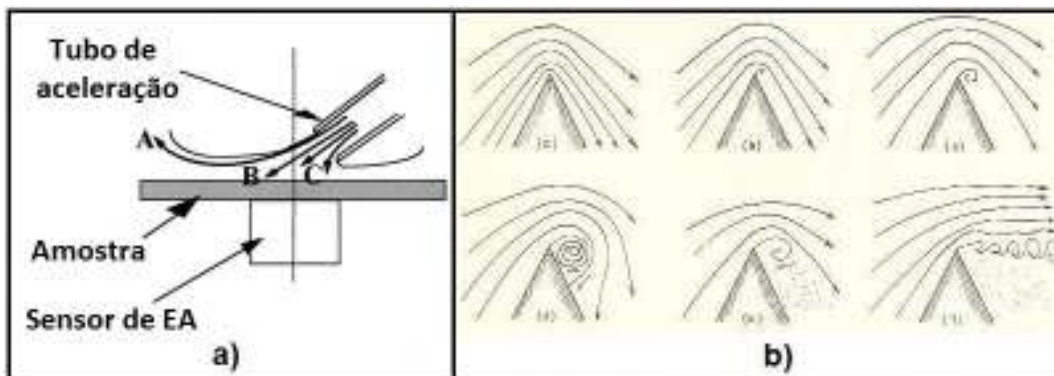


Figura 4.11 - Ilustrações do escoamento do fluxo de ar sobre a amostra (a) e a formação dos vórtices nos picos de rugosidade (b) (TIBONI *et. al.*, 2009).

Na Figura 4.11 (a), as partes do fluido que tem uma trajetória do tipo C são retardadas pela camada da superfície hidrodinâmica e sofrem uma obstrução do fluido devido à presença de uma zona de estagnação (FERRER *et. al.*, 1999). A parte com o caminho dos tipos A e B fluem para os vórtices gerando ondas acústicas devido à recirculação do ar (Figura 4.11 b).

TIBONI *et. al.* (2009) realizaram estudos preliminares para avaliar os sinais de EA provenientes do escoamento de ar comprimido sobre amostras de aço com acabamento superficial jateado, com as mesmas velocidades do ar e o mesmo ângulo entre a amostra e o tubo de aceleração utilizados nesta dissertação. Os valores médios dos parâmetros de EA obtidos nos ensaios realizados sem e com partículas erodentes estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros de EA obtidos para ensaios realizados com e sem partículas erosivas.

| | Velocidade do ar [m/s] | Amplitude [dB] | RMS [V] | Limiar de referência [dB] |
|--|---------------------------|-------------------|------------|---------------------------------|
| Sem partículas erodentes TIBONI <i>et. al.</i> (2009) | 58,21 | 52 | 0,019 | 51 |
| | 116,43 | 59 | 0,009 | 56 |
| Com partículas erodentes * | 58,21 | 61 | 0,024 | 59 |
| | 116,43 | 68 | 0,059 | 65 |

* Valores médios obtidos dos ensaios realizados neste trabalho.

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 indicam que os sinais de EA provenientes do escoamento do ar sobre a superfície da amostra não estão sendo coletados nos ensaios com partículas, pois o *threshold* utilizado está acima do valor médio de amplitude do escoamento do ar para os ensaios sem partículas. Vale ressaltar que o parâmetro RMS é independente do *threshold*, portanto é sensível às fontes de sinal provenientes do escoamento do ar e das partículas erodentes.

As principais fontes de sinais acústicos referentes às partículas erodentes estão apresentadas na ilustração da Figura 4.12.

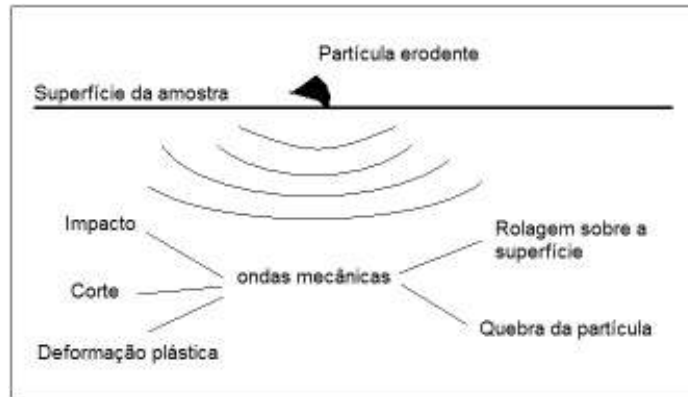


Figura 4.12 - Fontes de emissão acústica provenientes da partícula erodente.

O sinal acústico proveniente dos mecanismos de dano (impacto, corte e indentação) pode estar associado à nucleação e propagação de microtrincas no material, sinal acústico bem caracterizado pela aplicação da técnica de EA para detecção de trincas em vasos de pressão metálicos. Este sinal apresenta um pico de tensão elevado (parâmetro amplitude) e um amortecimento relativamente rápido (TIBONI *et. al.*, 2011). Pode-se correlacionar este sinal com o sinal acústico da quebra de mina de grafite (padrão de calibração) sobre a superfície, como se a propagação da trinca correspondesse a várias quebras de grafite em seqüência.

Ao avaliar amostras da forma de onda do sinal e os parâmetros de contagem e tempo de subida, nota-se que o sinal acústico não apresenta estas características. Supõe-se que os sinais acústicos coletados pelo sensor são provenientes de várias fontes e não somente do mecanismo de corte. A Figura 4.13 apresenta uma onda coletada dos ensaios com partículas erodentes e a Figura 4.14 mostra a transformada rápida de Fourier (FFT) desta onda.

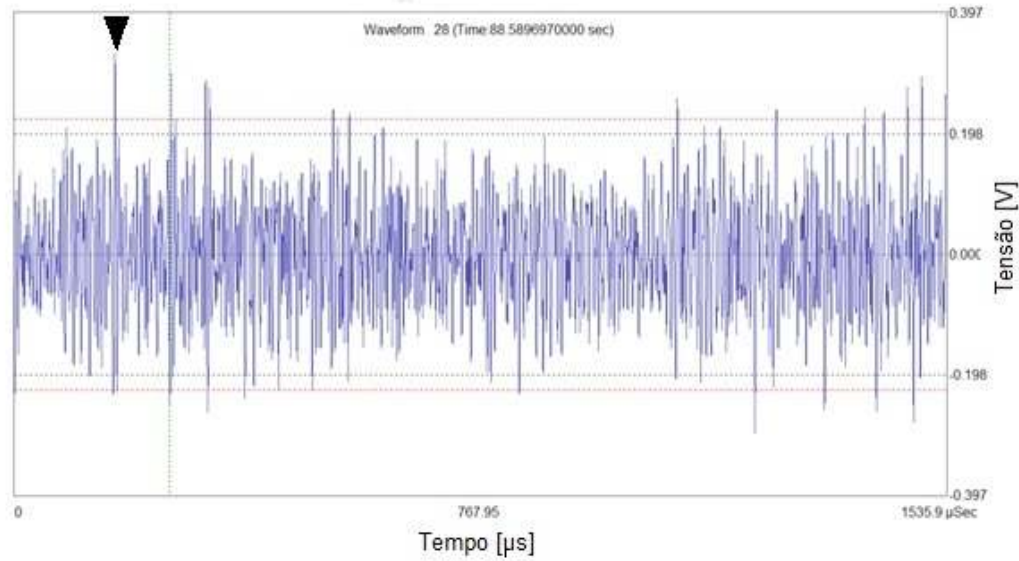


Figura 4.13 - Onda de emissão acústica coletada durante ensaio de desgaste erosivo com velocidade de impacto de 67 m/s. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal.

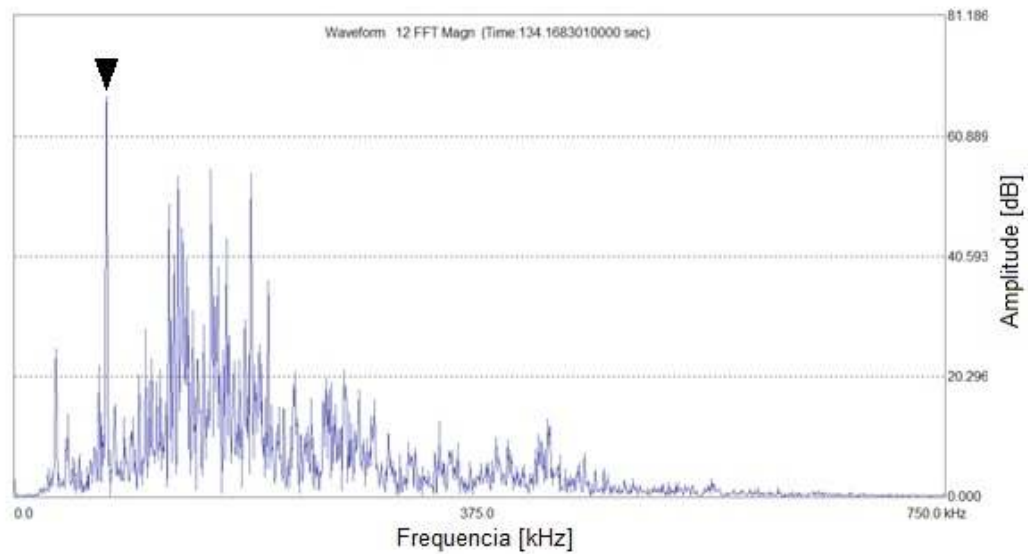


Figura 4.14 - Transformada rápida de Fourier (FFT) do sinal acústico da Figura 4.13. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal.

Nota-se que o pico de tensão no sinal não se destaca dos demais picos (Figura 4.13) e, analisando a transformada de Fourier, conclui-se que a faixa de frequência do sensor entre 30 e 300 kHz (aproximadamente) apresenta maior sensibilidade aos sinais coletados nos ensaios.

Um parâmetro de grande importância, que pode auxiliar na utilização de sinais de EA em ensaios de erosão é a taxa de aquisição de sinais. Como pode ser observado no gráfico da Figura 4.15 a quantidade de sinais de emissão acústica coletados foi proporcional à quantidade de partículas que colidiram com a amostra.

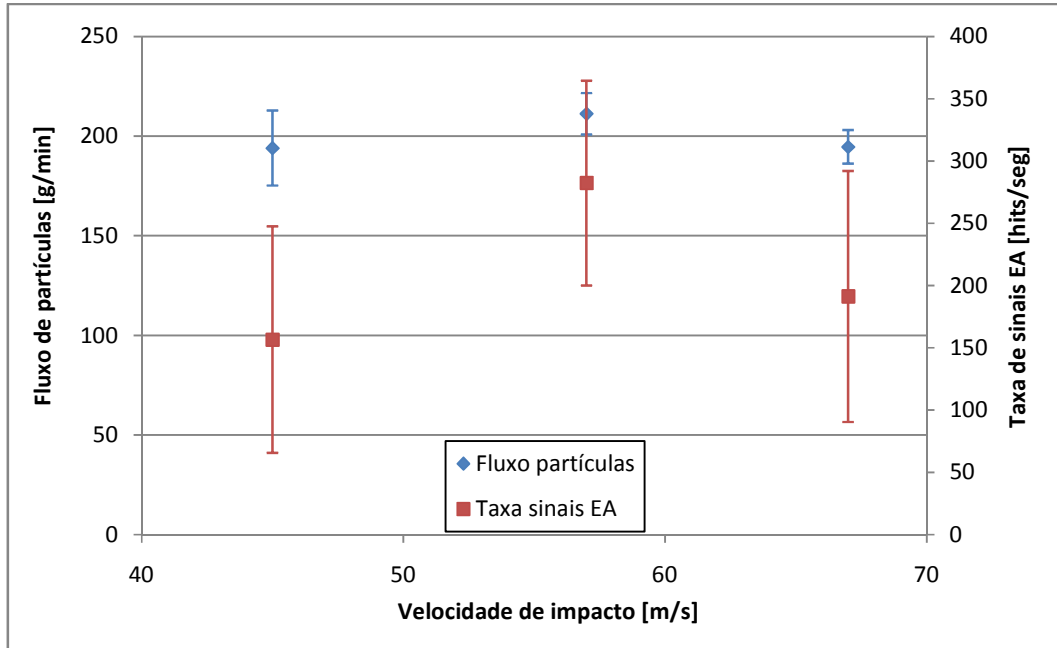


Figura 4.15 - Fluxo de partículas e taxa de sinais de EA em função da velocidade de impacto para 45, 57 e 67 m/s.

Esta proporcionalidade observada sugere que as fontes de sinais de emissão acústica mais sensíveis ao sistema de aquisição de dados estão correlacionadas aos fenômenos ligados às partículas erodentes, como o impacto, corte, deformação plástica e arrancamento de material. A variação na energia cinética das partículas, que provoca aumento na taxa de desgaste, não varia a quantidade de sinais de EA gravados pelo sistema. A dispersão na taxa de sinais de EA pode estar associada à variação no fluxo de partículas erodentes, principal fonte de sinais para este sistema.

4.2.1 Relação do sinal de EA com a velocidade de impacto

O parâmetro RMS e a taxa de desgaste apresentaram tendência semelhante em relação à velocidade de impacto das partículas, conforme mostrado na Figura 4.16.

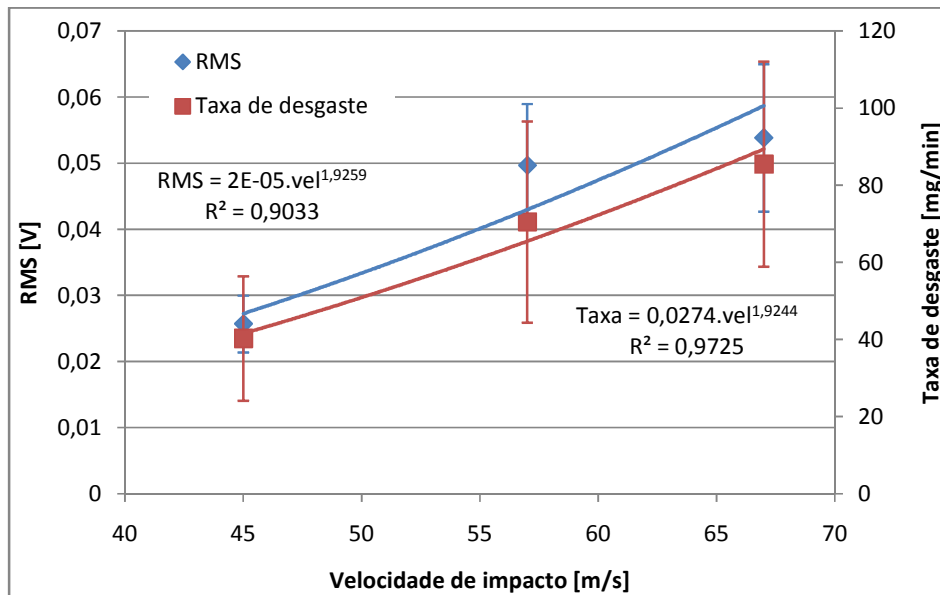


Figura 4.16 – Variação do RMS e da taxa de desgaste pela velocidade de impacto. Valores médios de seis ensaios realizados para cada velocidade: 45, 57 e 67 m/s.

Este comportamento do RMS em relação à velocidade de impacto sugere que este parâmetro é sensível à variação de energia envolvida no processo erosivo, sendo a energia cinética da partícula a mais expressiva neste sistema tribológico. O parâmetro RMS também varia exponencialmente com a velocidade do fluxo de ar comprimido, sem a presença de partículas erosivas, conforme estudo realizado por TIBONI *et. al.* (2009). A Figura 4.17 apresenta os resultados de RMS em função da velocidade do fluido na saída do tubo de aceleração. A amostra utilizada nestes ensaios teve a superfície jateada, acabamento semelhante à superfície desgastada por erosão.

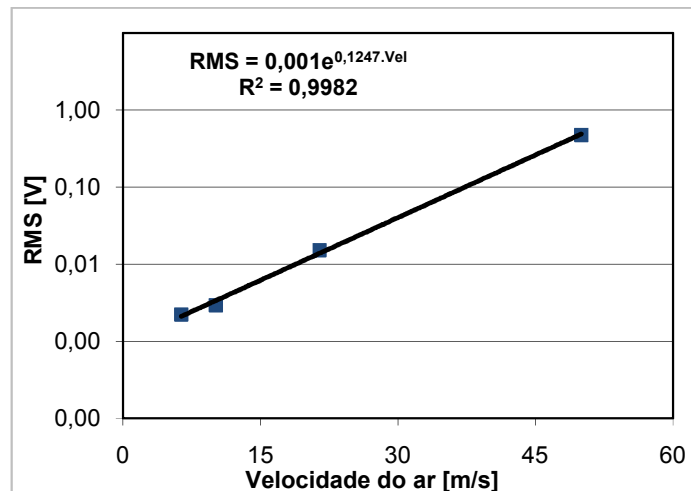


Figura 4.17 - Gráfico de tendência dos sinais de EA (RMS) em função da velocidade do fluxo de ar, sem partículas erosivas (TIBONI et. al., 2009).

Pode-se concluir que o parâmetro RMS apresenta uma boa sensibilidade às variáveis relativas à variação de energia cinética envolvidas no desgaste erosivo, sendo uma boa referência para avaliar o desgaste pela técnica de EA.

O parâmetro amplitude também apresentou sensibilidade à variação da velocidade de impacto das partículas, apresentando tendência de aumento com a velocidade. A amplitude representa uma medida da magnitude do sinal de EA, retratando o maior valor de tensão (pico) do sinal. A Figura 4.18 apresenta o gráfico da variação da amplitude com a velocidade das partículas.

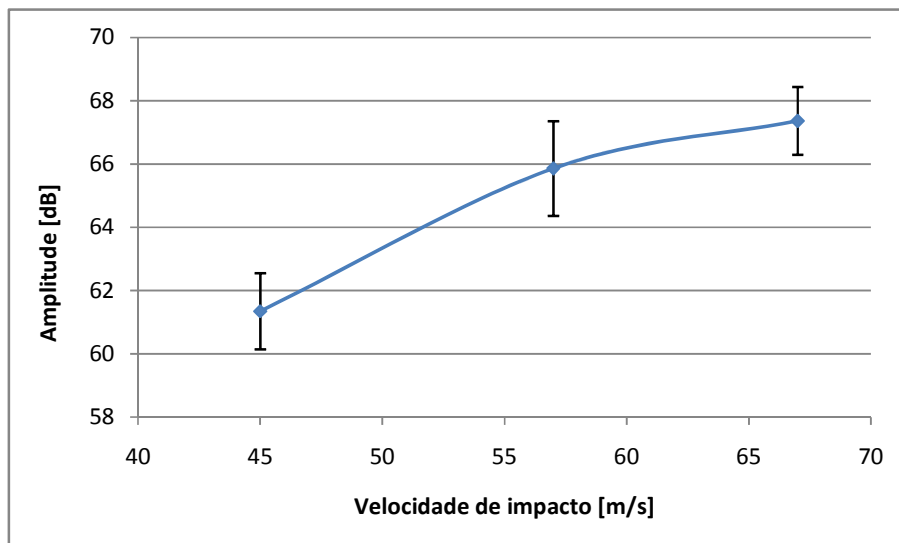


Figura 4.18 - Variação da amplitude [dB] pela velocidade de impacto [m/s]. Valores médios para seis ensaios realizados em cada velocidade.

A tendência de aumento da intensidade do sinal com a velocidade de impacto pode ser notada também pela forma de onda do sinal. Observando a ordenada dos

gráficos apresentados nas Figura 4.13, Figura 4.19 e Figura 4.20 pode-se notar o aumento da tensão do sinal.

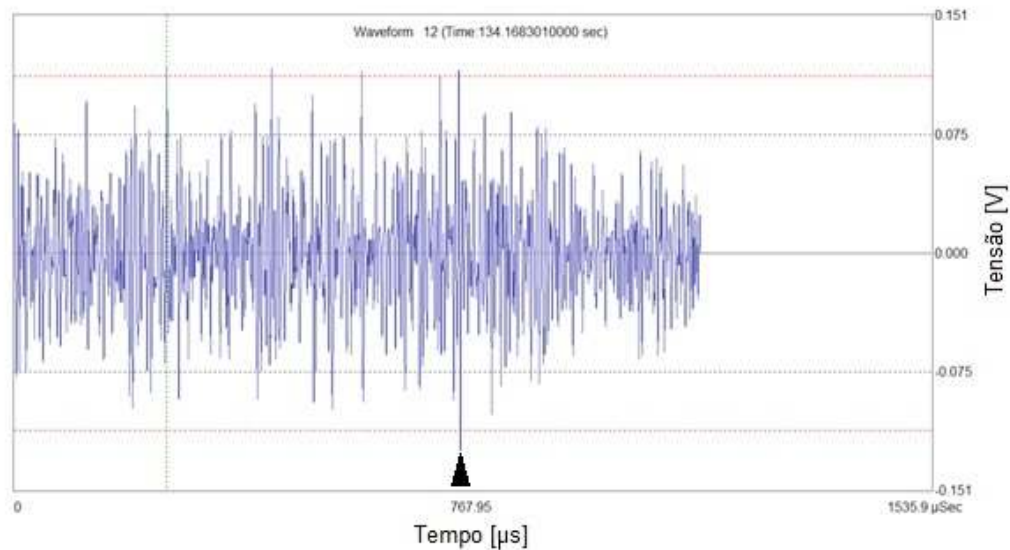


Figura 4.19 - Onda de emissão acústica coletada durante ensaio de desgaste erosivo com velocidade de impacto de 45 m/s. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal.

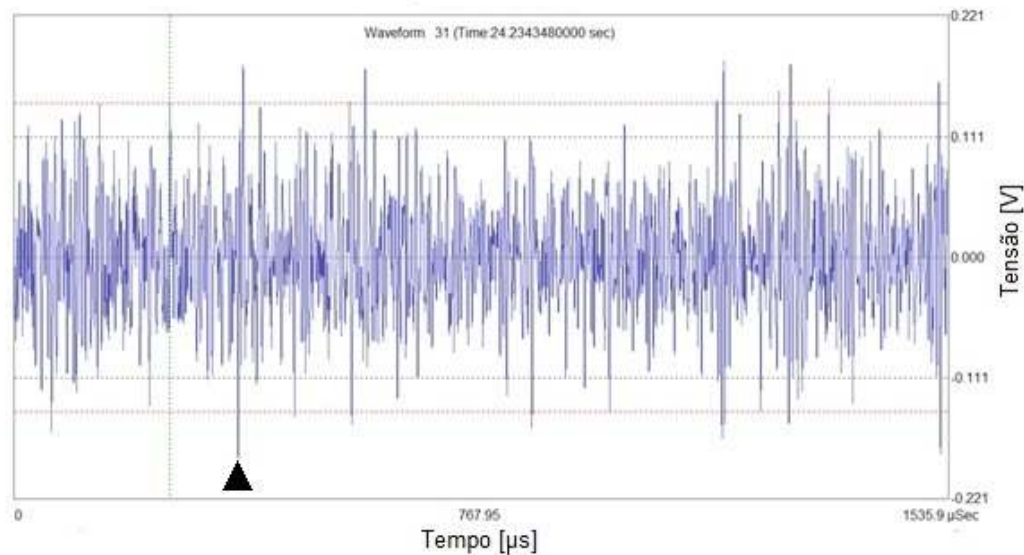


Figura 4.20 - Onda de emissão acústica coletada durante ensaio de desgaste erosivo com velocidade de impacto de 57 m/s. O triângulo indica o pico de amplitude do sinal.

Alguns parâmetros de EA relacionados à base de tempo do sinal, apresentaram sensibilidade à quantidade de partículas colidindo com a amostra, correlacionando com a variação do fluxo de partículas. A tendência de variação da contagem de picos e da duração do sinal em função da velocidade de impacto pode

ser observada na Figura 4.21. Nota-se a semelhança com o fluxo de partículas (ver Figura 4.15).

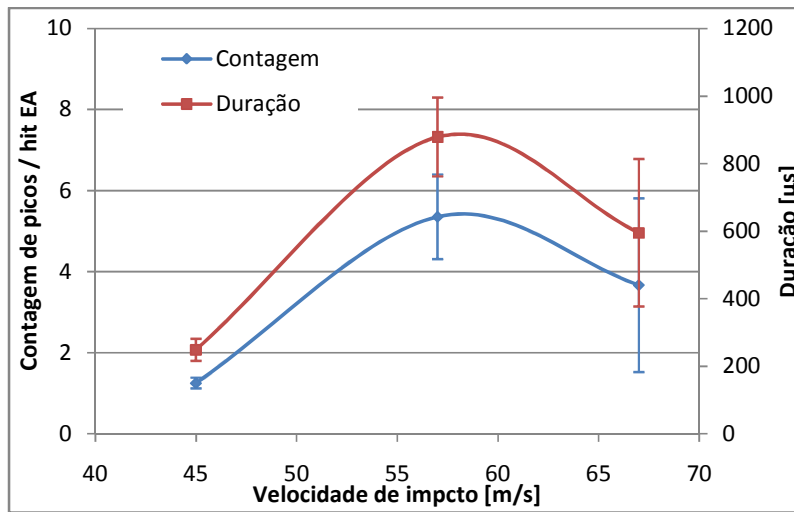


Figura 4.21 - Variação da contagem de picos de EA e da duração do sinal pela velocidade de impacto. Valores médios obtidos em seis ensaios realizados para cada velocidade.

A variação destes parâmetros com a taxa de sinais de EA pode estar correlacionada com o aumento no número de fontes de sinais (maior número de partículas impactando) em um mesmo período de tempo. Com isso, cada sinal (*hit* de EA) representará um número maior de fontes de sinais, ou seja, trará informação do impacto de mais partículas (ou múltiplos cortes) em um mesmo sinal.

A energia do sinal, apresentada em pico Joules (10^{-12} J) e o tempo de subida também mostraram maior sensibilidade à quantidade de partículas colidindo a amostra, conforme a Figura 4.22. Para a configuração utilizada nestes ensaios, onde o ângulo de impacto é de 30° , a quantidade de partículas erodentes impactando com a superfície da amostra é diretamente proporcional à capacidade de provocar desgaste, assim estes parâmetros podem ser utilizados para quantificar o desgaste.

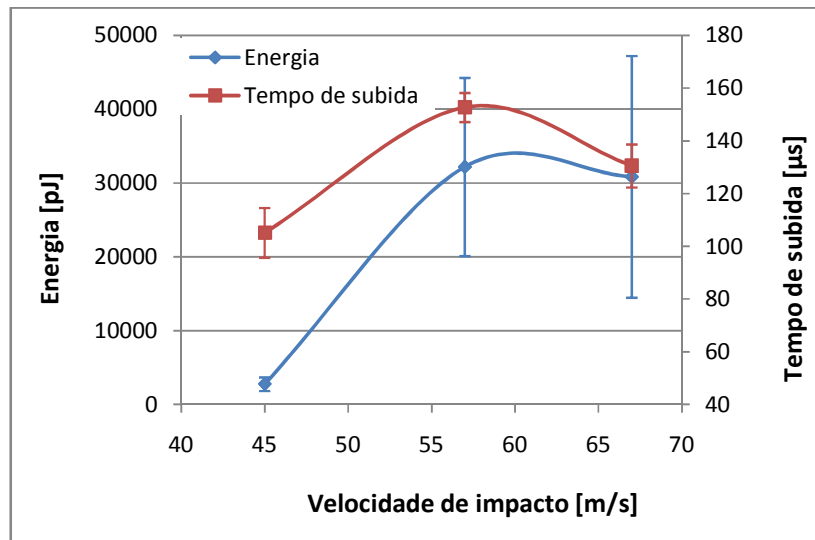


Figura 4.22 - Variação da energia do sinal e do tempo de subida pela velocidade de impacto. Valores médios obtidos em seis ensaios realizados para cada velocidade.

4.2.2 Relação do sinal de EA com a taxa de desgaste

O parâmetro RMS apresentou uma tendência linear com a taxa de desgaste conforme apresentado no gráfico da Figura 4.23. Os valores impressos no gráfico correspondem ao valor médio do RMS para cada ensaio e os pontos marcados em vermelho às amostras com dureza mais elevada (CP10, CP13 e CP18).

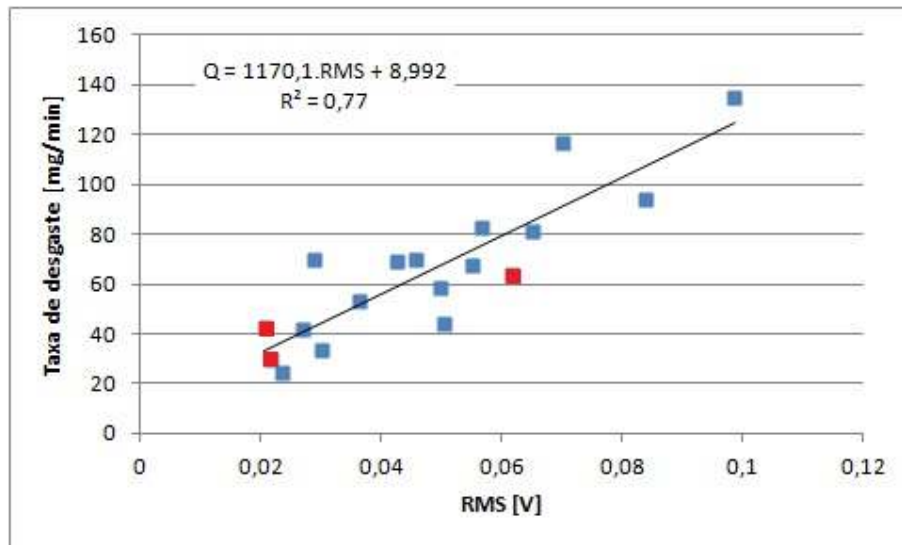


Figura 4.23 - Variação da taxa de desgaste pelo RMS para todos os ensaios realizados. Os valores impressos correspondem ao valor médio de RMS para cada ensaio.

Nota-se que as amostras com dureza mais elevada não provocaram maior dispersão nos resultados. A taxa de desgaste pode ser prevista a partir do valor médio do RMS de acordo com a equação 4.1, com um erro de aproximadamente 22%.

$$Q = 1170,1.RMS + 8,99 \quad (\text{equação 4.1})$$

onde:

- Q é a taxa de desgaste, em mg/min;
- RMS é o valor médio, em V.

O parâmetro RMS indica a média dos picos de tensão do sinal no tempo, independentemente da formação dos *hits*. O aumento da taxa de desgaste, nestes ensaios, não está correlacionada com o aumento no número de partículas erodentes impactando a superfície, mas com o aumento na energia cinética das partículas. Esta maior energia fará com que a partícula penetre mais profundamente na amostra, provocando uma maior região deformada plasticamente e cortes mais profundos, que serão refletidos na intensidade das ondas mecânicas geradas, sensíveis aos parâmetros de EA relativos à intensidade do sinal, como RMS e amplitude. A Figura 4.24 apresenta a correlação entre a amplitude e a taxa de desgaste.

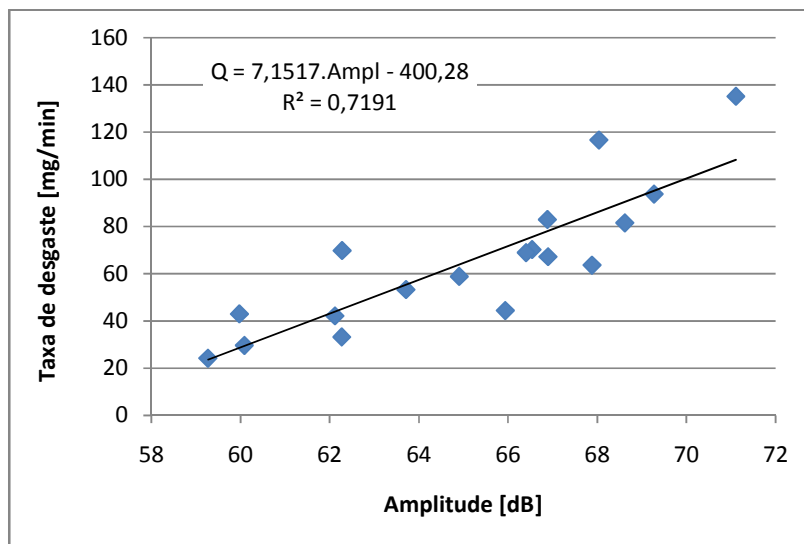


Figura 4.24 - Taxa de desgaste em função da amplitude dos sinais de EA para todos os ensaios realizados. Os valores impressos correspondem à média da amplitude para cada ensaio.

O parâmetro amplitude também apresenta uma correlação satisfatória em relação à taxa de desgaste, porém deve-se tomar cuidado ao estabelecer uma análise quantitativa, pois este parâmetro é sensível ao limiar de referência (*threshold*), que

pode variar para ensaios de desgaste erosivo repetidos com os mesmos parâmetros. A Figura 4.25 apresenta os dois parâmetros de EA que apresentam correlação satisfatória com a taxa de desgaste.

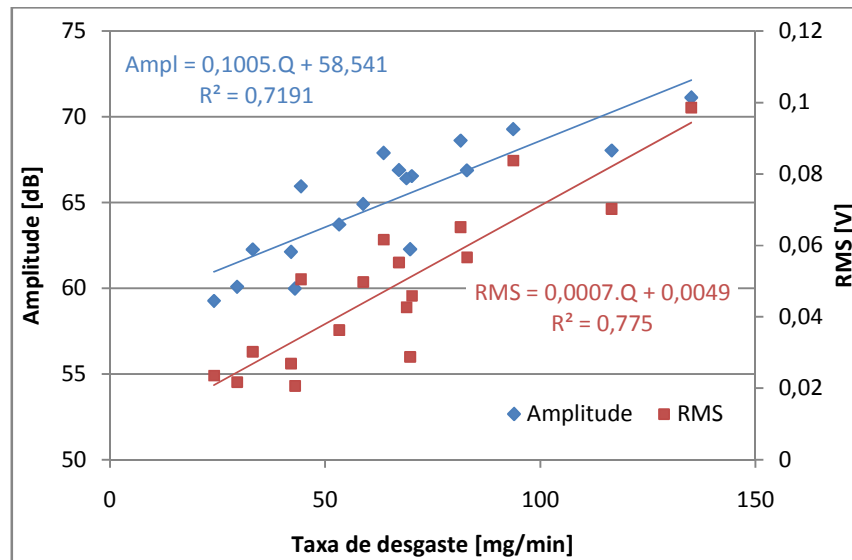


Figura 4.25 - Comparação entre a variação da amplitude e do RMS em função da taxa de desgaste para todos os ensaios realizados. Os valores impressos correspondem aos valores médios obtidos em cada ensaio.

5 CONCLUSÃO

As adaptações implementadas no erosímetro, especialmente no porta amostra, com o objetivo de capacitar o equipamento para coletar dados de emissão acústica durante ensaios de desgaste erosivo, apresentaram resultados bastante satisfatórios. As dispersões obtidas nos resultados de EA para os ensaios realizados foram causadas por variáveis correlacionadas ao próprio processo erosivo e, principalmente à oscilação na vazão mássica de partículas, esta causada pela concepção do alimentador de partículas.

A dispersão obtida para a taxa de desgaste foi considerada baixa, qualificando o erosímetro para realizar ensaios repetidos com o objetivo de desenvolver a aplicação de uma técnica para o monitoramento do desgaste.

A metodologia utilizada para quantificar a taxa de desgaste mostrou ser determinante. As medições de taxa de desgaste realizadas após ensaios longos e em intervalos curtos de tempo de ensaio apresentaram resultados diferentes. Em suma, o modo de realização do ensaio afeta a taxa de desgaste do material erodido.

Os ensaios realizados neste trabalho apresentaram resultados de acordo com a literatura, principalmente na tendência de variação da taxa de desgaste com a velocidade de impacto das partículas erodentes, que varia conforme a energia cinética das partículas, principal energia envolvida no mecanismo de desgaste. O mecanismo de desgaste preponderante foi o corte, com ausência de período de incubação e/ou incrustação de partículas.

A técnica de ensaio não destrutivo de emissão acústica mostrou ser bastante promissora para detectar e quantificar o desgaste por erosão. Os parâmetros de EA mostraram eficiência para quantificar e avaliar a intensidade com que o desgaste está ocorrendo no material. Os sinais de EA gerados pelo impacto e pela passagem do fluido de ar sobre a amostra não interferiram na interpretação dos resultados de correlação com o desgaste. O parâmetro RMS mostrou ser o mais indicado para correlacionar com o desgaste.

Os ensaios realizados neste trabalho, com o objetivo final de utilizar a técnica de EA como ferramenta para o monitoramento de equipamentos e tubulações sujeitas ao desgaste erosivo, tiveram caráter preliminar, onde foi possível reconhecer o potencial da técnica e estabelecer algumas correlações com os mecanismos de dano presentes no processo de desgaste. O desenvolvimento desta aplicação ainda requer estudos e ensaios em laboratório, com um aprofundamento maior na análise do

espectro de frequência dos sinais em uma maior variação dos parâmetros do processo erosivo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Da análise da literatura e a partir dos resultados obtidos durante a realização deste trabalho, pode-se sugerir as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Aplicação de melhorias no sistema de alimentação de partículas para reduzir a oscilação na vazão mássica de partículas;
- Realização de ensaios de desgaste erosivo utilizando amostras com maior dureza e ângulo de impacto de 90°, para verificar a resposta dos sinais de EA para um mecanismo de dano diferente do abordado neste trabalho;
- Avaliação dos sinais de EA na base da frequência para separar as diferentes fontes de sinais acústicos coletadas pelo sensor;

7 PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO

O presente trabalho de dissertação gerou as seguintes publicações:

PASSOS, A. G. ; BRONKHORST, K. B. ; TIBONI, G. B. ; SILVA, C.H. . Análise de sinais de vibração e emissão acústica para a detecção de danos em ensaios de fadiga de contato do tipo esfera contra plano. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2010, Campina Grande - Paraíba. Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2010, 2010.

TIBONI, G. B. ; MARQUARDT, T. A. S. ; SANTA MARIA, V.A.R. ; SILVA, C. H. . Preliminary studies for monitoring erosion in pipelines by the acoustic emission technique. In: Rio Pipeline 2009 Conference e Exposition, 2009, Rio de Janeiro. Anais do Rio Pipeline 2009 Conference e Exposition, 2009

TIBONI, G. B. ; MARQUARDT, T. A. S. ; SANTA MARIA, V.A.R. ; MELLO, G. D. ; MOURA, N.C. ; SILVA, C. H. . Emissão Acústica em ensaios de erosão Estudo do efeito do acabamento superficial.. In: 64o Congresso Anual da ABM, 2009, Belo Horizonte. Anais do 64o Congresso Anual da ABM, 2009.

TIBONI, G.B., SILVA, C.H., SANTA MARIA, V.A.R., MARQUARDT, T.A.S. Estudos preliminares para o monitoramento de erosão em dutos pela técnica de emissão acústica. Segundo seminário anual do PPGEM, Curitiba 2009

8 REFERÊNCIAS

ANAND,K., HOVIS, S.K., CONRAD, H., SCATTERGOOD, R.O. **Flux effects in solid particle erosion**. Wear, v. 118 (1987), p. 243-257

ANDREUCCI, R., **Aplicação Industrial Ensaio por Ultra-som**. Apostila ABENDE. Setembro 2006

Aplicação de técnicas de ultra-som em tubulações. Disponível em <www.ndtdobrasil.com.br> – acesso em 02 de novembro de 2011

ASM Metals Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control. 9th edition, v. 17, 1989

ASTM A976 – Standard Classification of Insulating Coatings by Composition, Relative Insulating Ability and Application, 2008

ASTM E1106 – Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors. 2007

ASTM E2075 – Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod. 2010

ASTM G76 – Conducting erosion test by solid particle impingement using gas jets. 1995

CHEEKE, J.D.N., **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. CRC Press L.L.C., 2002

Especificação de sensors de EA. Disponível em: Physical Acoustics Corporation, Products, Sensors. <www.pacndt.com>. Acesso 28 de outubro, 2010

FERES FILHO, P. **Monitoramento de fundos de tanques atmosféricos através da técnica de emissão acústica.** PASA, 4p., 2002

FERRER, F.; IDRISSE, H.; MAZILLE, H.; FLEISCHMANN, P.; LABEEUW, P. **On the potential of acoustic emission for the characterization and understanding of mechanical demaging during abrasion – corrosion processes.** Wear, v.231 (1999), p. 108-115

FIGUEIREDO, R.L.P. **Protótipo para ensaio de desgaste erosivo.** PPGEM – Curitiba, 2005

FILIPPIN, C.G., CHIESA, F., MELLO, G.D., TIBONI, G.B., MOURA, N.C. **Monitoramento de transformadores elevadores por emissão acústica e análise de gases dissolvidos em óleo isolante.** 10° COTEQ, Salvador 2009

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials,** Editora Edward Arnold (1992)

JAQUES, R.C., **Avaliação de Parâmetros de Emissão Acústica para Monitoramento de Risers Flexíveis.** Porto Alegre, 2009

JOST, H.P. **Tribology - origin and future.** WEAR, 136, (1990) p. 1-17

KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials.** Springer-Verlag, Estados Unidos da América, 1977

KRISBNAMOORTHY, P.R., SEETHARAMU, S., SAMPATHKUMARAN, P. **Influence of the mass flux and impact angle of the abrasive on the erosion resistance of materials used in pulverised fuel bends and other components in thermal power stations.** Wear, v.165 (1993), p. 151-157

LANDIS, E.N., BAILLON, L. **Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete**. Journal of Engineering Mechanics, v. 128, p. 698-702, 2002

LANDIS, E.N., WHITTAKER, D.B. **Acoustic emission and fracture energy of wood. Condition monitoring of materials and structures**, Procedures of Sessions of Engineering Mechanics, 2000

LI, C.J., LI, S.Y. **Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring**. Wear, v. 185 (1995), p. 67-74

LINDSLEY, B.A. e MARDER, A.R. **The effect of velocity on the solid particle erosion rate of alloys**. Wear 225-229 (1999) pp. 510-516

MERCADO, E., PADOVESE, L., **Monitoring and detecting lubrication regime transitions in radial journal bearings**. Surveillance 5 CETIM, 2004

MILLER, R. K. e MCINTIRE, P. **Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing – ASNT**. Estados Unidos da América, 1987

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 (1999), p. 1-17

MOORE, D. F. **PRINCIPLES AND APLICATIONS OF TRIBOLOGY**. Pergamon Press, 1a Ed.,(1975),p. 1-86

MOORTHY, V., JAYAKUMAR, T., RAJ, B. **Acoustic emission technique for detecting micro- and macroyielding in solution-annealed AISI Type 316 austenitic**

stainless steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping. v. 64 (1995), p. 161-168

OKA, Y.I., OHNOGI, H., HOSOGAWA, T., MATSUMURA, M. **The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact.** Wear, v. 203-204, p. 573-579, 1997

OKA, Y.I., OKAMURA, K., YOSHIDA, T. **Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation.** Wear, v. 259, p. 95-101, 2005

PHISYCAL ACOUSTICS CORPORATION. **Disp with AEWin users manual.** Rev. 3 novembro 2005. Princeton Junction, NJ, USA

PIOTRKOWSKI, R., GALLEGU, A., CASTRO, E., GARCIA-HERNANDEZ, M.T., RUZZANTE, J.E. **Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis.** NDT&E International, v. 38 (2005), p. 260-267

PIOTRKOWSKI, R., GALLEGU, A., RUZZANTE, J.E., HERNÁNDEZ, M.T.G. **Wavelet processing of acoustic emission signals from scratch test on nitride coatings.** EWGAE 2004, Berlim, 2004

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y.G.; KRISHNAMURTHY, R. **Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting.** Wear, v. 212 (1997), p. 78-84

RUZZANTE, J.E., **Ondas elásticas, sensors y emissão acústica.** 1998. Apostila

SHIPWAY, P.H., HUTCHINGS, I.M. **A method for optimizing the particle flux in erosion testing with a gas-blast apparatus.** Wear, v. 174 (1994) p.169-175

SOARES, S.D. **Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de equipamentos pressurizados.** Rio de Janeiro, 2008

SOARES, S.D., MOURA, N.C. – **Emissão Acústica.** 2007. Apostila

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W. – **Engineering Tribology**, 3rd edition, Elsevier, 2005

STEVENSON, A.N.J., HUTCHINGS, I.M. **The influence of nozzle length on the divergence of the erodent particle stream in a gas-blast erosion rig.** *Wear*, v. 189 (1995), p. 66-69

TIBONI, G.B., CUSTÓDIO, J., MOURA, N.C., FILIPPIN, C.G., FEDALTO, L., FRANCESCONI, T. **Avaliação da nucleação e propagação de trincas em aço AISI 1060 por emissão acústica.** 11^aCOTEQ. Porto de Galinhas – PE. 2011

TIBONI, G.B., SILVA, C.H., SANTA MARIA, V.A.R., MARQUARDT, T.A.S. **Estudos preliminares para o monitoramento de erosão em dutos pela técnica de emissão acústica.** Segundo seminário anual do PPGEM, Curitiba 2009

TIBONI, G.B., SILVA, C.H., SANTA MARIA, V.A.R., MARQUARDT, T.A.S. **Preliminary studies for monitoring erosion in pipelines by the acoustic emission technique.** Rio Pipeline 2009, Rio de Janeiro 2009

VALLEN, H. **AE testing fundamentals, Equipment, Applications.** Disponível em: Vallen Systeme GmbH <www.vallen.de>. Acesso 26 de outubro, 2010

WANG, Y-F., YAHNG, Z-G. **Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials.** *Wear*, v. 265, p. 871-878, 2008

WARREN, A.W., GUO, Y.B. **The impact of surface integrity by hard turning versus grinding on rolling contact fatigue – Part I: Comparison of fatigue life and acoustic emission signals.** *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 30 (2007), p. 698-711

ZHANG, L., SAZANOV, 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

APÊNDICE A – Determinação do número de Reynolds

Para a determinação do número de Reynolds do fluxo de ar mais partículas são necessários os seguintes dados:

- Densidade

Densidade do ar: $\rho_{ar} = 1,18 \text{ kg/m}^3$ (temperatura = 15°C)

Densidade da alumina: $\rho_{al} = 1200 \text{ kg/m}^3$ (Anexo1)

- Vazão mássica de partículas: Q_p

Tabela Ap. A.1 - Vazão Mássica de partículas para as vazões de ar utilizadas nos ensaios.

| Vazão mássica de partículas | | |
|---------------------------------------|----------|----------|
| Vazão de ar [m^3/h] | [g/min]* | [kg/s] |
| 16,5 | 193 | 3,22E-03 |
| 24,7 | 211 | 3,52E-03 |
| 32,9 | 194 | 3,23E-03 |

*valores obtidos experimentalmente.

- Vazão mássica de ar: Q_a

Obtida através da multiplicação da vazão de ar (em m^3/s) pela densidade do ar.

Tabela Ap. A.2 - Vazões mássicas de ar correspondentes às vazões volumétricas de ar utilizadas nos ensaios.

| Vazão de ar [m^3/h] | Vazão de ar [m^3/s] | Vazão mássica de ar [kg/s] |
|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 16,5 | 4,57E-03 | 5,40E-03 |
| 24,7 | 6,86E-03 | 8,09E-03 |
| 32,9 | 9,14E-03 | 1,08E-02 |

- Vazão mássica total (ar + partículas): Q_t

$$Q_t = Q_p + Q_a$$

Tabela Ap. A.3 - Percentual das vazões mássicas de ar e de partículas na vazão mássica total do fluxo.

| Q_{ar} [m ³ /h] | Q_t [kg/s] | % ar | % partículas |
|------------------------------|--------------|------|--------------|
| 16,5 | 8,61E-03 | 62,6 | 38,4 |
| 24,7 | 1,16E-02 | 69,7 | 30,3 |
| 32,9 | 1,40E-02 | 76,9 | 23,1 |

- Densidade equivalente ρ_{eq} :

$$\rho_{eq} = \rho_{eq}(\% \text{ ar}) + \rho_{eq}(\% \text{ partículas})$$

Tabela Ap. A.4 - Densidade equivalente para os fluxos utilizados nos ensaios.

| Q_{ar} [m ³ /h] | ρ_{eq} [kg/m ³] |
|------------------------------|----------------------------------|
| 16,5 | 461,53 |
| 24,7 | 364,42 |
| 32,9 | 278,1 |

- Velocidade do ar (V):

$$Q_{ar} = V \cdot A$$

onde:

- V = velocidade do ar, em m/s;

- A = área da seção transversal do tubo de aceleração, em m².

Tabela Ap. A.5 - Velocidades de encoamento do ar para as vazões volumétricas de ar utilizadas nos ensaios.

| Q_{ar} [m ³ /h] | V [m/s] |
|------------------------------|---------|
| 16,5 | 56,58 |
| 24,7 | 88,42 |
| 32,9 | 116,71 |

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho_{eq} \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Onde:

- ρ_{eq} = densidade equivalente, em kg/m^3 ;
- V = velocidade do ar, em m/s ;
- D = diâmetro do tubo de aceleração, em m ;
- μ = viscosidade do ar, em N.s.m^{-2} .

Tabela Ap. A.6 - Número de Reynolds obtido para cada fluxo de ar mais partículas utilizado nos ensaios.

| Qar [m^3/h] | Número de Reynolds |
|---|---------------------------|
| 16,5 | 1,50E+07 |
| 24,7 | 2,19E+07 |
| 32,9 | 1,87E+07 |

APÊNDICE B – Resultados dos Ensaios de Desgaste Erosivo

Tabela Ap. B 1 - Resultados dos Ensaios de Desgaste Erosivo

| Bateria de ensaios | Amostra | Massa de partículas erodentes [g] | Vazão de ar [m ³ /h] | Threshold [dB] | Tempo de ensaio [hh:mm:ss.ms] | Tempo de ensaio [min] | Massa inicial da amostra [g] | Massa final da amostra [g] | Perda de massa [g] | Perda de massa [mg] | Taxa de desgaste mássica [mg/g] | Taxa de desgaste [mg/min] | Vazão mássica de partículas [g/min] |
|--------------------|---------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1 | CP1 | 800 | 16,5 | 61 | 00:04:51:80 | 4,87 | 760,70 | 760,36 | 0,34 | 340 | 0,43 | 69,78 | 164,20 |
| | CP2 | 800 | 32,9 | 67 | 00:04:21:60 | 4,37 | 755,69 | 755,10 | 0,59 | 590 | 0,74 | 135,11 | 183,21 |
| | CP3 | 800 | 24,7 | 65 | 00:04:01:50 | 4,03 | 757,09 | 756,62 | 0,47 | 470 | 0,59 | 116,61 | 198,48 |
| | CP4 | 1600 | 24,7 | 65 | 00:08:02:10 | 8,04 | 740,43 | 739,89 | 0,54 | 540 | 0,34 | 67,20 | 199,10 |
| | CP5 | 1600 | 32,9 | 67 | 00:08:06:30 | 8,11 | 751,61 | 750,85 | 0,76 | 760 | 0,47 | 93,73 | 197,33 |
| | CP6 | 1600 | 16,5 | 61 | 00:08:46:60 | 8,78 | 755,87 | 755,50 | 0,37 | 370 | 0,23 | 42,13 | 182,16 |
| | CP7 | 1600 | 16,5 | 61 | 00:08:25:30 | 8,43 | 746,59 | 746,31 | 0,28 | 280 | 0,18 | 33,23 | 189,91 |
| | CP8 | 1600 | 24,7 | 65 | 00:07:28:20 | 7,47 | 757,46 | 756,84 | 0,62 | 620 | 0,39 | 82,97 | 214,13 |
| 2 | CP9 | 1600 | 32,9 | 67 | 00:07:57:80 | 7,97 | 745,30 | 744,65 | 0,65 | 650 | 0,41 | 81,53 | 200,70 |
| | CP13 | 1600 | 16,5 | 59 | 00:07:40:42 | 7,68 | 755,25 | 754,92 | 0,33 | 330 | 0,21 | 42,98 | 208,38 |
| | CP14 | 1600 | 16,5 | 62 | 00:07:30:28 | 7,51 | 749,54 | 749,14 | 0,40 | 400 | 0,25 | 53,28 | 213,11 |
| | CP15 | 1600 | 32,9 | 65 | 00:07:50:09 | 7,84 | 762,23 | 761,68 | 0,55 | 550 | 0,34 | 70,19 | 204,19 |
| | CP16 | 1600 | 32,9 | 65 | 00:08:07:30 | 8,13 | 765,39 | 764,83 | 0,56 | 560 | 0,35 | 68,92 | 196,92 |
| | CP17 | 1600 | 24,7 | 62 | 00:07:07:80 | 7,14 | 757,59 | 757,17 | 0,42 | 420 | 0,26 | 58,83 | 224,12 |
| | CP18 | 1600 | 16,5 | 59 | 00:07:46:20 | 7,77 | 758,23 | 758,00 | 0,23 | 230 | 0,14 | 29,58 | 205,80 |
| | CP10 | 3000 | 32,9 | 67 | 00:16:11:23 | 16,19 | 740,17 | 739,14 | 1,03 | 1030 | 0,34 | 63,62 | 185,30 |
| 3 | CP11 | 3000 | 24,7 | 64 | 00:13:44:32 | 13,74 | 755,70 | 755,09 | 0,61 | 610 | 0,20 | 44,39 | 218,31 |
| | CP12 | 3000 | 16,5 | 60 | 00:14:03:17 | 14,05 | 744,96 | 744,62 | 0,34 | 340 | 0,11 | 24,19 | 213,45 |

ANEXO 1 – Catálogo Técnico das partículas de óxido de alumínio utilizadas nos ensaios



INFORMAÇÕES
DO PRODUTO



Alcoa América Latina

Divisão de Produtos Químicos e Pó de Alumínio

Alumina Calcificada A-1

A alumina calcificada A-1 é produzida industrialmente pela calcinação moderada do hidróxido de alumínio obtido a partir da purificação da bauxita através do chamado processo Bayer. Suas partículas constituem-se de aglomerados de fases cristalinas, intermediárias do processo de conversão para alumina alfa, apresentando portanto área superficial relativamente alta e, em consequência, boa facilidade de fusão.

Por se tratar de um material sintético, a alumina calcificada A-1 apresenta elevada consistência química e granulométrica, particularmente quando comparada com as fontes naturais de óxido de alumínio.

A fim de tornar a alumina calcificada A-1 isenta de partículas infusíveis a Alcoa desenvolveu um processo especial de peneiramento que praticamente elimina as partículas maiores que 0,25 mm (60 mesh).

Devido às suas características físico-químicas a alumina calcificada A-1 pode ser utilizada em diversas aplicações, tais como:

| Aplicação | Função | Característica principal |
|-------------------|--|------------------------------------|
| Eletro fusão | Fonte de Al_2O_3 | Pureza e Reatividade |
| Vidros | Fonte de Al_2O_3 | Pureza e Consistência Química |
| Grês Porcelanato | Elevar resistência Mecânica / Brancura | Reatividade e Consistência Química |
| Esmaltes & Fritas | Elevar resistência Química e à Abrasão | Reatividade e Consistência Química |
| Engobes | Conferir Opacidade / Brancura | Tamanho do cristal primário |
| Fibras Cerâmicas | Fonte de Al_2O_3 | Pureza e Reatividade |
| Fluxantes | Fonte de Al_2O_3 | Reatividade e Consistência Química |
| Escória Sintética | Correção do teor de Al_2O_3 da escória | Pureza e Consistência Química |
| Tintas | Elemento antiabrasivo | Elevada Dureza |

Atualizada em 10/12/2002

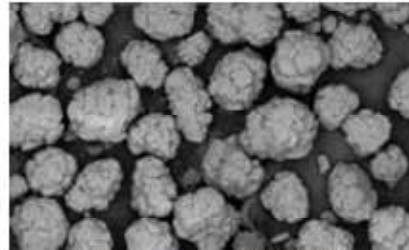


Alumina Calcificada A-1

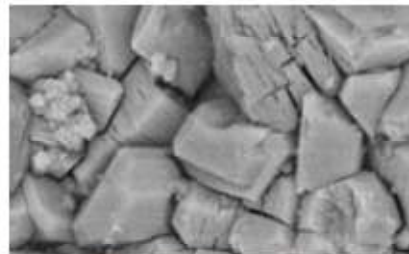
Características

Típico

| Análise Química (%) | |
|---|--------|
| Al ₂ O ₃ | 98,5 |
| SiO ₂ | 0,02 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,03 |
| Na ₂ O - Total | 0,50 |
| Umidade (300°C) | 0,5 |
| Perda ao Fogo (300-1000°C) | 0,5 |
| Análise Física | |
| Densidade Solta (g/cm ³) | 1,0 |
| Densidade Compactada (g/cm ³) | 1,2 |
| Área Superficial (m ² /g) | 60 |
| Granulometria | |
| + # 40 (%) | 0,0000 |
| + # 60 (%) | 0,001 |
| + # 100 (%) | 5 |
| + # 200 (%) | 70 |
| + # 325 (%) | 95 |
| D10 Malvern (µm) | 55 |
| D50 Malvern (µm) | 95 |
| D90 Malvern (µm) | 150 |

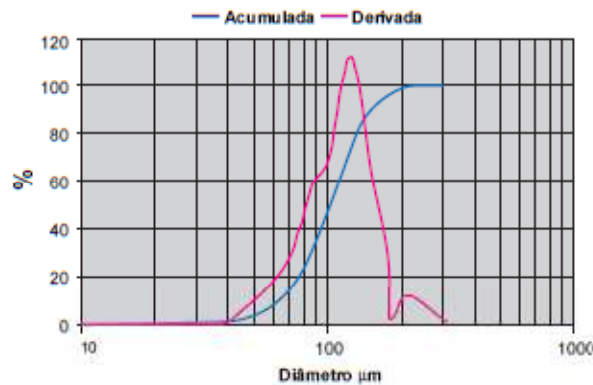


MEV: -Ampliação de 300 X, 50 µm



MEV: -Ampliação de 3000 X, 5 µm

- Análise química feita por ICP (Induction Coupled Plasma)
- Densidades determinadas pela Norma ASTM-B-527-81
- Área superficial feita pelo Método BET
- Granulometria por peneiras da Série Tyler (1Kg para 40 e 60#, 25g para as demais)



Distribuição de Tamanhos de Partículas Feitas pelo Malvern Masterizer

Alcoa Alumínio S.A.

Rodovia Poços de Caldas/Andradas, Km 10
 37701-970 - Poços de Caldas, MG - Brasil
 Tels.: 55 35 3729 5406 / 5402 Fax: 55 35 3729 5742
www.alcoa.com.br

Atualizada em 10/12/2002