

MARCO AURÉLIO MOURA SURIANI

**IDENTIFICAÇÃO DE MECANISMOS DE DESGASTE
ATRAVÉS DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA
APLICADA AO DESLIZAMENTO ENTRE DUTOS
FLEXÍVEIS E *LINERS***



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2014

MARCO AURÉLIO MOURA SURIANI

IDENTIFICAÇÃO DE MECANISMOS DE DESGASTE ATRAVÉS DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA APLICADA AO DESLIZAMENTO ENTRE DUTOS FLEXÍVEIS E *LINERS*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

Co-orientador: Prof. Elias Bitencourt Teodoro, PhD

**UBERLÂNDIA - MG
2014**

Se você quer descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração. Nikola Tesla

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, professores Sinésio Domingues Franco e Elias Bitencourt Teodoro, pelos cuidados e pela paciência.

À toda a equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), talentosa, esforçada e repleta de bons amigos.

Aos amigos e familiares, e àqueles que acreditaram que eu conseguia chegar ao fim de todos os meus projetos.

À Capes pelo exemplar apoio à pós-graduação. À Petrobras pelo apoio à pesquisa e inovação e aos materiais cedidos. Às empresas Petropasy e Acrilbrás pelas amostras de polímeros cedidas.

SURIANI, M. A. M. **Identificação de Mecanismos de Desgaste através de Sinais de Emissão Acústica Aplicada ao Deslizamento entre Dutos Flexíveis e Liners.** 2014. 188 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Resumo

A condução do petróleo na exploração de petróleo em águas profundas é realizada comumente através de dutos flexíveis, que são revestidos externamente em poliamida. No ponto em que esses dutos se conectam à plataforma, eles deslizam contra um *liner*, que tem como finalidade se desgastar no lugar do duto flexível. A proposta deste trabalho foi investigar as potencialidades da Emissão Acústica (EA) no monitoramento do desgaste entre o duto flexível e o *liner*. Esta investigação foi realizada através de aquisições da EA em um ensaio em escala real, simulando o deslizamento entre os dois equipamentos. Os métodos de análise dos sinais de EA foram seu valor RMS e suas frequências de pico. Preliminarmente, foram realizados ensaios em escala reduzida com o objetivo de estudar os sinais acústicos emanados do desgaste. Foram realizados primeiramente ensaios de esclerometria retilínea em uma amostra de aço revestido com níquel químico e em amostras de diferentes polímeros, empregando diferentes penetradores para forçar mudanças nos mecanismos de desgaste. Estes ensaios mostraram que o valor RMS da EA é sensível à presença de trincas, bem como de eventos de *stick-slip*. Eles também indicaram que trincamentos geram sinais acústicos com frequências de pico na faixa de 0 a 50 kHz e que *stick-slip* gera sinais com frequências de pico próximas a 85 kHz. Também foram realizados ensaios abrasivos de pinos de aço-carbono, de poliamida e de poliuretano contra papel abrasivo. Nestes ensaios, encontrou-se principalmente desgaste abrasivo por microsulcamento e microcorte, que geraram sinais acústicos com diversos picos de frequência entre 25 e 225 kHz. Nos ensaios de deslizamento em escala reduzida entre poliamida e poliuretano, utilizando a configuração pino contra plano em movimento alternado, foram observadas, predominantemente, ondas de Schallamach e abrasão. As correspondentes ondas acústicas apresentaram baixas frequências e baixas amplitudes, com valores próximos a 50 kHz, semelhantes aos encontrados nos ensaios de esclerometria e de lixamento. Por fim, foi realizado o ensaio em escala real, porém as aquisições da EA não evidenciaram os eventos de desgaste ocorridos entre as amostras. Acredita-se que isto tenha ocorrido devido ao fato de que o sensor estava relativamente distante da região do desgaste e porque o amortecimento do poliuretano é bastante alto. Entretanto, o método da EA tem potencial de realizar o monitoramento do *liner*, caso se consiga posicionar o sensor mais próximo à origem dos eventos de desgaste.

Palavras-chave: Mecanismos de Desgaste, Dutos Flexíveis, Emissão Acústica, Polímeros.

SURIANI, M. A. M. **Identification of Wear Mechanisms using Acoustic Emission Signals Applied to Sliding Wear between Flexible Riser Pipes and Liners.** 2014. 188 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Abstract

The driving of oil in deep water oil exploration is performed commonly by risers, which are coated externally by polyamide. At the point where these pipes connect to the platform, they slide against a liner, which is supposed to wear in the place of the flexible riser pipe. The purpose of this work was to investigate the Acoustic Emission (AE) potential in monitoring the wear between the riser pipe and the liner. This investigation was performed through acquisitions of AE in a full-scale test, simulating the sliding process between the two mentioned surfaces. The methods of signals analysis were its RMS value and their peak frequencies. Preliminarily, small-scale tests were carried out with the aim of studying the acoustic signals that emanate from the wear. First of all tests were carried out in a linear sclerometry sample of nickel chemically coated steel and in samples of different polymers, using different indenters to force changes in the mechanisms of wear. These tests have shown that the RMS value of AE is sensitive to the presence of cracks, as well as stick-slip events, and indicated that cracking generates acoustic signals with peak frequencies in the range of 0 to 50 kHz and stick-slip generates signals with peak frequencies around 85 kHz. We also carried out abrasive wear tests using carbon steel pins, polyamide and polyurethane against abrasive paper. In these tests, it was found mainly abrasive wear by microplowing and microcutting that generate acoustic signals with several peaks with frequencies between 25 and 225 kHz. In the small-scale sliding wear tests of between polyamide and polyurethane, using a reciprocating pin-on-flat configuration, was observed predominantly Schallamach waves and abrasion. The corresponding acoustic waves showed low frequencies and low amplitudes, with values close to 50 kHz, similar to those found in the linear sclerometry and abrasive tests. Finally, the test was carried out in full-scale tribometer but the AE acquisitions did not showed the wear events occurring between the samples. It is believed that this happened because the sensor was relatively distant from the region of wear events and because the polyurethane damping effect is quite high. However, it is concluded that the method of AE has the potential to accomplish the liner monitoring if the AE sensor is placed closer to the wear events source.

Keywords: Wear mechanisms, Risers, Acoustic Emission, Polymers.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Representação esquemática do duto flexível de uma plataforma flutuante (RAMOS NETO, 2003).....	2
Figura 1.2 -	Representação esquemática do enrijecedor limitando os movimentos do duto flexível (HWANG <i>et al.</i> , 2006, adaptada)	2
Figura 1.3 -	Região em que o duto flexível (<i>riser</i>) entra em contato com o enrijecedor através do <i>liner</i> (LEMOS <i>et al.</i> , 2004, adaptada)	3
Figura 1.4 -	Representação esquemática do tribômetro em grande escala para simulação da interação entre <i>liner</i> e duto flexível (<i>riser</i>) no LTAD.....	4
Figura 2.1 -	Sinal Acústico, com regiões contínuas e com <i>bursts</i> (a). Em detalhe, a ampliação de um <i>burst</i> (b)	8
Figura 2.2 -	Típico sistema de medição de Emissão Acústica	9
Figura 2.3 -	Esquema de um sensor piezoelétrico típico (GROSSE; OHTSU, 2008)	10
Figura 2.4 -	Micrografia do risco em uma amostra de aço revestida com NiP e a energia acústica associada ao riscamento. As regiões 1 a 4 indicam posições nas quais foram realizados registros ampliados (ARAÚJO, 2008)	14
Figura 2.5 -	Energia da Emissão Acústica no ensaio de um duto flexível. As linhas verticais escuras marcam rupturas nas tiras metálicas e as cinza indicam mudanças no carregamento. (CLARKE <i>et al.</i> , 2011, adaptada)	15
Figura 2.6 -	Mapa de correlação entre espectro de frequência da EA e fenômenos envolvendo deformação e fratura (Hase <i>et al.</i> , 2012, adaptada)	17
Figura 2.7 -	Submecanismos de abrasão (ZUM GAHR, 1987, adaptada)	18
Figura 2.8 -	Micrografia de um pino de ferro deslizado contra uma tira de papel abrasivo #400 e o espectro de frequência do sinal acústico gerado pelos eventos de abrasão. A seta indica o sentido do deslizamento. (HASE, 2012, adaptada)	19
Figura 2.9 -	Ângulo de ataque da ponta de um penetrador	20
Figura 2.10 -	Mapa de deformação no riscamento do PEEK, contendo o desgaste em função do ângulo do penetrador cônicoo e da força normal em ensaios realizados a 20°C e com velocidade de 3 mm/s (IQBAL <i>et al.</i> , 2011, adaptada)	21

Figura 2.11 - Micrografias de riscamentos no PEEK com diferentes penetradores, cargas e velocidades. As setas indicam o sentido do riscamento (IQBAL <i>et al.</i> , 2011)	22
Figura 2.12 - Micrografias de riscamentos em amostras de PC (a) e PMMA (b) com carga de 6 N e velocidade de riscamento de 200 $\mu\text{m/s}$ (SINHA;LIM, 2006, adaptada)	23
Figura 2.13 - Classificação de polímeros segundo comportamento e resistência: dúcteis e fortes (I), dúcteis e fracos (II), frágeis e fracos (III) e frágeis e fortes (IV) (JIANG <i>et al.</i> , 2009).....	24
Figura 2.14 - Comportamento de polímeros durante o <i>stick-slip</i> : polímeros dúcteis (a-d) e polímeros frágeis (e-h) (JIANG <i>et al.</i> , 2009, adaptada)	24
Figura 2.15 - Wavelet de <i>bursts</i> de EA relativos ao <i>stick-slip</i> no deslizamento entre aços de baixa rugosidade (a) e de alta rugosidade (b) (ASAMENE <i>et al.</i> , 2012).....	25
Figura 2.16 - Micrografias em MEV de pontos de iniciação de trincas e direção de propagação em um elastômero termoplástico submetido a ensaio de tração SEN (a) e ampliação (b) (MARISEN <i>et al.</i> , 2005, adaptada)	26
Figura 2.17 - Exemplos de espectrogramas da STFT da Emissão Acústica em amostras de aço submetidas a ensaio de compressão, resultando em deformação plástica (a) e em cisalhamento (b) (WOO <i>et al.</i> , 2014, adaptada).....	27
Figura 2.18 - Comparação entre diferentes escalas de testes tribológicos (ZUM GAHR, 1987, adaptada).....	27
Figura 2.19 - Parâmetros de sinais acústicos em função do deslocamento no ensaio de tração de uma amostra de epóxi reforçada com fibra de carbono; os conglomerados (ou <i>clusters</i>) são padrões identificados em algoritmos de IA (GUTKIN <i>et al.</i> , 2011)	28
Figura 2.20 - Frequências de pico para diversos ensaios de tração classificadas em faixas (a, b, c) e mecanismo equivalente a cada faixa (d) (GUTKIN <i>et al.</i> , 2011, adaptada)	29
Figura 2.21 - Distinção de mecanismos de desgaste através do PSD em ensaios de tração de PU contendo fibras de carbono (KEMPF <i>et al.</i> , 2014, adaptada).....	32
Figura 2.22 - Energia parcial da EA em função da frequência de pico balanceada e os conglomerados identificados em ensaios de tração Epóxi (a) e PU (b) reforçados (KEMPF <i>et al.</i> , 2014, adaptada).....	32

Figura 2.23 - Micrografias em MEV da superfície de um TPU que deslizou contra aço exibindo ondas de Schallamach (a) e rolos formados por adesão (b) (YAHIAOUI <i>et al.</i> , 2014, adaptada).....	33
Figura 2.24 - Registros fotomicrográficos ao término de um ensaio de duto flexível contra <i>liner</i> em escala real apresentando o duto flexível (a) e microtrincamento no <i>liner</i> (b); as setas brancas indicam o sentido do deslizamento (PAES <i>et al.</i> , 2014, adaptada)	34
Figura 3.1 - Resumo das etapas desenvolvidas neste trabalho. A seta indica a sequência de execução das atividades	35
Figura 3.2 - Identificação de um <i>burst</i> usando sinal RMS.....	37
Figura 3.3 - Riscos em amostra de aço revestido com níquel químico; comprimento e direção dos riscamentos indicados.....	39
Figura 3.4 - Penetradores cônicos com ângulos de ponta de 40° (a) e 120° (b)	39
Figura 3.5 - Micrografias em MEV de um penetrador com ângulo de 60° e as medidas do ângulo (a) e do diâmetro (b) da ponta	40
Figura 3.6 - Micrografias de riscos no PC com penetradores Vickers com face para frente (a) e com aresta para frente (b)	40
Figura 3.7 - Amostra de acrílico riscada com diferentes penetradores e posteriormente revestida com ouro.....	41
Figura 3.8 - Vista geral do Macroesclerômetro (a) e detalhe destacando o penetrador, o sensor de EA e a amostra (b).....	43
Figura 3.9 - Sensor de EA com suporte plástico para permitir parafusamento ao Macroesclerômetro.....	43
Figura 3.10 - Adaptador para amostras poliméricas no Abrasômetro.....	47
Figura 3.11 - Amostras de PU (esq) e de PA (dir) ensaiadas e metalizadas para registro fotomicrográfico em MEV.....	47
Figura 3.12 - Vista geral do Abrasômetro e seus principais componentes.....	48
Figura 3.13 - Porta amostra do Abrasômetro com placas, papel abrasivo e sensor	49
Figura 3.14 - Porta pinos do Abrasômetro com um pino metálico (a) e com um adaptador para pinos poliméricos (b)	49

Figura 3.15 - Valor RMS da Emissão Acústica adquirida no Abrasômetro durante meio ciclo nas situações: desligado (a), funcionando em vazio com sensor colocado sobre amostra metálica (b) e funcionando em vazio com sensor colocado sobre amostra de metal + PU (c)	51
Figura 3.16 - Amostra de poliuretano para ensaios de deslizamento alternado (a) e posicionada para ensaio com o pino de PA e com o sensor de EA (b)	54
Figura 3.17 - Coeficiente de atrito em função da distância percorrida com os vales de inversão; os pontos em vermelho foram os eliminados pelo método utilizado	55
Figura 3.18 - Geometria da peça de PU, as dimensões das variáveis estão presentes na Tab. 3.5 (BERTHOLDI, 2014)	59
Figura 3.19 - Resultado da simulação da pressão de contato na peça de PU durante movimentação e com carga de 55 kN (BERTHOLDI, 2014)	60
Figura 3.20 - Montagem experimental do ensaio em escala real comduto flexível e enrafecedores (a) e ampliação do sensor preso ao porta sensor (b)	60
Figura 3.21 - Tribômetro em grande escala para simulação da interação entre <i>liner</i> e <i>riser</i>	62
Figura 4.1 - Risco do ensaio 02 (penetrador cônico de 120° em aço revestido com Níquel químico), com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i> . As letras de (a) a (d) indicam as posições das ampliações (ver Fig. 4.2)	65
Figura 4.2 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 02 (penetrador cônico de 120° em aço revestido com Níquel químico). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.1	66
Figura 4.3 - Risco do ensaio 49 (penetrador cônico de 120° em PS), com forças e tensão RMS da EA	68
Figura 4.4 - Risco do ensaio 33 (penetrador cônico de 120° em PMMA), com forças e tensão RMS da EA	68
Figura 4.5 - Risco do ensaio 15 (penetrador cônico de 120° em PC), com forças e tensão RMS da EA	69
Figura 4.6 - Risco do ensaio 56 (Vickers com aresta para frente em PS), com forças e tensão RMS da EA	69
Figura 4.7 - Risco do ensaio 39 (Vickers com aresta para frente em PMMA), com forças e tensão RMS da EA	70

Figura 4.8 - Risco do ensaio 20 (Vickers com aresta para frente em PC), com forças e tensão RMS da EA	70
Figura 4.9 - Risco do ensaio 53 (Vickers com face para frente em PS), com forças e tensão RMS da EA	71
Figura 4.10 - Risco do ensaio 35 (Vickers com face para frente em PMMA), com forças e tensão RMS da EA	71
Figura 4.11 - Risco do ensaio 17 (Vickers com face para frente em PC), com forças e tensão RMS da EA	72
Figura 4.12 - Risco do ensaio 42 (penetrador cônico de 40° em PS), com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i> . As letras de (a) a (f) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.13)	73
Figura 4.13 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 42 (penetrador cônico de 40° em PS). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.12.....	74
Figura 4.14 - Risco do ensaio 45 (penetrador cônico de 60° em PS), com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i> . As letras de (a) a (f) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.15)	77
Figura 4.15 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 45 (penetrador cônico de 60° em PS). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.14.....	78
Figura 4.16 - Risco do ensaio 46 (penetrador cônico de 90° em PS), com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i> . As letras de (a) a (e) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.17)	80
Figura 4.17 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 46 (penetrador cônico de 90° em PS). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.16.....	81
Figura 4.18 - Risco do ensaio 23 (penetrador cônico de 40° em PMMA), com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i> . As letras de (a) a (c) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.19)	82
Figura 4.19 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 23 (penetrador cônico de 40° em PMMA). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.18. A micrografia (d) é ampliação de (b)	83
Figura 4.20 - Risco do ensaio 27 (penetrador cônico de 60° em PMMA), com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i> . As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.21)	84

- Figura 4.21 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 27 (penetrador cônico de 60° em PMMA). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.20 .. 84
- Figura 4.22 - Risco do ensaio 29 (penetrador cônico de 90° em PMMA), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.23) 85
- Figura 4.23 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 29 (penetrador cônico de 90° em PMMA). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.22 .. 85
- Figura 4.24 - Risco do ensaio 05 (penetrador cônico de 40° em PC), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (f) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.25) 86
- Figura 4.25 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 05 (penetrador cônico de 40° em PC). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.24. Micrografia (d) possui ampliação de 750x..... 87
- Figura 4.26 - Risco do ensaio 07 (penetrador cônico de 60° em PC), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.27) 88
- Figura 4.27 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 07 (penetrador cônico de 60° em PC). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.26 88
- Figura 4.28 - Risco do ensaio 11 (penetrador cônico de 90° em PC), com forças, RMS da EA e frequências de pico por *burst*. As letras de (a) a (b) indicam posições onde foram feitos registros fotomicrográficos (ver Fig. 4.29) 89
- Figura 4.29 - Micrografias em MEV do risco do ensaio 11 (penetrador cônico de 90° em PC). As posições correspondentes no risco são indicadas na Fig. 4.28. 89
- Figura 4.30 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de Aço contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 13,7 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)..... 93
- Figura 4.31 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de Aço contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 49,0 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e)..... 94
- Figura 4.32 - Deslizamento 01 (aço, #400 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*..... 95
- Figura 4.33 - Deslizamento 04 (aço, #220 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por *burst*..... 95

Figura 4.34 - Deslizamento 19 (aço, #400 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	96
Figura 4.35 - Deslizamento 22 (aço, #220 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	96
Figura 4.36 - <i>Burst</i> de EA presente no deslizamento 22 (ver Fig. 4.35), nos domínios do tempo (a) e da frequência (b)	97
Figura 4.37 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PA contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 13,7 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e).....	98
Figura 4.38 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PA contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 49,0 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e).....	99
Figura 4.39 - Deslizamento 07 (PA, #400 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	100
Figura 4.40 - Deslizamento 10 (PA, #220 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	100
Figura 4.41 - Deslizamento 25 (PA, #400 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	101
Figura 4.42 - Deslizamento 28 (PA, #220 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	101
Figura 4.43 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PU contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 13,7 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e).....	103
Figura 4.44 - Micrografias dos Ensaios de Pinos de PU contra Papel Abrasivo com granulometria #400 (a) a (d) e #220 (e) a (h) e carga de 49,0 N. Posições das ampliações (b) a (d) indicadas em (a) e das ampliações (f) a (h) em (e).....	104
Figura 4.45 - Deslizamento 13 (PU, #400 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	105
Figura 4.46 - Deslizamento 16 (PU, #220 e 13,7 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	105
Figura 4.47 - Deslizamento 31 (PU, #400 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	106

Figura 4.48 - Deslizamento 34 (PU, #220 e 49,0 N), com RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	106
Figura 4.49 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #400 e força de 13,7 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)	108
Figura 4.50 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #220 e força de 13,7 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)	109
Figura 4.51 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #400 e força de 49,0 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)	110
Figura 4.52 - Comparação entre EA do aço, da PA e do PU em ensaios abrasivos #220 e força de 49,0 N através de conglomerados e empregando energia entre 35 e 100 kHz (a/c) e entre 180 e 240 kHz (b/d) em função da frequência centroide (a/b) e da frequência de pico balanceada (c/d)	111
Figura 4.53 - Evolução do coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio em escala reduzida 01 (pino de PA contra plano de PU, 2 km e 2 MPa)	113
Figura 4.54 - Registros do plano de PU após o ensaio 01 (2 MPa). Registro fotográfico (a), e registros fotomicrográficos de trechos mais relevantes (b-c) e respectivas ampliações (d-e); setas brancas indicam sentido do deslizamento.....	113
Figura 4.55 - Evolução do coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio em escala reduzida 02 (pino de PA contra plano de PU, 2 km e 3 MPa)	114
Figura 4.56 - Registros do plano de PU após o ensaio 02 (3 MPa). Registro fotográfico (a), e registros fotomicrográficos de trechos mais relevantes (b-c) e respectivas ampliações (d-e); setas brancas indicam sentido do deslizamento.....	114
Figura 4.57 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 01 (ver Tab. 3.4)	116
Figura 4.58 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 06 (ver Tab. 3.4)	116
Figura 4.59 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 11 (ver Tab. 3.4)	116
Figura 4.60 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 21 (ver Tab. 3.4)	117
Figura 4.61 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 22 (ver Tab. 3.4)	117

Figura 4.62 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 27 (ver Tab. 3.4)	117
Figura 4.63 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 32 (ver Tab. 3.4)	118
Figura 4.64 - Valor RMS e Frequência de Pico da EA da Aquisição 42 (ver Tab. 3.4)	118
Figura 4.65 - Amostra de <i>liner</i> da direita após 50.000 ciclos (3 km) (a) e partículas de desgaste acumuladas no fundo do equipamento (b)	120
Figura 4.66 - Duto flexível na região em contato com a amostra de <i>liner</i> da esquerda, após 50.000 ciclos (3 km)	121
Figura 4.67 - Amostra da direita do PU após 100.000 ciclos (a), 150.000 ciclos (b), 200.000 ciclos (c) e 250.000 ciclos (d)	122
Figura 4.68 - Registro do ensaio em escala real após 250.000 ciclos (15 km) do duto flexível (a), dos fragmentos de desgaste (b) e imediatamente após a parada, indicando a região onde foram surgiram linhas de convecção na água (c)..	123
Figura 4.69 - Valores RMS da EA Ensaio em Escala Real, relativos à Aquisição 01, com 5.000 ciclos (a), à Aquisição 20, com 100.000 ciclos (b), à Aquisição 21, com 105.000 ciclos (c) e à Aquisição 50, com 250.000 ciclos (d).....	124
Figura 4.70 - <i>Burst</i> de EA presente na Aquisição 20 (ver Fig. 4.69b), nos domínios do tempo (a) e da frequência (b)	125
Figura 4.71 - Trecho de EA presente na Aquisição 20 em instante imediatamente anterior ao burst da Fig. 4.70, nos domínios do tempo (a) e da frequência (b).....	126
Figura 4.72 - <i>Burst</i> de EA presente na Aquisição 25 (ver Fig. 8.38), nos domínios do tempo (a) e da frequência (b).....	127
Figura 4.73 - <i>Burst</i> de EA presente na Aquisição 45 (ver Fig. 8.39), nos domínios do tempo (a) e da frequência (b).....	127
Figura 4.74 - STFT da EA do Ensaio em Escala Real, aquisições 20 (a) e 45 (b); sinais no tempo apresentados nas Figs. 4.75b e 8.39.....	129
Figura 8.1 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 01, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	139
Figura 8.2 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 03, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	139
Figura 8.3 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 04, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	140

Figura 8.4 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 06, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	140
Figura 8.5 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 08, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	141
Figura 8.6 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 09, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	141
Figura 8.7 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 10, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	142
Figura 8.8 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 12, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	142
Figura 8.9 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 13, com forças e RMS da EA	143
Figura 8.10 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 14, com forças e RMS da EA	143
Figura 8.11 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 19, com forças e RMS da EA	144
Figura 8.12 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 21, com forças e RMS da EA	144
Figura 8.13 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 22, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	145
Figura 8.14 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 24, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	145
Figura 8.15 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 25, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	146
Figura 8.16 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 26, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	146
Figura 8.17 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 28, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	147
Figura 8.18 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 30, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	147
Figura 8.19 -	Medições referentes ao riscamento do ensaio 31, com forças e RMS da EA	148

Figura 8.20 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 32, com forças e RMS da EA	148
Figura 8.21 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 37, com forças e RMS da EA	149
Figura 8.22 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 39, com forças e RMS da EA	149
Figura 8.23 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 40, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	150
Figura 8.24 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 41, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	150
Figura 8.25 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 43, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	151
Figura 8.26 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 44, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	151
Figura 8.27 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 47, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	152
Figura 8.28 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 48, com forças, RMS da EA e frequências de pico por <i>burst</i>	152
Figura 8.29 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 50, com forças e RMS da EA	153
Figura 8.30 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 51, com forças e RMS da EA	153
Figura 8.31 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 55, com forças e RMS da EA	154
Figura 8.32 - Medições referentes ao riscamento do ensaio 57, com forças e RMS da EA	154
Figura 8.33 - Tensão RMS e frequências de pico da EA adquirida nos ensaios abrasivos 02, 03, 05, 06, 20, 21, 23, e 24. Corpos de aço 1010, carga e granulometria do papel abrasivo, vide Tab. 3.2	155
Figura 8.34 - Tensão RMS e frequências de pico da EA adquirida nos ensaios abrasivos 08, 09, 11, 12, 26, 27, 29, e 30. Corpos de PA, carga e granulometria do papel abrasivo, vide Tab. 3.2	156

Figura 8.35 - Tensão RMS e frequências de pico da EA adquirida nos ensaios abrasivos 14, 15, 17, 18, 32, 33, 35, e 36. Corpos de PU, carga e granulometria do papel abrasivo, vide Tab. 3.2	157
Figura 8.36 - Frequências de pico das aquisições 02, 03, 04, 05, 07, 08, 09, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 dos ensaios de deslizamento em escala reduzida...	158
Figura 8.37 - Frequências de pico das aquisições 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 e 41 dos ensaios de deslizamento em escala reduzida...	159
Figura 8.38 - Valor RMS da EA das aquisições 01 a 25 dos ensaios de deslizamento em escala real, com exceção da Aquisição 05, que não foi realizada	160
Figura 8.39 - Valor RMS da EA das aquisições 26 a 50 dos ensaios de deslizamento em escala real, com exceção das Aquisições 31 e 32, que não foram realizadas	161

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Símbolos

<i>COF</i>	Coeficiente de Atrito (<i>Coefficient of Friction</i>)
<i>d</i>	Distância (mm)
<i>f</i>	Frequência (Hz)
<i>FN</i>	Força Normal
<i>FT</i>	Força Tangencial
<i>F</i>	Frequência de Amostragem
<i>S</i>	Número de amostras (<i>Samples</i>)
<i>t</i>	Tempo (s)
<i>Y(f)</i>	Espectro em função da frequência

Abreviações

EA	Emissão Acústica
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
IA	Inteligência Artificial
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PA	Poliamida (ou <i>Nylon</i>)
PAC	Physical Acoustics Corporation
PC	Policarbonato
PEEK	Poli(éter-éter-cetona) (<i>Poly(ether-ether-ketone)</i>)
PMMA	Polimetil-metacrilato (ou Acrílico)
PS	Poliestireno
PSD	Densidade Espectral de Potência (<i>Power Spectrum Density</i>)
PU	Poliuretano
PZT	Titanato zirconato de chumbo (<i>Lead zirconate titanate</i> ou <i>Piezoelectric Transducer</i>)
RMS	Raiz da Média Quadrática (<i>Root Mean Square</i>)
SEN	Ensaio de Tração com Entalhe (<i>Single Edged Notch Tensile Testing</i>)
STFT	Transformada de Fourier de Tempo Curto (Short Time Fourier Transform)
TPU	Poliuretano Termoplástico (<i>Thermoplastic Polyurethane</i>)
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Emissão Acústica.....	8
2.1.1. Sinais Acústicos.....	8
2.1.2. Sistemas de Medição de Emissão Acústica.....	9
2.1.3. Análise de Sinais de Emissão Acústica	11
2.2. Aplicação de Emissão Acústica em Processos Tribológicos.....	14
2.2.1. Detecção e Intensidade do Desgaste.....	14
2.2.2. Identificação de Mecanismos de Desgaste.....	15
2.2.3. Ensaios Típicos	18
2.2.4. Ferramentas e Parâmetros Típicos	28
2.2.5. Desgaste em Poliuretanos Termoplásticos.....	33
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	35
3.1. Emissão Acústica.....	36
3.1.1. Equipamentos para medição da Emissão Acústica	36
3.1.2. Processamento de Sinais.....	37
3.2. Ensaios de Esclerometria Retilínea.....	38
3.2.1. Procedimentos dos Ensaios de Esclerometria Retilínea	38
3.2.2. Equipamento de Ensaios de Esclerometria Retilínea.....	42
3.2.3. Aquisição de Sinais Acústicos nos Ensaios de Esclerometria Retilínea	44
3.2.4. Matriz de Ensaios de Esclerometria Retilínea.....	44
3.3. Ensaios Abrasivos	45
3.3.1. Procedimentos de Ensaios no Abrasômetro.....	45
3.3.2. Equipamento para Ensaios Abrasivos.....	48
3.3.3. Aquisição de Sinais Acústicos nos Ensaios no Abrasômetro	50
3.3.4. Matriz de Ensaios no Abrasômetro.....	52
3.4. Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida.....	53
3.4.1. Procedimentos dos Ensaios em Escala Reduzida	53
3.4.2. Equipamento de Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida.....	55
3.4.3. Aquisição de Sinais Acústicos nos Ensaios em Escala Reduzida	56
3.4.4. Matriz de Ensaios em Escala Reduzida	56
3.5. Ensaio de Deslizamento em Escala Real.....	58
3.5.1. Procedimentos do Ensaio de Deslizamento em Escala Real.....	58
3.5.2. Equipamento de Ensaios de Deslizamento em Escala Real.....	61
3.5.3. Aquisição de Sinais Acústicos no Ensaio em Escala Real.....	61

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1. Ensaios de Esclerometria Retilínea.....	64
4.1.1. Riscamentos em aço revestido com Níquel químico.....	64
4.1.2. Riscamentos em polímeros utilizando baixos ângulos de ataque.....	67
4.1.3. Riscamentos em Poliestireno (PS).....	72
4.1.4. Riscamentos em Acrílico (PMMA).....	82
4.1.5. Riscamentos em Policarbonato (PC).....	86
4.1.6. Emissão Acústica em Ensaios de Esclerometria Retilínea.....	90
4.2. Ensaios Abrasivos	91
4.2.1. Avaliação tribológica e Frequências de pico.....	91
4.2.2. Análise de conglomerados	102
4.2.3. Emissão Acústica em Ensaios Abrasivos	109
4.3. Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida.....	111
4.3.1. Avaliação tribológica	112
4.3.2. Avaliação acústica	115
4.4. Ensaios de Deslizamento em Escala Real.....	120
4.4.1. Avaliação tribológica	120
4.4.2. Avaliação acústica	122
4.4.3. Monitoramento do liner via EA	130
5. CONCLUSÕES	131
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	132
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
8. APÊNDICES	138
Apêndice A - Ensaios de Esclerometria Linear.....	139
Apêndice B - Ensaios Abrasivos	155
Apêndice C - Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida.....	158
Apêndice D - Ensaios em Escala Real.....	160
9. ANEXOS	162
Anexo A - Descritivo do sensor modelo Micro30	163
Anexo B - Descritivo do Sensor modelo ISPKWDIUC	164
Anexo C - Certificado de Calibração do sensor FE13 modelo Micro30	165
Anexo D - Certificado de Calibração do sensor FE14 modelo Micro30	165
Anexo E - Certificado de Calibração do sensor AA11 modelo ISPKWDIUC	166
Anexo F - Descritivo da Placa de Aquisição de Dados PCI-2	167

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A extração de petróleo é uma das atividades mais importantes dentro do atual contexto socioeconômico mundial e vista como estratégica por muitos países, dentre eles o Brasil. Ela é importante do ponto de vista socioeconômico devido à geração de empregos e de riquezas para os países exploradores e é estratégica por se tratar de um recurso finito extremamente importante para a economia. Por ser um país privilegiado pela grande quantidade de petróleo em seu território e por se tratar de um insumo tão valioso, o Brasil tem investido recursos financeiros e intelectuais na pesquisa e no desenvolvimento de sua exploração. Tal desenvolvimento visa ajudar o país a se tornar mais próspero e mais respeitado e influente no cenário internacional.

Uma peculiaridade do petróleo brasileiro é que boa parte dele se encontra em bacias no fundo do mar, o que trás uma série de dificuldades à sua extração. Isso gera a necessidade de plataformas de extração que operam em alto-mar, além de uma tecnologia que, acima de tudo, seja segura ecologicamente. Na verdade, o projeto de uma plataforma e de seus componentes deve visar a segurança dos operadores, do equipamento e do meio ambiente sem que isso implique em menores produtividades ou em maiores custos.

Dentro do projeto de uma plataforma de extração como um todo, um dos pontos críticos é a manutenção dos dutos flexíveis e dos enrijecedores. Os dutos flexíveis, também conhecidos como *risers* na sua parte vertical (Fig. 1.1), são responsáveis principalmente pelo transporte de petróleo do fundo do mar até a plataforma. Entretanto, tal componente está sujeito a flexões elevadas que podem levá-lo à ruptura na região do conector, sendo então necessária a instalação de um enrijecedor, também chamado de *bend stiffener*, para limitar seus movimentos (Fig. 1.2). Entretanto, o duto flexível e o enrijecedor estão em constante processo de deslizamento um contra o outro, e seu desgaste prematuro pode forçar sucessivas paradas da produção para sua substituição, ou até mesmo culminar em um vazamento, causando grandes prejuízos à operadora da plataforma.

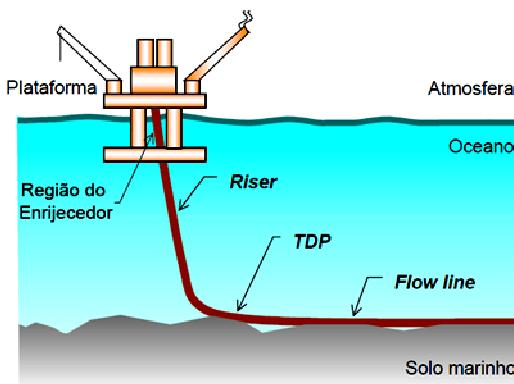


Figura 1.1 - Representação esquemática do duto flexível de uma plataforma flutuante (RAMOS NETO, 2003)

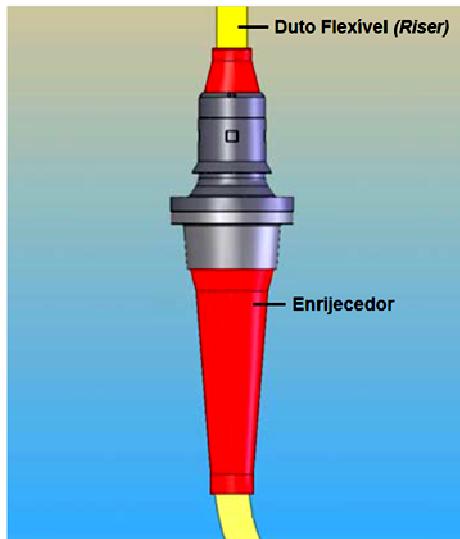


Figura 1.2 - Representação esquemática do enrijecedor limitando os movimentos do duto flexível (HWANG et al., 2006, adaptada)

Os dutos flexíveis são compostos por camadas intercaladas de aço, que fornecem rigidez e resistência às pressões externas e internas, e de polímero, que fornecem flexibilidade e selamento (BAI; BAI, 2005). A camada mais externa dos dutos flexíveis é composta de poliamida (PA) para proteger as camadas metálicas contra a corrosão. Entretanto, ao passo que a escolha desse material resolve o problema da corrosão, também agrava o problema do desgaste, de modo que na região onde a capa de PA está em contato com o enrijecedor, o desgaste pode levar à total degradação do material polimérico até o ponto de expor as camadas metálicas internas. Para solucionar este problema, tem sido introduzido dentro do enrijecedor um *liner* (Fig. 1.3), que nada mais é do que um forramento fusível com uma finalidade essencialmente tribológica, ou seja, com a finalidade de reduzir o desgaste do duto flexível de poliamida (MORAES, 2013; BERTHOLDI, 2014).

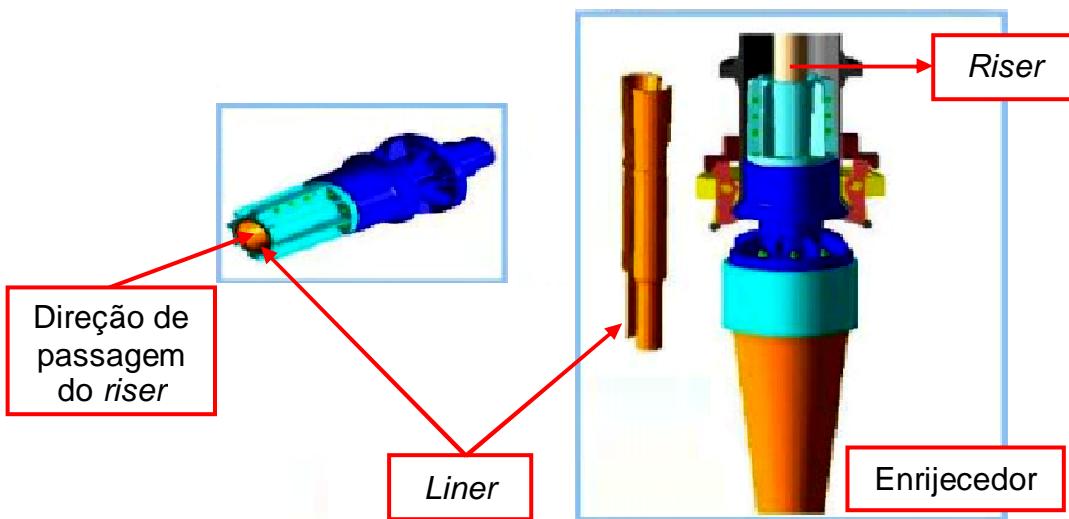


Figura 1.3 - Região em que o duto flexível (*riser*) entra em contato com o enrijeedor através do *liner* (LEMOS *et al.*, 2004, adaptada)

O Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) tem se dedicado à investigação desse problema nos últimos anos. Seus pesquisadores têm trabalhado na investigação dos melhores materiais para compor o sistema e dos fatores que mais influenciam em sua deterioração, bem como na quantificação de sua vida útil e na identificação dos meios de se prolongá-la. Neste sentido, foi desenvolvido e construído um tribômetro em grande escala (Fig. 1.4) capaz de simular o movimento relativo entre o *liner* e o duto flexível em escala real (HWANG *et al.*, 2006). Seus objetivos principais são estudar o desgaste em função dos materiais, da geometria, das cargas e dos ciclos de carregamento. Trabalhos mais recentes têm ido além, buscando uma metodologia para medir o desgaste nas peças poliméricas através da perda de volume após o ensaio (MORAES, 2013) e buscando correlacionar os resultados em grande escala fornecido pelo tribômetro com os resultados em pequena escala em equipamentos menores e em testes mais curtos (BERTHOLDI, 2014).

Contudo, ainda não havia sido desenvolvido nenhum projeto de monitoramento do desgaste do par tribológico em questão. Monitorar o desgaste significa realizar sua avaliação em tempo real, sendo que por avaliação entende-se tanto apontar a presença de desgaste no sistema, quanto estimar sua severidade e distinguir os mecanismos presentes.

Uma das formas de se monitorar o desgaste é através da Emissão Acústica (EA). A Emissão Acústica se desponta como a melhor alternativa para se realizar o monitoramento em questão, uma vez que permite a avaliação de um sistema tribológico sem que se interrompa a operação e se desmonte todos os sistemas associados.

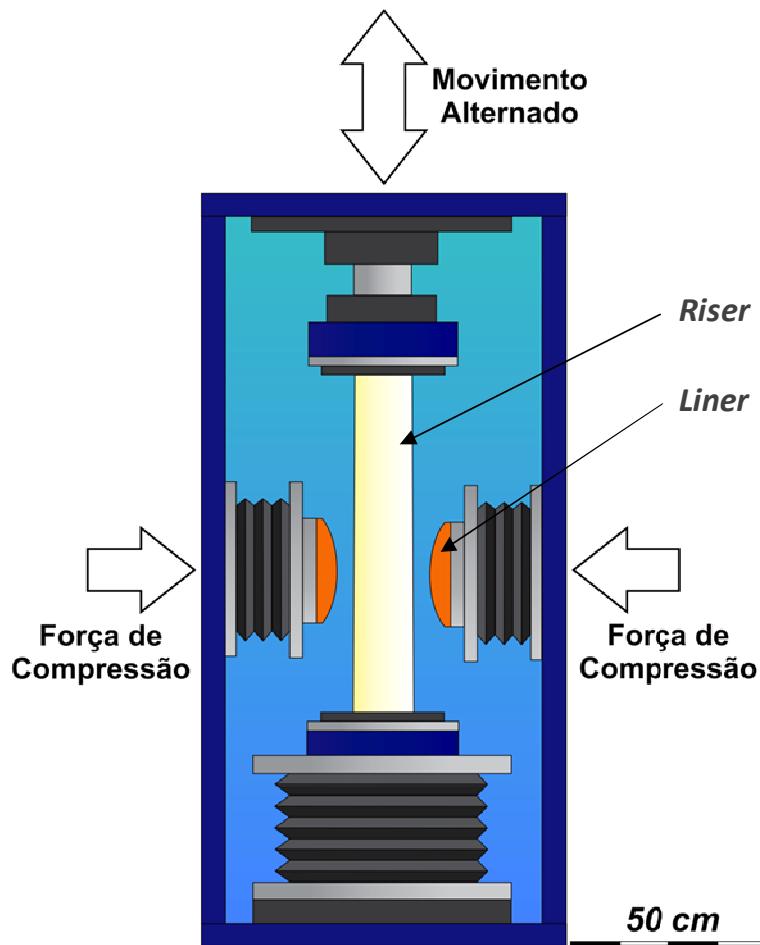


Figura 1.4 - Representação esquemática do tribômetro em grande escala para simulação da interação entre *liner* e duto flexível (*riser*) no LTAD

Segundo a norma ASTM E1316 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2011), a *"Emissão Acústica é definida como a classe de fenômenos nos quais ondas transientes de tensão elástica são geradas pela liberação rápida de energia a partir de fontes dentro do material."* Em outras palavras, a EA se trata de ondas mecânicas acústicas que se propagam pelo material quando este sofre algum tipo de falha interna. Essas fontes dentro do material podem ser trincas se propagando, ruptura de juntas adesivas, corte de material, descolamento de revestimentos ou de partículas embutidas em uma matriz, formação de martensita, dentre outras (BRAY; McBRIDE, 1992).

Deste modo, a análise de sinais de EA, ou simplesmente sinais acústicos, pode fornecer resultados em tempo real, ou seja, sem a necessidade de se interromper a operação para realizar qualquer tipo de avaliação (BRAY; McBRIDE, 1992).

A principal aplicação da EA é averiguar a ocorrência de desgaste e estimar sua intensidade, ambos através de análises no domínio do tempo. Entretanto, tais análises não exploram todo potencial do método da EA. Como o padrão das ondas acústicas é função do tipo de falha em curso, pode-se também distinguir os mecanismos de falha (GROSSE; OHTSU, 2008). Para analisar esses padrões, são usadas técnicas de análise de sinais no domínio da frequência baseadas na Transformada Rápida de Fourier (FFT), como a Densidade Espectral de Potência (PSD), a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) e a frequência de pico (GROSSE *et al.*, 2004; GROSSE; OHTSU, 2008; GUTKIN *et al.*, 2011). A partir destas ferramentas, é possível estabelecer uma correlação entre os mecanismos presentes em um determinado ensaio e os padrões acústicos correspondentes.

Um obstáculo ao uso da EA no desgaste de polímeros é que a literatura técnica é dominada por estudos em metais, havendo poucos trabalhos sobre polímeros. Isto se deve a dois motivos. Em primeiro lugar, os materiais poliméricos apresentam um elevado amortecimento, que tende a atenuar as ondas acústicas geradas pelas falhas internas, o que impõe limitações sérias ao estudo desses materiais. Além disso, os principais trabalhos envolvendo EA em polímeros são focados em materiais compósitos, geralmente polímeros reforçados com fibras (KALOGIANNAKIS *et al.*, 2008; KEMPF *et al.*, 2014). O interesse em tais materiais é uma questão de demanda, já que os compósitos são soluções promissoras para vários dos desafios atuais em engenharia. Contudo, a análise de compósitos é diferente da que ocorre em polímeros, pois eles se degradam de maneiras diferentes, apresentando, por exemplo, falhas por descolamento do material embutido na matriz, algo que não ocorre no desgaste de polímeros. Por este motivo, apesar de ser possível transportar a metodologia usada nestes trabalhos para a presente aplicação, existe uma certa dificuldade em se comparar os resultados das duas aplicações.

O método da Emissão Acústica já foi usado em outras situações, apesar de raras, para monitorar dutos flexíveis. Out *et al.* (1995) tentaram discriminar, através de testes preliminares empregando a EA, os mecanismos de desgaste no seu interior e no seu deslizamento contra o enrijecedor. Apesar de terem sido capazes de detectar a presença de desgaste, eles não foram capazes de distinguir os mecanismos e seus resultados não foram conclusivos. Mais recentemente, Clarke *et al.* (2011) obtiveram êxito ao empregar a energia da EA para detectar o momento em que as tiras metálicas que compõem o duto flexível se romperam. Um exemplo semelhante é um sistema comercial desenvolvido no Brasil para monitoramento da integridade estrutural de dutos flexíveis, capaz de informar tanto a quantidade de tiras rompidas quanto a região do rompimento (PASA, 2014). Entretanto, não foram encontrados trabalhos aplicando a EA no deslizamento do *riser* contra o *liner*.

Neste sentido, é justificável que se avance na tentativa de monitorar o contato entre duto flexível e *liner* em escala real. No entanto, a literatura técnica na área de EA aplicada à tribologia demonstra o cuidado de se realizar testes mais simples e com resultados mais fáceis de serem compreendidos antes de se realizar tais ensaios em escala real. Esta filosofia de trabalho permite tanto compreender a EA e seus métodos de análises quanto começar a acumular dados sobre o comportamento acústico do desgaste de polímeros em testes mais simples e com condições mais controladas. Neste sentido, uma vez que os objetivos do laboratório incluem o estudo do desgaste no deslizamento entre duto flexível e *liner* em escala reduzida, estes ensaios também são justificáveis. Poderam ter sua atividade acústica medida e estudada.

Tendo tudo isto em mente, foi determinado como objetivo geral desta dissertação estabelecer as bases para monitoramento em tempo real do desgaste e de *risers* deslizando contra um *liner*. A estratégia adotada foi primeiro compreender a EA e depois verificar sua aplicabilidade no sistema estudado, para que, a partir de então, se pudesse partir para o estudo de um sistema de monitoramento propriamente dito. Os objetivos específicos, por sua vez, foram:

1. estudar os mecanismos de falha de polímeros, bem como seu comportamento acústico, em ensaios de esclerometria retilínea e ensaios abrasivos;
2. verificar até que ponto a EA é útil no estudo desses ensaios;
3. privilegiar as análises realizadas, quando possível, nos polímeros que formam o sistema *liner*/duto flexível, que são respectivamente a poliamida e o poliuretano;
4. ensaiar materiais do duto flexível e do *liner* em escala reduzida, identificando o que é possível transpor para os ensaios em escala real;
5. medir a EA em um ensaio do duto flexível contra o *liner* em escala real;
6. compreender as ferramentas de análise da EA no domínio da frequência, em especial a frequência de pico.

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos. No Capítulo II, é apresentada primeiramente a teoria da Emissão Acústica, com ênfase no detalhamento da natureza do sinal acústico, as formas de medi-lo e analisá-lo. Em seguida, é explicado como a EA pode detectar e até mesmo identificar mecanismos de desgaste. Por fim, são apresentados os principais ensaios envolvendo a EA no desgaste de polímeros e as principais ferramentas utilizadas em sua análise. Neste capítulo, também foi tomado um cuidado especial, de modo a trazer as principais tendências em pesquisas na área, mesmo que nem todo o conteúdo tenha sido aproveitado nos ensaios realizados.

Em seguida, o Capítulo III apresenta os ensaios realizados. Sua primeira parte descreve em detalhes o sistema de medição empregado no trabalho, para depois descrever os ensaios realizados: seus equipamentos de testes, as amostras, os sensores e as metodologias de análises. O Capítulo IV apresenta os resultados dos experimentos descritos no capítulo anterior, juntamente com uma discussão e uma análise crítica deles. Finalmente, a Conclusão no Capítulo V resume todos os conhecimentos gerados durante os ensaios, tendo em vista os objetivos do trabalho, enquanto o Capítulo VI apresenta uma sugestões de possíveis trabalhos futuros que podem ser realizados tendo como base o que já foi desenvolvido nesta dissertação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Emissão Acústica

2.1.1. Sinais Acústicos

As ondas acústicas resultantes da emissão de energia por fontes dentro de um material devido a eventos tribológicos ou a trincas são essencialmente do tipo transientes. Em consequência disso, ao se monitorar um determinado material pode-se encontrar dois tipos de sinais distintos: o contínuo e o *burst* (estouro), que podem ser vistos na Fig. 2.1.

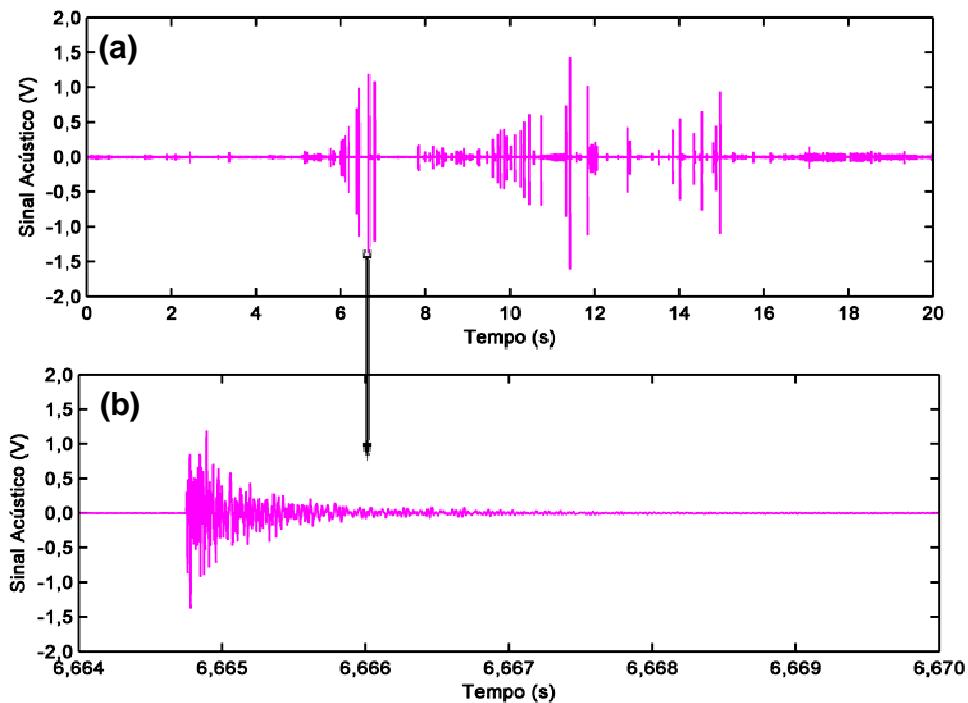


Figura 2.1 - Sinal Acústico, com regiões contínuas e com *bursts* (a). Em detalhe, a ampliação de um *burst* (b)

Os sinais de EA chamados de contínuos são estacionários e representam ruídos como a interferência ou eventos mecânicos aproximadamente constantes. Já sinais do tipo *burst* são pequenos trechos transientes que se destacam do sinal contínuo pela sua alta amplitude e que representam algum evento físico em curso (BRAY; McBRIDE, 1992).

Os sinais de Emissão Acústica, ou simplesmente sinais acústicos, mais comuns e relevantes em eventos tribológicos estão numa faixa de frequências que parte de algumas dezenas de kHz, compreendendo assim eventos audíveis, até por volta de 1 MHz. Devido à baixa amplitude destes sinais, eles normalmente são amplificados duas vezes: primeiro por um pré-amplificador com ganho de até 1.000 vezes (60 dB) e depois por um amplificador principal, com ganho por volta de 100 vezes (GROSSE; OHTSU, 2008).

O método da Emissão Acústica é do tipo passivo, o que significa que ela apenas mede os fenômenos que acontecem naturalmente, sem provocá-los. Portanto, ela se difere de métodos como o ultrassom e a impedância eletromecânica, que exigem a imposição de uma excitação ao sistema que se deseja estudar. Da mesma forma que os métodos ativos, ela permite que se determine, através do uso de múltiplos sensores efetuando medições simultaneamente, a posição exata em que a falha ocorreu. Mais do que isso, ela também permite que se acompanhe e se observe um evento como uma trinca do seu início até seu fim. Em contrapartida, a EA só é capaz de apontar a existência de uma falha no exato momento em que ela ocorre, não sendo possível detectá-la após seu término.

2.1.2. Sistemas de Medição de Emissão Acústica

Os sistemas de medição de EA normalmente são compostos por um sensor, seguido por um pré-amplificador, um amplificador principal, um filtro e um conversor A/D, sendo que estes três últimos costumam vir integrados em um único equipamento, a placa de aquisição. A Figura 2.2 ilustra o esquema geral de um típico sistema de medição de sinais acústicos.

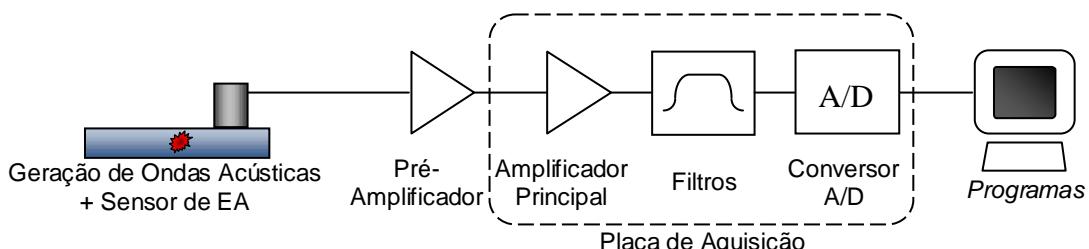


Figura 2.2 - Típico sistema de medição de Emissão Acústica

a) Sensores Piezoeletricos

Apesar de existirem diversos tipos de sensores, como os sensores laser e os capacitivos, os mais usados são os piezoeletricos devido a sua combinação de baixo custo, alta sensibilidade, fácil instalação e manuseio e resposta em frequência em uma banda razoavelmente extensa. Um sensor piezoeletro típico, conforme ilustrado na Fig. 2.3, é composto por um elemento encapsulado, formado por um material cerâmico chamado PZT (*Piezoelectric Transducer* ou *Titanato zirconato de chumbo*), geralmente de pequenas dimensões (GROSSE; OHTSU, 2008).

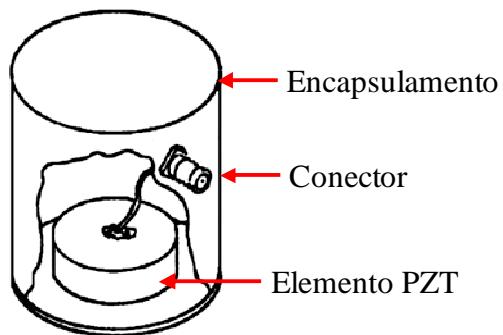


Figura 2.3 - Esquema de um sensor piezoeletro típico (GROSSE; OHTSU, 2008)

A definição da faixa de operação de sensores piezoeletricos depende de sua resposta em frequência, sendo normalmente empregados nas bandas de frequência nas quais há ressonância de modo a maximizar a sensibilidade (GROSSE; OHTSU, 2008). Além disso, a resposta em frequência de cada sensor é única, apesar das respostas de sensores do mesmo modelo serem bastante semelhantes.

b) Reproduzibilidade

O método da EA apresenta sérias dificuldades na reprodução dos resultados. Como cada sensor possui uma resposta em frequência única, o mesmo sinal pode possuir características diferentes dependendo do tipo de sensor utilizado, alterando até mesmo o resultado final (KEMPF *et al.*, 2014). A escolha de um transdutor com uma faixa de medição em frequência inadequada pode causar sérias distorções no sinal adquirido (BRAY; McBRIDE, 1992). Por exemplo, Lingard *et al.* (1993) observaram que ao se alterar o sensor utilizado em um ensaio, a frequência de pico relacionada ao sinal acústico alterava. Isto ocorreu porque sensores diferentes podem amplificar regiões distintas do espectro, apontando frequências máximas diferentes para o mesmo sinal a ser adquirido.

Apesar das características do sensor influenciarem na medição do espectro de frequência da onda acústica, a posição do sensor altera apenas a amplitude, com attenuações maiores à medida que o sensor se afasta do evento (NI; IWAMOTO, 2002). Além disso, altas temperaturas de contato no deslizamento também levam à diminuição da amplitude da EA devido a complexos fenômenos físicos (BARANOV *et al.*, 2007).

2.1.3. Análise de Sinais de Emissão Acústica

Os sinais de EA fornecidos por um sensor piezoelétrico podem ser analisados tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Em geral, análises no domínio do tempo tendem a ser quantitativas, enquanto que análises no domínio da frequência tendem a ser qualitativas, apesar de não ser uma regra. A seguir, tais metodologias são apresentadas.

a) Análises no Domínio do Tempo

Devido a limitações tecnológicas, os primeiros trabalhos envolvendo EA faziam a contagem de pulsos que excediam um limiar pré-estabelecido (*threshold*). Em seguida, eles relacionavam a quantidade de pulsos medidos (ou a taxa de pulsos) com a intensidade das falhas que ocorriam (BRAY; McBRIDE, 1992). Entretanto, este método mostrou-se não ser muito preciso por desconsiderar a amplitude dos picos, motivo pelo qual foi substituído posteriormente pela Raiz Média Quadrática (tensão RMS ou *Root Mean Square*) do sinal. A tensão RMS é útil porque é um modo de avaliar a energia contida em um sinal de EA (FERRARESI, 1996). Neste sentido, o sinal da tensão RMS pode ser usado para detectar a presença de *bursts* e determinar sua amplitude, sendo útil para detectar a presença de falhas durante um ensaio, bem como sua intensidade.

O procedimento para o cálculo da tensão RMS é elevar o sinal ao quadrado, filtrá-lo com um filtro passa-baixa uma ou duas vezes e depois extrair a raiz quadrada (FERRARESI, 1996). Este procedimento pode ser feito tanto analogicamente, antes do sinal ser convertido, quanto digitalmente, através de um computador.

b) Análises no Domínio da Frequência

Salvo em raras exceções, como os experimentos realizados por Jiaa e Dornfeld (1990), a tensão RMS de um sinal não pode ser usada para distinguir dois tipos de falhas diferentes presentes em um mesmo sinal acústico. Para fazer esse tipo de distinção, é comum usar o espectro em frequência do sinal, uma vez que falhas diferentes possuem características diferentes em frequência.

O método de cálculo do espectro de um sinal é a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que é um algoritmo amplamente dominado e difundido (GROSSE; OHTSU, 2008; NEWLAND, 1975). Sinais adquiridos no tempo por um sensor e digitalizados por um conversor A/D podem ter seus espectros calculados pela FFT, sendo que suas características dependem da frequência de amostragem e do número de pontos adquiridos. A frequência de amostragem, por sua vez, determina outros dois parâmetros da FFT: o primeiro é a frequência máxima observável no espectro resultante, que corresponde à metade da frequência de amostragem, e o segundo é o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas, que é o inverso da frequência de amostragem. Nota-se que, conhecendo um dos valores entre a frequência de amostragem, o intervalo entre amostras e a máxima frequência observável, pode-se obter os outros dois valores.

Já a razão entre a frequência de amostragem e o número de pontos resulta na resolução em frequência do espectro. O período de amostragem, que é a duração total da aquisição, se trata do inverso da resolução em frequência.

Com o objetivo de organizar as relações entre as variáveis, foi denominado de conjunto 1 a frequência de amostragem, o intervalo entre amostras e a máxima frequência, de conjunto 2 o período de amostragem e a resolução em frequência, e de conjunto 3 o número de pontos adquiridos. Quando se conhece uma variável de qualquer conjunto, se conhece todas as demais daquele conjunto. E quando se conhece duas variáveis de conjuntos diferentes, pode-se saber uma variável do terceiro conjunto. Deste modo, conhecendo-se duas variáveis de conjuntos diferentes, pode-se calcular todas as outras quatro variáveis. O procedimento para este cálculo pode ser visto na Tab. 2.1, que exibe a relação entre as características da FFT de um dado sinal.

Tabela 2.1 - Parâmetros da aquisição de dados e características da FFT

Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3
Frequência de Amostragem f_a	Período de Amostragem T_a	Número de Pontos $N_p = f_a * T_a$
Intervalo entre Amostras $\Delta t = f_a^{-1}$	Resolução em Frequência $\Delta f = T_a^{-1}$	
Máx. Frequência Observável $f_m = f_a/2$		

O algoritmo da FFT resulta em um número complexo para cada frequência do eixo das abscissas. O módulo desse complexo equivale à intensidade do sinal naquela frequência e seu argumento é a fase. Em geral, trabalha-se com a Densidade Espectral de Energia (PSD ou *Power Spectrum Density*) de um sinal, que nada mais é do que o quadrado do valor complexo em função da frequência.

Por fim, existe uma série de parâmetros que podem ser calculados com base na FFT de um sinal e que acabam sendo muito mais práticos durante um estudo envolvendo EA, especialmente quando se deseja implementar um monitoramento com auxílio de Inteligência Artificial (IA). Estes parâmetros serão apresentados posteriormente na seção 2.2.4.

c) Transformada de Fourier de Tempo Curto

Uma das formas de se tentar contornar a característica transiente de sinais acústicos é usando a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), também conhecida como Transformada Janelada de Fourier. Na FFT, informações transientes têm sua amplitude alterada no resultado final, além de não poderem ser localizadas. Isto acontece porque a FFT fornece apenas um espectro em função da frequência, sem levar em consideração a progressão do sinal ao longo do tempo.

A Transformada de Fourier de Tempo Curto consiste em subdividir a amostragem de um sinal em trechos menores e de iguais durações e aplicar a FFT de maneira consecutiva a cada um deles (GROSSE *et al.*, 2004). Desta forma, pode-se verificar o momento em que sinais transientes surgiram e qual seu espectro, com menores erros na amplitude. Geralmente, o resultado da STFT é apresentado ou em um gráfico 3D ou em forma de spectrograma (MARINESCU; AXINTE, 2009; WOO *et al.*, 2014).

A grande desvantagem deste método é a relação entre resolução em frequência e resolução no tempo, pois sempre que se melhora uma, perde-se na outra (GROSSE *et al.*, 2004). Conforme mostra a Tab. 2.1, ao se diminuir o período da amostragem, que no caso da STFT representa a resolução no tempo, obtém-se uma pior resolução em frequência, o mesmo valendo no caso contrário.

Uma abordagem mais recente que visa solucionar esta relação entre resoluções no tempo e na frequência é a transformada Wavelet. Sua proposta é trabalhar com filtros com frequência de corte cada vez menores, obtendo resoluções em frequência piores com resoluções melhores nas altas frequências do espectro e resoluções em frequência melhores e resoluções em tempo piores nas baixas frequências (GROSSE *et al.*, 2004). A

grande vantagem dessa abordagem é que componentes espectrais de alta frequência oscilam mais rapidamente, requerendo melhores resoluções no tempo, ao contrário do que ocorre nas baixas frequências. Entretanto, apesar da STFT ser uma ferramenta menos sofisticada, ela é satisfatória em aplicações mais simples.

2.2. Aplicação de Emissão Acústica em Processos Tribológicos

2.2.1. Detecção e Intensidade do Desgaste

Uma das aplicações mais simples da EA no monitoramento de sistemas tribológicos é a detecção da presença de mecanismos de desgaste. Usando apenas a energia do sinal acústico é possível saber, por exemplo, quando eventos como trincamento e delaminação começaram a ocorrer durante o riscamento de uma amostra de aço revestida com Ni-P (ARAÚJO, 2008).

Um exemplo pode ser visto na Fig. 2.4, que exibe a micrografia do riscamento em uma amostra metálica por um penetrador com ponta de diamante e a energia acústica medida durante o processo. Nela se pode notar uma correlação entre o surgimento de trincas laterais e a ocorrência de picos de EA. As regiões do riscamento consideradas mais críticas (1 a 4 na figura) foram posteriormente ampliadas para correlacionar com a EA.

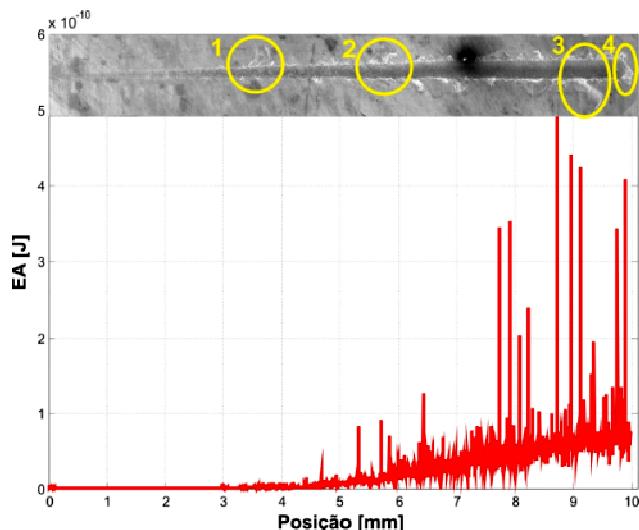


Figura 2.4 - Micrografia do risco em uma amostra de aço revestida com NiP e a energia acústica associada ao riscamento. As regiões 1 a 4 indicam posições nas quais foram realizados registros ampliados (ARAÚJO, 2008)

A energia acústica também foi utilizada para detectar o rompimento de tiras metálicas dentro de dutos flexíveis em ensaios em escala real realizados por Clarke *et al.* (2011). Nota-se na Fig. 2.5 como a energia aumenta toda vez que uma tira se rompe, o que demonstra que este método é capaz de monitorar a integridade de dutos flexíveis.

Também é possível usar a amplitude do sinal acústico, tanto através de sua energia quanto através do seu valor RMS, para determinar a intensidade do desgaste. Usando esta abordagem, Kannatey-Asibu e Dornfeld (1982) demonstraram que o valor RMS do sinal acústico aumenta de acordo com o aumento do desgaste de flanco de uma ferramenta de corte. Entretanto, este tipo de abordagem também pode ser usada com sucesso na investigação da intensidade do desgaste no deslizamento de duas superfícies (JIAA; DORNFELD, 1990).

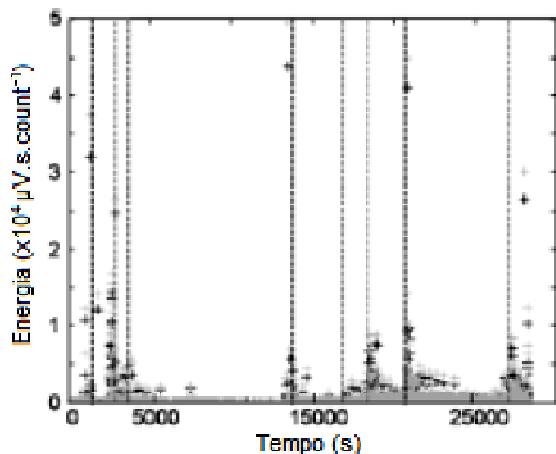


Figura 2.5 - Energia da Emissão Acústica no ensaio de um duto flexível. As linhas verticais escuras marcam rupturas nas tiras metálicas e as cinza indicam mudanças no carregamento. (CLARKE *et al.*, 2011, adaptada)

2.2.2. Identificação de Mecanismos de Desgaste

A distinção entre os diferentes mecanismos de degradação em sistemas tribológicos também é possível de ser realizada através do método da EA. Uma maneira simples de se realizar esse tipo de estudo é usar a intensidade da EA para indicar a transição entre os mecanismos. Usando esta abordagem, Jiaa e Dornfeld (1990) demonstraram que é possível detectar a transição de adesão (maior intensidade) para abrasão (menor intensidade) em certos pares metálicos. Contudo, esta abordagem só é possível quando os eventos ocorrem em instantes diferentes e possuem uma diferença significativa na sua intensidade, o que nem sempre ocorre.

Outra abordagem possível é utilizar sensores com diferentes respostas em frequência. Out *et al.* (1995) empregaram dois sensores com sensibilidades em bandas diferentes, um nas proximidades de 30 kHz e outro nas de 175 kHz, no monitoramento de um duto flexível ensaiado em escala real. Eles observaram que o valor RMS de cada um deles apresentava comportamentos diferentes de acordo com a aplicação de cargas. Eles tentaram então associar os tipos de sinal obtidos aos eventos tribológicos presentes no sistema, tais como trincas, desgaste entre as camadas do duto flexível ou o atrito com o enrijecedor. Contudo, seus estudos não foram conclusivos e foi apontada a necessidade de se usar uma metodologia mais aprimorada do que a empregada.

A literatura mostra que quando se deseja distinguir diferentes fontes de eventos acústicos, as análises no domínio da frequência são mais adequadas do que as no domínio do tempo. Em geral, cada mecanismo de desgaste gera ondas acústicas com um espectro característico. O que diferencia dois mecanismos são a faixa na qual os picos de frequência surgem e a amplitude dos picos (KALOGIANNAKIS *et al.*, 2008; GUTKIN *et al.*, 2011). Além disso, para um dado mecanismo de desgaste, os materiais do par tribológico possuem pouca influência sobre o espectro da EA (HASE *et al.*, 2012; WOO *et al.*, 2014).

O modo mais simples de se aplicar este tipo de estudo é comparando os espectros de frequência, ou os PSD, de sinais provenientes dos diversos mecanismos. Um exemplo pode ser visto em Yanaka *et al.* (1995), que usou esta abordagem para distinguir diferentes modos de trincamento em um polímero revestido de SiOx. Também usando este método, Hase *et al.* (2012) conduziram em extenso trabalho experimental e de revisão, elaborando um mapa que correlaciona diversos mecanismos de desgaste com características de seu PSD, como pode ser observado na Fig. 2.6.

Contudo, este tipo de abordagem possui dois problemas. O primeiro deles é que nem sempre é fácil, ou mesmo possível, isolar os mecanismos de desgaste em um ensaio que visa reproduzir as condições reais do sistema que se deseja monitorar. Os resultados deste tipo de experimento nem sempre podem ser analisados com facilidade, uma vez que os diversos mecanismos de desgaste presentes nem sempre ocorrem em um sequência específica (KALOGIANNAKIS *et al.*, 2008). Por este motivo, pode-se encontrar na literatura um cuidado em realizar primeiramente ensaios de pequena escala nos quais os mecanismos tribológicos presentes sejam previamente conhecidos e/ou facilmente identificados. Kalogiannakis *et al.* (2008), por exemplo, antes de realizar um ensaio pino contra disco para caracterizar materiais compósitos, realizou uma série de ensaios de tração ainda mais simples para isolar os diferentes mecanismos de degradação possíveis.

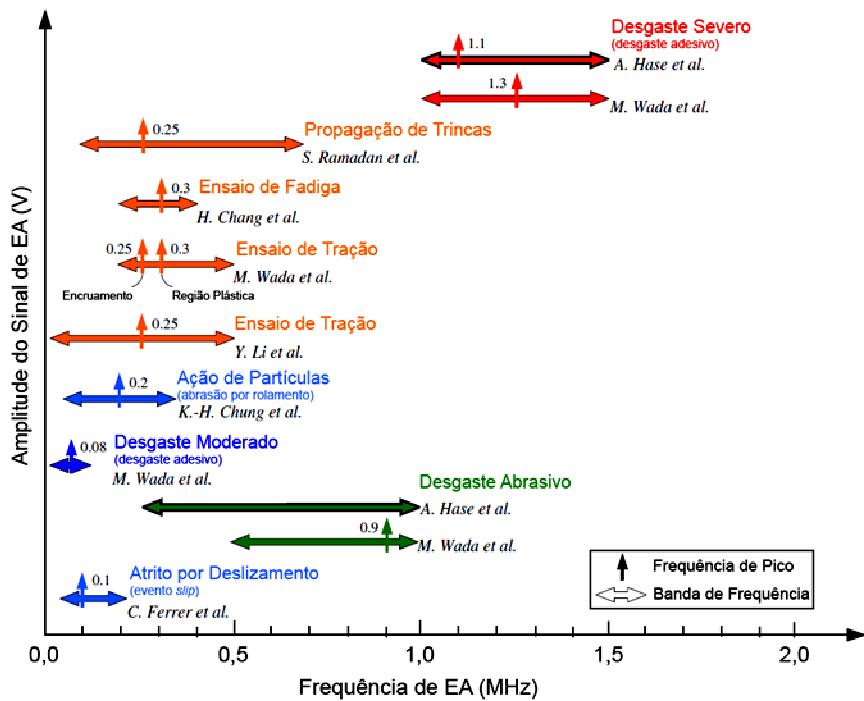


Figura 2.6 - Mapa de correlação entre espectro de frequência da EA e fenômenos envolvendo deformação e fratura (Hase *et al.*, 2012, adaptada)

O segundo problema é que a mera análise visual do conteúdo espectral calculado através da FFT, e visualizado através do PSD, nem sempre fornece uma ferramenta que possibilite a clara identificação dos mecanismos de desgaste, como observado por Vinogradov *et al.* (2013). A análise visual da curva do espectro do sinal de EA também não pode ser empregada em algoritmos de IA para monitoramento em tempo real.

Para contornar esta limitação, pode-se partir para o uso da STFT. Marinescu e Axinte (2009), por exemplo, encontraram e caracterizaram anomalias durante processos de fresamento usando espectrogramas da STFT da Emissão Acústica. Desta forma, eles puderam identificar quais eram as diferentes anomalias e determinar o momento em que surgiram. Outra possibilidade é o uso de parâmetros complementares à FFT na análise de sinais acústicos, como a frequência de pico.

A seguir, serão apresentadas as soluções para estes dois problemas. Primeiramente, serão discutidos os ensaios tipicamente usados quando se deseja distinguir mecanismos de degradação, com ênfase naqueles mais comumente empregados em materiais poliméricos. Em seguida, serão apresentados os parâmetros e ferramentas auxiliares à FFT que têm sido aplicados no estudo da EA proveniente de testes tribológicos.

2.2.3. Ensaios Típicos

Quando se deseja isolar mecanismos de desgaste, o ideal é trabalhar com ensaios simples, de pequena escala e com curta duração. Um teste comum que atende a este critério é o de riscamento com um penetrador, apesar de ensaios de tração e de deslizamento contra um papel abrasivo também serem aplicáveis no estudo de polímeros. A seguir, esses três tipos de ensaio são abordados. Por fim, os testes em pequena escala e os testes em escala real são apresentados e em seguida comparados.

a) Ensaios Abrasivos

Na abrasão, tem-se o deslocamento ou o arranque de material devido tanto a partículas duras entre duas superfícies que deslizam uma contra a outra, estejam tais partículas soltas ou presas a uma delas, quanto a protuberâncias duras em uma delas. A abrasão se divide em quatro submecanismos, sendo eles o microsulcamento, o microcorte, o microtrincamento e a microfadiga (ZUM GAHR, 1987). Segundo este autor, o primeiro desses submecanismos é caracterizado pela deformação plástica do material para a lateral do riscamento, enquanto o segundo se caracteriza pelo corte e pela consequente perda de material, conforme pode ser visto na Fig. 2.7. Ambos são predominantes em materiais dúcteis. Já o submecanismo de microfadiga é caracterizado pela perda de material causada por ciclos de microsulcamento. Por fim, as microtrincas (Fig. 2.7c) ocorrem devido à formação e propagação de trincas decorrentes de altas concentrações de tensão impostas por elementos abrasivos, sendo mais comuns em materiais frágeis.

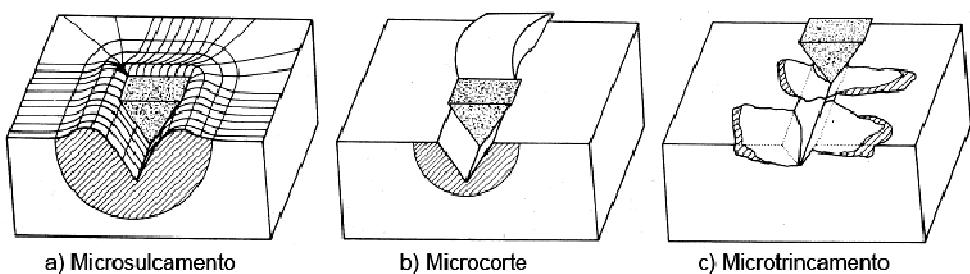


Figura 2.7 - Submecanismos de abrasão (ZUM GAHR, 1987, adaptada)

Existem diversas maneiras de se estudar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais poliméricos, sendo uma delas o ensaio contra uma lixa, ou um papel abrasivo (ZUM GAHR, 1987). Este ensaio consiste em se fazer deslizar uma amostra do material cujo comportamento se deseja avaliar sobre uma tira de papel abrasivo, gerando exclusivamente abrasão, pelo menos nos primeiros deslizamentos. Quando se ensaiá uma amostra de um polímero termoplástico ou elastomérico contra um papel abrasivo, por exemplo, é esperado

que haja perda de material por corte. Isto ocorre devido à natureza geralmente dúctil desses materiais. Por fim, é comum que esses ensaios sejam elaborados de modo que o material testado esteja sempre em contato com papel abrasivo novo.

Este tipo de ensaio pode ser usado para se avaliar a taxa de desgaste do polímero e a relação entre deformação e material perdido, procedimento padronizado por normas como a ASTM D5963 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007), mas também pode ser usado para investigar os submecanismos predominantes.

Portanto, ao se fixar um sensor de EA a uma amostra que está deslizando contra uma tira ou folha de papel abrasivo, pode-se obter o sinal acústico referente quase exclusivamente à abrasão para o material testado. Usando este tipo de abordagem, Hase *et al.* (2012) ensaiaram um pino de ferro contra um papel abrasivo #400, por uma distância de apenas 200 µm. Como se pode observar na Fig. 2.8, foi detectado somente microcorte, que gerou um espectro de frequências com diversos picos entre 250 e 1000 kHz. Além disso, foi observado que quanto maiores os riscos gerados pela abrasão, maior a amplitude da EA associada a eles, sem influência sobre a forma do espectro (HASE *et al.*, 2012).

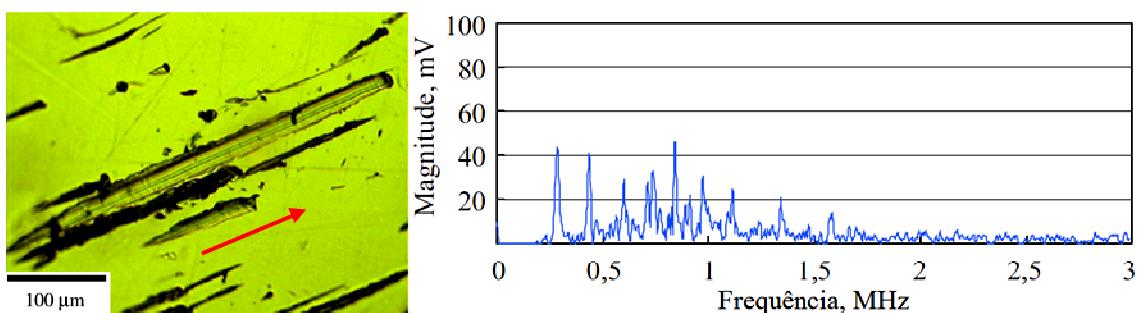


Figura 2.8 - Micrografia de um pino de ferro deslizado contra uma tira de papel abrasivo #400 e o espectro de frequência do sinal acústico gerado pelos eventos de abrasão. A seta indica o sentido do deslizamento. (HASE, 2012, adaptada)

b) Ensaios de Esclerometria Retilínea

Este ensaio trata do riscamento de uma superfície com um penetrador. A abrasão surge neste tipo de ensaio porque um penetrador pontiagudo pode ser tratado como uma asperidade ou como um fragmento cortante, enquanto que o submecanismo de microtrincamento pode surgir devido à presença de forças tangenciais de alta intensidade na superfície do material (SINHA; LIM, 2004). Este ensaio possui diversas aplicações, como a

avaliação de revestimentos em metais (ARAÚJO, 2008) e a determinação da resistência ou da tenacidade ao riscamento de polímeros (SINHA; LIM, 2004; ASTM D7027, 2013; KURKCU *et al.*, 2014).

O comportamento de um polímero diante um riscamento pode ser tanto dúctil quanto frágil. Diversos parâmetros determinam qual será seu comportamento, dentre eles sua resistência e suas características e a geometria do penetrador, a força normal aplicada e a velocidade do teste (JIANG *et al.*, 2009; KURKCU *et al.*, 2014). Por este motivo, é comum se trabalhar com mapas de riscamento em polímeros, que são gráficos que classificam o comportamento desses materiais diante ao riscamento em função de parâmetros como os citados anteriormente (BRISCOE *et al.*, 1996; IQBAL *et al.*, 2011).

Briscoe *et al.* (1996), por exemplo, demonstraram através de um mapa de riscamento a dependência do comportamento frágil de um polímero em relação ao ângulo de ataque do penetrador utilizado (ver Fig. 2.9). Segundo seus resultados, quanto maior o ângulo de ataque de penetradores cônicos, maior a tendência do material a apresentar um comportamento frágil e, consequentemente, de trincas surgirem e se propagarem. Isto é explicável pelo fato de que ângulos de ataque maiores facilitam a concentração de tensão na superfície da amostra ensaiada.

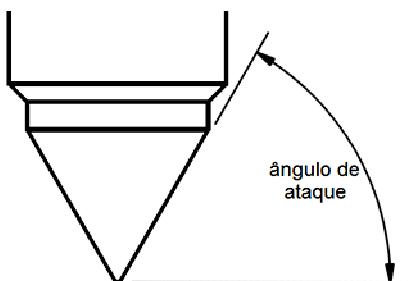


Figura 2.9 - Ângulo de ataque da ponta de um penetrador

Recentemente, Iqbal *et al.* (2011) aprofundaram as investigações neste assunto. Eles riscaram amostras de PEEK, ou poli(éter-éter-cetona), com diferentes penetradores, velocidades, temperaturas e cargas para formar mapas de riscamento mais completos. Alguns riscamentos realizados com uma velocidade de 3 mm/s e uma temperatura de 20°C exibiram resultados significativos, como pode ser visto no mapa da Fig. 2.10.

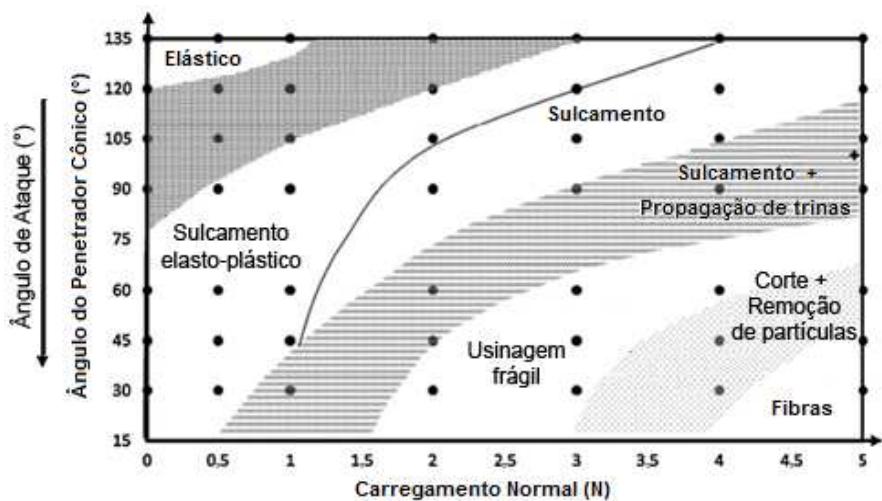


Figura 2.10 - Mapa de deformação no riscamento do PEEK, contendo o desgaste em função do ângulo do penetrador cônico e da força normal em ensaios realizados a 20°C e com velocidade de 3 mm/s (IQBAL *et al.*, 2011, adaptada)

Exemplos dos diferentes mecanismos citados na Fig. 2.10 podem ser vistos na Fig. 2.11. A Figura 2.11e, por exemplo, exibe um riscamento realizado por um penetrador cônico com ângulo de 75°, e com uma força normal constante de 2 N. Nota-se que além de sulcamento, mecanismo apontado pelos autores, há também corte.

Já as Figuras 2.11a e 2.11b exibem riscamentos realizados com penetradores cônicos com ângulos de 75° e de 90°, e com forças normais de 3 e 5 N, respectivamente. Ambos os riscamentos apresentam sulcamento e formação trincas. As Figuras 2.11c e 2.11d, por sua vez, exibem riscamentos realizados com penetradores cônicos com ângulos ainda menores, de 60° e de 45°, realizados com forças normais de 5 e 3 N, respectivamente. Em ambos, podem ser encontradas trincas e destacamento de pequenas porções de material. Pode-se notar no mapa construído pelos autores na Fig. 2.10 que o aumento da força normal age em conjunto com a diminuição do ângulo de cone (aumento do ângulo de ataque) para levar de uma situação dúctil até uma situação onde ocorrem trincas, culminando no surgimento do que os autores chamaram de usinagem frágil.

Por fim, a Fig. 2.11f exibe um riscamento realizado com um penetrador cônico com ângulo de 30° e carregamento de 5 N. Nele, se percebe a formação de fibras, decorrentes da deformação da pequena parte cristalina do polímero utilizado. Este tipo de fenômeno só ocorre em riscamentos realizados com penetradores de pontas mais finas e com cargas mais elevadas, mas não ocorre quando o polímero PEEK usado é totalmente amorfó.

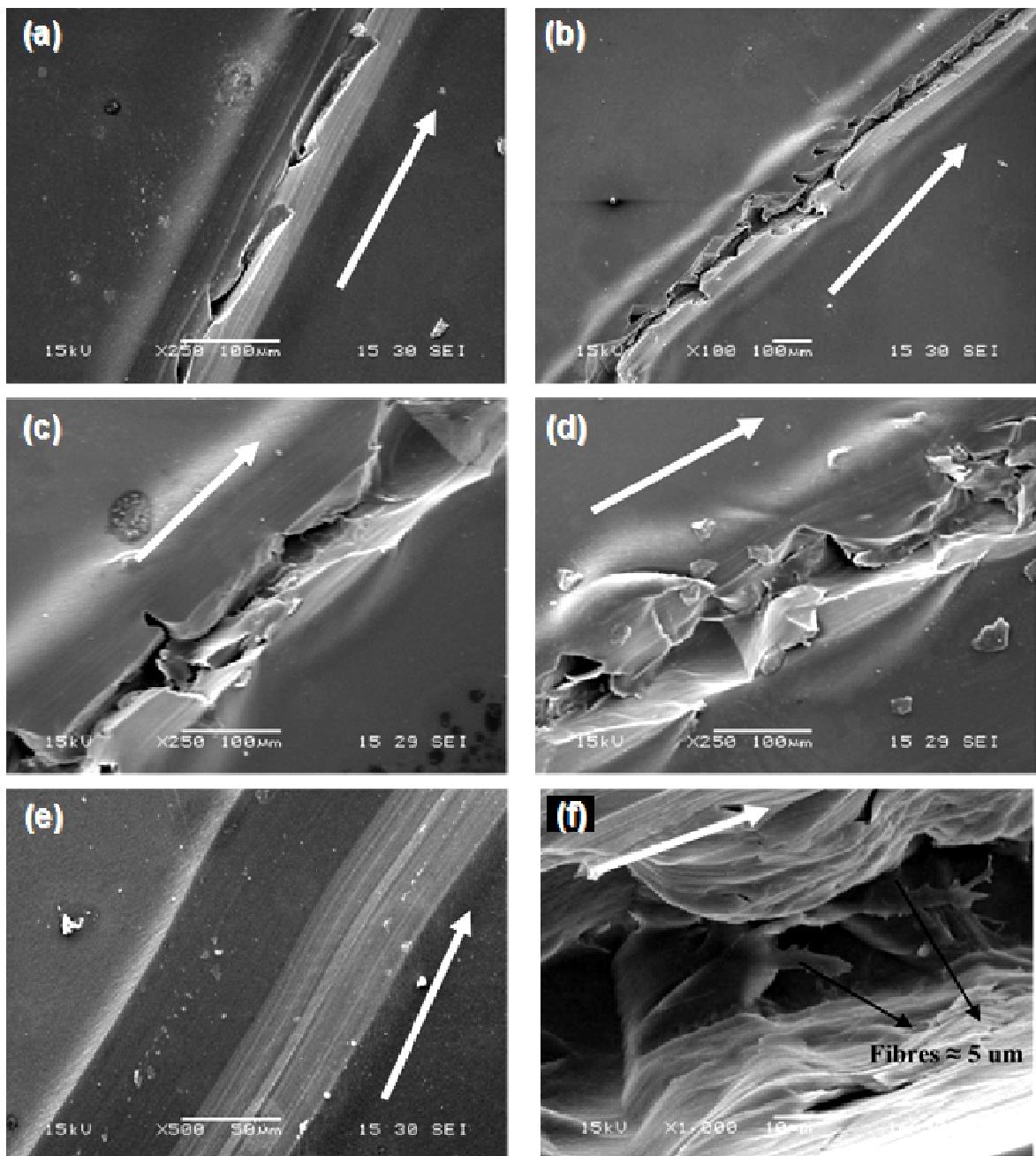


Figura 2.11 - Micrografias de riscamentos no PEEK com diferentes penetradores, cargas e velocidades. As setas indicam o sentido do riscamento (IQBAL *et al.*, 2011)

Sinha e Lim (2006) realizaram um trabalho semelhante, entretanto eles efetuaram o riscamento de vários polímeros e sob diversas condições para estabelecer comparações. Como pode ser observado na Fig. 2.12, nos materiais testados com maior tendência a apresentar comportamento frágil devido à sua estrutura amorfa, que foram o PMMA (polimetil-metacrilato, ou acrílico) e o PC (policarbonato), foi observado o submecanismo de microtrincamento.

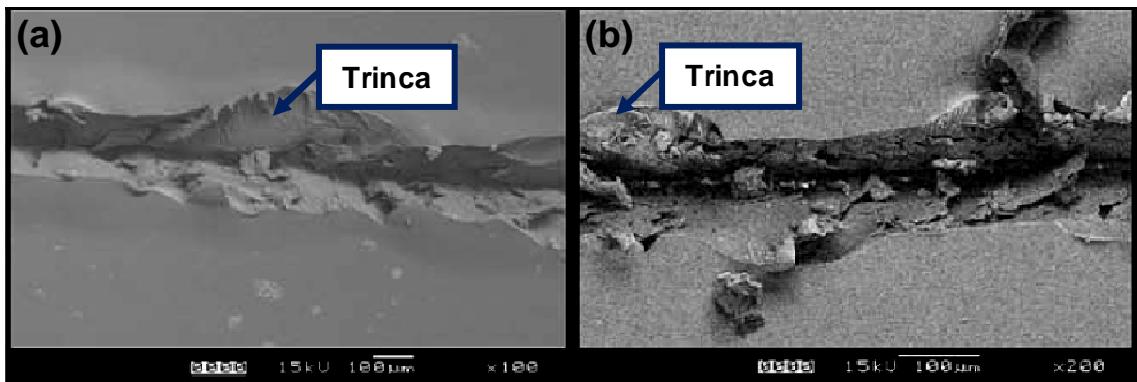


Figura 2.12 - Micrografias de riscamentos em amostras de PC (a) e PMMA (b) com carga de 6 N e velocidade de riscamento de 200 $\mu\text{m/s}$ (SINHA;LIM, 2006, adaptada)

Além de trincas, também é possível encontrar *stick-slip* (adere-desliza) no riscamento de polímeros. O *stick-slip* é um fenômeno decorrente de ciclos de formação e rompimento de junções adesivas entre a superfície do penetrador e o polímero (JIANG *et al.*, 2009). Sinha e Lim (2006) encontram *stick-slip* no riscamento de polímeros tanto dúcteis quanto frágeis, apesar de ser mais comum nos primeiros.

Os autores argumentam que esse evento é favorecido pela concentração da tensão provocada tanto por forças normais mais intensas quanto por profundidades do penetrador mais elevadas, uma vez que a região mais interna do material resiste mais ao deslocamento. Outro fator que influi na ocorrência do *stick-slip* é a cristalinidade do material. Segundo Sinha e Lim (2006), materiais amorfos como o PC e o PMMA são mais frágeis e conseguem aliviar as tensões mais rapidamente, impedindo assim sua concentração e desfavorecendo o surgimento do *stick-slip*.

Posteriormente, Jiang *et al.* (2009) aprofundaram este trabalho de comparação entre diferentes polímeros. Eles classificaram os polímeros de acordo com seus comportamentos (dúctil ou frágil) e de acordo com suas resistências mecânicas (forte ou fraco, segundo notação dos próprios autores). A Figura 2.13 ilustra o que eles chamaram de polímeros dúcteis e fortes (I), dúcteis e fracos (II), frágeis e fracos (III) e frágeis e fortes (IV). Segundo os autores, materiais como o PC são do tipo I e materiais como o Poliestireno (PS) são do tipo III. Essa classificação não contradiz com a de Sinha e Lim (2006), que coloca o PC como um material amorfó e frágil, já que essa classificação é relativa e significa apenas que o comportamento do PS é mais frágil do que o do PC.

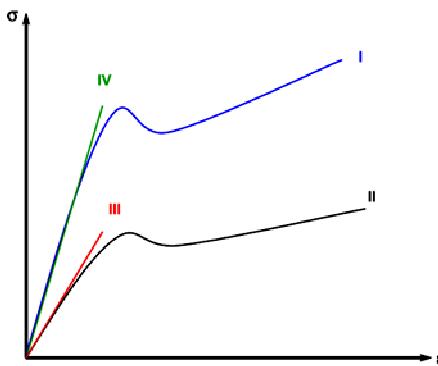


Figura 2.13 - Classificação de polímeros segundo comportamento e resistência: dúcteis e fortes (I), dúcteis e fracos (II), frágeis e fracos (III) e frágeis e fortes (IV) (JIANG *et al.*, 2009)

Em geral, polímeros frágeis tendem a falhar durante a fase "stick", antes de entrar na fase "slip". Isso ocorre porque durante a primeira fase, há um grande acúmulo de tensão ao redor do penetrador (Fig. 2.14e) que acaba rompendo o material (Fig. 2.14f). Tal rompimento libera energia e permite que o penetrador continue se movendo para frente (Fig. 2.14g). O resultado deste padrão pode ser observado na micrografia em Microscópio Óptico da Fig. 2.14h. Polímeros frágeis e fortes apresentam esse padrão com mais clareza, enquanto os fracos acabam se rompendo devido a trincas maiores (JIANG *et al.*, 2009).

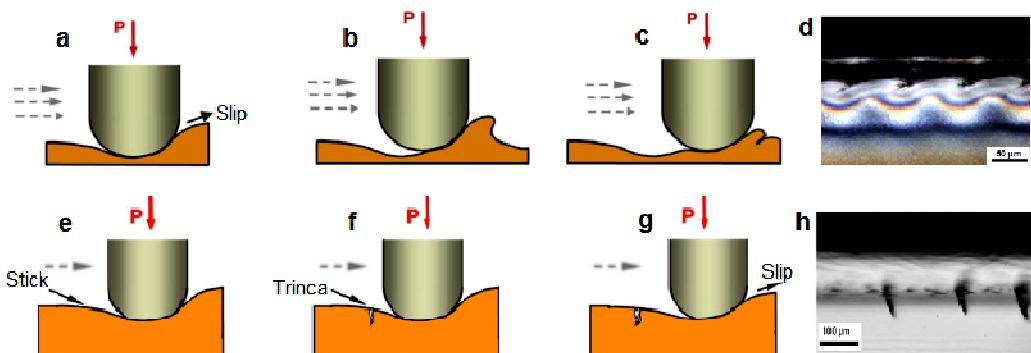


Figura 2.14 - Comportamento de polímeros durante o *stick-slip*: polímeros dúcteis (a-d) e polímeros frágeis (e-h) (JIANG *et al.*, 2009, adaptada)

O *stick-slip* também pode ocorrer em materiais metálicos. Ensaios de deslizamento entre amostras de aço nos quais ocorreram eventos *stick-slip* geraram emissão acústica com frequências de pico próximas aos 100 kHz (FERRER *et al.*, 2010; ASAMENE; SUNDARESAN, 2012), como pode ser visto na Fig. 2.15. A frequência de pico nestes experimentos variou em torno de 100 kHz dependendo da rugosidade dos aços (ASAMENE; SUNDARESAN, 2012).

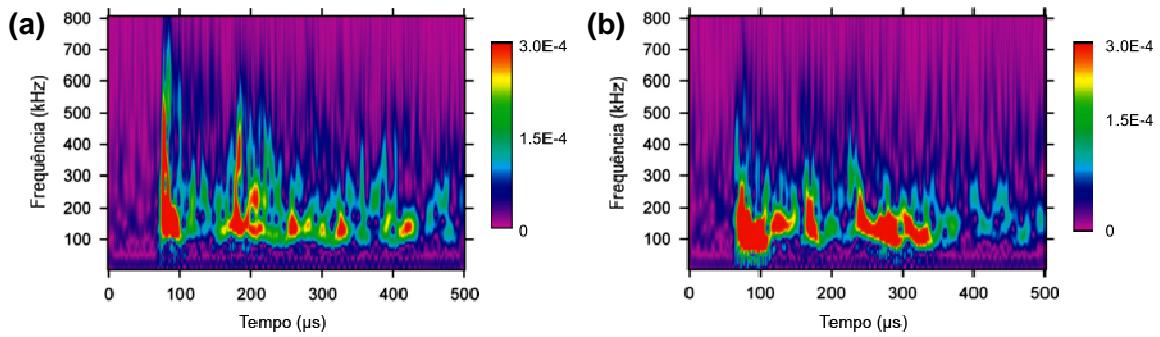


Figura 2.15 - Wavelet de bursts de EA relativos ao *stick-slip* no deslizamento entre aços de baixa rugosidade (a) e de alta rugosidade (b) (ASAMENE *et al.*, 2012)

Uma vez que em ensaios de riscamento dos polímeros usados no trabalho de Jiang *et al.* (2009), a propagação de trincas costuma ser o mecanismo predominante, pode-se facilmente estudar as características dos sinais acústicos gerados por tais eventos. Usando esta abordagem, Araújo (2009) determinou o carregamento mínimo para que se obtenha iniciação e propagação de trincas em revestimentos para metais através da energia acústica, conforme visto anteriormente na seção 2.2.1.

Mais recentemente, Kurkcu *et al.* (2014) aplicaram esta mesma metodologia de análise da EA no domínio do tempo em ensaios de riscamento para estudar o surgimento de trincas em polímeros com aditivos. Em outro trabalho usando EA em riscamentos, mas desta vez efetuando as análises no domínio da frequência, Piotrkowski *et al.* (2005) distinguiram eventos nos quais revestimentos falham de modo frágil de eventos nos quais eles se descolam do substrato.

c) Ensaio de Tração

Ensaios de tração normalmente são usados para se estudar o modo como materiais falham. Entretanto, alguns trabalhos encontrados na literatura utilizam este tipo de ensaio para estudar o surgimento de trincas de maneira isolada. Para forçar o surgimento de trincas, são produzidos entalhes nos corpos de prova, responsáveis por concentrar a tensão em uma determinada região.

Este ensaio acabou se tornando conhecido como ensaio de tração com entalhe de aresta única ou ensaio de tração SEN (*Single Edged Notch Tensile Testing*) e pode ser aplicado, por exemplo, ao estudo da resistência de soldas, do comportamento frágil de polímeros e dos mecanismos de desgaste em compósitos. Os ensaios também podem ser simplesmente de tração ou podem ser cíclicos, para observar comportamento à fadiga (ABO-EL-EZZ, 2000; MARISSEN *et al.*, 2005; KEMPF *et al.*, 2014).

Marissen *et al.* (2005) realizaram ensaios de tração SEN em elastômeros termoplásticos para estudar com as trincas se propagam nesses materiais. Em seu trabalho, foi possível determinar as cargas que levam ao surgimento de trincas e em quais direções elas se propagam ao longo do ensaio (ver Fig. 2.16).

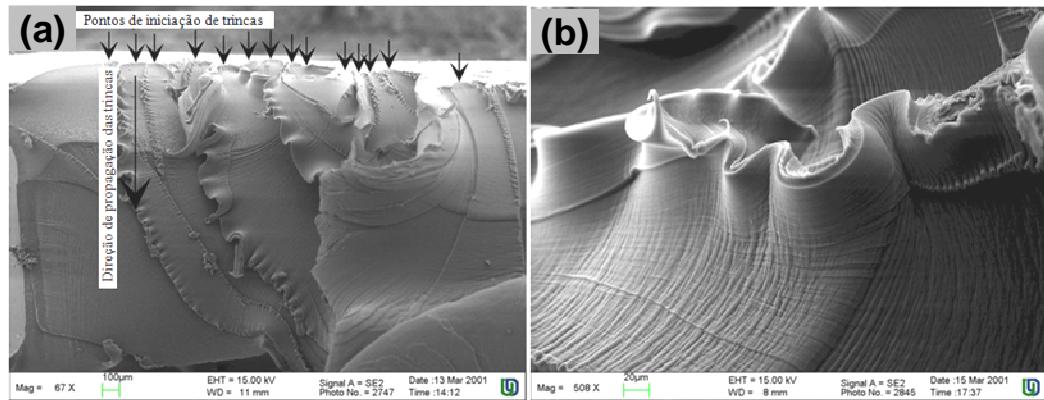


Figura 2.16 - Micrografias em MEV de pontos de iniciação de trincas e direção de propagação em um elastômero termoplástico submetido a ensaio de tração SEN (a) e ampliação (b) (MARISEN *et al.*, 2005, adaptada)

O método da EA também pode ser aplicado a este tipo de testes. Abo-El-Ezz (2000) estudou o comportamento do acrílico (PMMA) em ensaios de tração SEN e correlacionou as etapas do comportamento do material (deformação e fratura) com o PSD de seus respectivos sinais acústicos. Já os trabalhos de Ramirez-Jimenez *et al.* (2004) e de Kempf *et al.* (2014) usaram, respectivamente, a frequência de pico e a análise de conglomerados para distinguir os mecanismos de falha em materiais compósitos.

Uma proposta semelhante foi apresentada por Woo *et al.* (2014), que usaram ensaios de compressão para distinguir mecanismos de degradação em amostras de aço, tais como deformação plástica, encruamento, cisalhamento e propagação de trincas. As micrografias exibindo os mecanismos foram correlacionadas com a STFT da Emissão Acústica. Usando os espectrogramas da Fig. 2.17, os autores concluíram que eventos como deformação plástica (Fig. 2.17a) possuem baixa frequência máxima (ver seta amarela) e alta intensidade, enquanto o cisalhamento (Fig. 2.17b) possui uma frequência máxima maior, porém de baixa amplitude (observar a mudança de escalas).

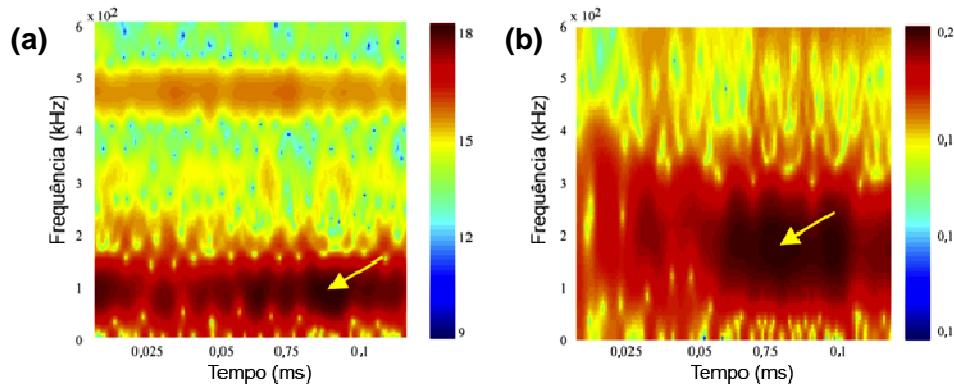


Figura 2.17 - Exemplos de espectrogramas da STFT da Emissão Acústica em amostras de aço submetidas a ensaio de compressão, resultando em deformação plástica (a) e em cisalhamento (b) (WOO *et al.*, 2014, adaptada)

d) Ensaios em Diferentes Escalas

Os ensaios tribológicos buscam sempre reproduzir os mecanismos e intensidades de desgaste que ocorrem na prática. Entretanto, quanto mais o ensaio se assemelha à aplicação real, ou seja, quanto mais complexo é o ensaio, mais caro e longo ele é. Para contornar estes problemas, geralmente são realizados ensaios mais simples e em escalas menores que, além de mais baratos, possuem menores durações (ZUM GAHR, 1987). As diferentes escalas de teste, bem como uma comparação entre suas complexidades e custos, são apresentadas na Fig. 2.18.

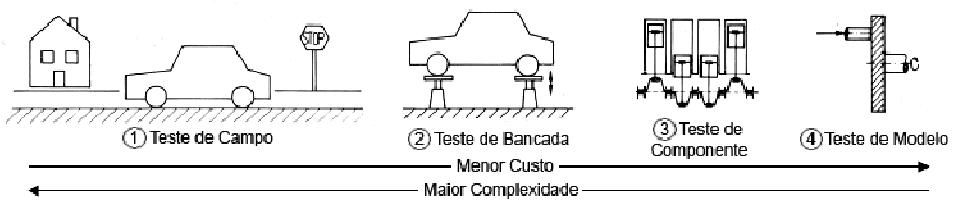


Figura 2.18 - Comparação entre diferentes escalas de testes tribológicos (ZUM GAHR, 1987, adaptada)

Apesar de serem mais simples e baratos, os testes em escalas reduzida podem não reproduzir com fidelidade os ensaios em escala real. Um dos grandes desafios na tribologia é, portanto, garantir que estes ensaios em escala reduzida sejam fiéis e forneçam informações úteis. Uma vez que haja esta garantia, é possível também transpor os resultados de Emissão Acústica dos testes menores para os maiores com maior segurança.

2.2.4. Ferramentas e Parâmetros Típicos

a) Frequência de Pico

Como apresentado anteriormente, a comparação visual entre os PSD de dois sinais diferentes nem sempre é viável, motivo pelo qual foram criados parâmetros que simplificam tal tarefa, tais como duração do sinal, energia do sinal e a amplitude de pico (VINOGRADOV *et al.*, 2013). Um dos parâmetros mais relevantes é a frequência de pico, definida como a frequência com maior amplitude no espectro de um dado sinal. Este parâmetro é conhecido na literatura desde meados da década de 90 por ser sensível aos mecanismos de desgaste em curso em um tribossistema (RAMIREZ-JIMENEZ *et al.*, 2004; PIOTRKOWSKI *et al.*, 2005; GUTKIN *et al.*, 2011; KEMPF *et al.*, 2014).

Uma demonstração da eficiência deste método está presente no trabalho de Gutkin *et al.* (2011), onde eles demonstraram que este parâmetro é sensível ao mecanismo de desgaste em curso em um tribossistema, ao contrário de parâmetros como amplitude, energia e duração dos *bursts*. Os autores realizaram ensaios de tração em uma amostra de epóxi reforçado com fibra de carbono e usaram Inteligência Artificial e análise de conglomerados de EA segundo suas características. A Figura 2.19 exibe gráficos destes quatro parâmetros usando cores para distinguir conglomerados. Neles, pode-se observar que apenas a frequência de pico é consistente com os padrões encontrados.

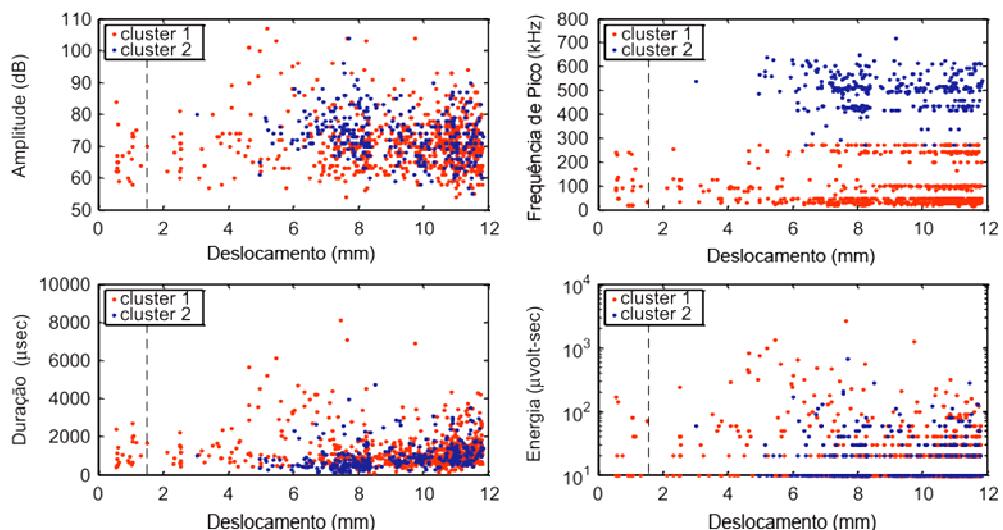


Figura 2.19 - Parâmetros de sinais acústicos em função do deslocamento no ensaio de tração de uma amostra de epóxi reforçada com fibra de carbono; os conglomerados (ou *clusters*) são padrões identificados em algoritmos de IA (GUTKIN *et al.*, 2011)

Em seguida, os autores aprofundaram os estudos e conseguiram distinguir todos os mecanismos de desgaste presente nas amostras usando apenas a frequência de pico. Eles compararam os resultados de diferentes ensaios de tração e correlacionaram a presença de *bursts* em determinadas faixas de frequência com a presença de mecanismos de desgaste, como pode ser visto na Fig. 2.20. No ensaio do gráfico da Fig. 2.20b, por exemplo, só foi observada delaminação na matriz, o que significa que a faixa de frequência chamada f_{II} está relacionada a tal mecanismo de desgaste. Usando raciocínios semelhantes em todo o conjunto de testes, eles determinaram o mecanismo relacionado a cada uma das seis faixas de frequência de pico encontradas nos ensaios, conforme Fig. 2.20d. Uma peculiaridade desta abordagem é que o importante é a faixa de frequência na qual está a frequência de pico do *burst*, e não o seu valor exato.

Gutkin *et al.* (2011) afirmam que seus resultados são próximos aos encontrados em outras referências. Um exemplo de trabalho similar e com resultados similares foi realizado por Ramirez-Jimenez *et al.* (2004), porém usando polipropileno (PP).

Conforme citado anteriormente, a distância entre o sensor e a fonte dos eventos acústicos provoca uma atenuação da amplitude da EA (NI; IWAMOTO, 2002). Entretanto, os autores demonstram neste mesmo trabalho que a frequência de pico não se altera com a distância, sendo assim uma variável bem mais confiável (NI; IWAMOTO, 2002).

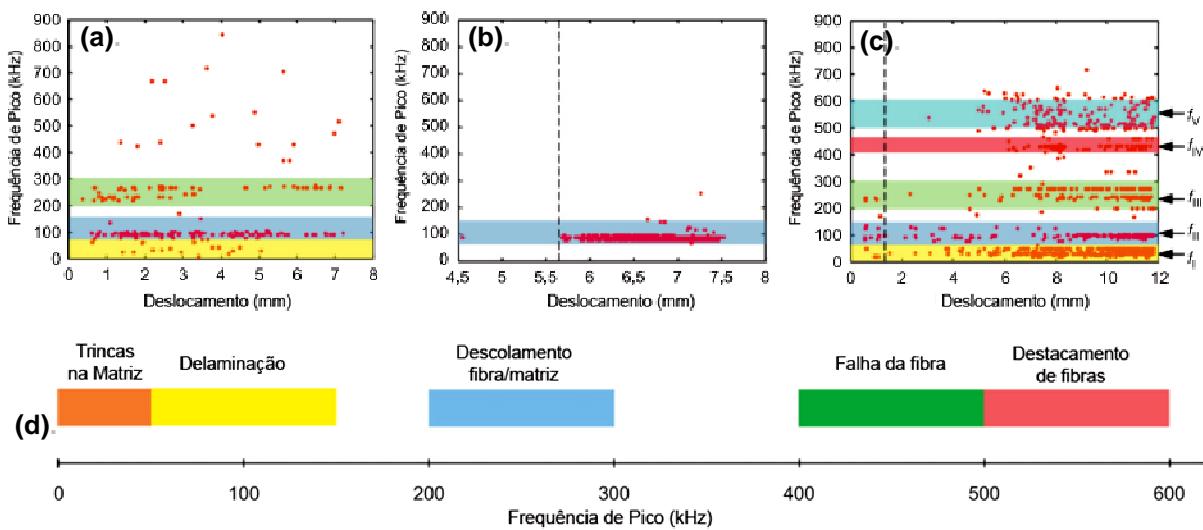


Figura 2.20 - Frequências de pico para diversos ensaios de tração classificadas em faixas (a, b, c) e mecanismo equivalente a cada faixa (d) (GUTKIN *et al.*, 2011, adaptada)

b) Frequência Centroide e Frequência de Pico Balanceada

Não é somente o mecanismo de desgaste em curso em um tribossistema que influencia a frequência de pico, mas também a resposta do sensor e a geometria e o material da amostra (LINGARD *et al.*, 1993; KEMPF *et al.*, 2014). Na verdade, a caracterização de um sinal de EA é mais exata quando se utilizam parâmetros que levam em consideração todo o espectro de frequência. Neste sentido, foram desenvolvidos parâmetros como a frequência centroide e a frequência de pico balanceada.

A frequência centroide é calculada através da Eq. (2.1) a seguir, onde $Y(f)$ representa a amplitude do espectro em função da frequência, f representa a frequência e F é a taxa de amostragem. Uma vantagem desse parâmetro é que ele leva em consideração todo o espectro de frequência, e não apenas um ponto dele. Já a frequência de pico balanceada tenta unir frequência de pico e frequência centroide em um só valor, como visto na Eq. (2.2).

$$f_{centróide} = \int_0^{F/2} f \cdot Y(f) \, df / \int_0^{F/2} Y(f) \, df \quad (2.1)$$

$$f_{pico\ balanceada} = \sqrt{f_{pico} \times f_{centróide}} \quad (2.2)$$

c) Análise de Conglomerados

O monitoramento dos diferentes mecanismos de desgaste via EA deve ser capaz de analisar os sinais acústicos automaticamente através de programas computacionais, podendo receber o auxílio de algoritmos de IA como redes neurais. Deste modo, é importante que as análises dos sinais acústicos em um sistema de monitoramento possam ser implementadas via programas computacionais. Contudo, atualmente tal imposição praticamente descarta análises da forma de gráficos de PSD e torna fundamentais análises envolvendo parâmetros como a frequência de pico, pois apenas estes últimos oferecem valores numéricos que podem ser facilmente utilizados em algoritmos de computador.

Uma das ferramentas mais úteis na distinção de mecanismos de desgaste é a Análise de Conglomerados e a identificação de padrões. Ela pode levar em consideração diversos parâmetros dos *bursts* como energia, tempo de subida, duração, pico de amplitude e pico de frequência. Cada padrão percebido pelo algoritmo forma um conglomerado de pontos. Normalmente, estes algoritmos usam redes neurais para determinar quais são os parâmetros que definem os padrões associados aos mecanismos presentes (treinamento), para então classificar os *bursts* de EA (KALOGIANNAKIS *et al.*, 2008; GUTKIN *et al.*, 2011).

Usando esta metodologia, Kalogiannakis *et al.* (2008) e Gutkin *et al.* (2011) conseguiram criar conglomerados de EA que se correlacionavam com os mecanismos de desgaste durante ensaios de tração de amostras de polímeros reforçadas com fibra de carbono. Os principais mecanismos, que são falha na matriz, descolamento e falha nas fibras puderam ser distinguidos através dos algoritmos empregados.

Também existe na literatura uma tentativa de se identificar os conglomerados através da posição dos pontos em gráficos da energia da FFT em função das frequências centroide ou de pico balanceada (VINOGRADOV *et al.*, 2013; KEMPF *et al.*, 2014). Ao se confeccionar gráficos de energia em função da frequência, cada mecanismo de desgaste tenderá a se acumular em uma região do gráfico, formando conglomerados. Ressalta-se que algoritmos de IA podem ser fundamentais na identificação destes conglomerados.

Um bom exemplo do emprego desta metodologia é o trabalho de Kempf *et al.* (2014), cujos autores trabalharam com ensaios de tração em compósitos de poliuretano e de epóxi reforçados com fibras de carbono. Sua intenção era distinguir acusticamente os três mecanismos de desgaste que podem surgir nestes materiais: trinca na matriz (PU ou epóxi), quebra da fibra ou descolamento da fibra. O método usado para associar cada mecanismo a um padrão acústico foi variar a orientação das fibras em relação à direção do ensaio de tração. Quando as fibras eram paralelas à tração do ensaio, sua falha era o mecanismo dominante. Entretanto, quando as fibras eram dispostas numa direção acima de aproximadamente 70° em relação à direção da tração, o mecanismo dominante era o da falha na matriz. Por fim, quando usados ângulos intermediários, a principal forma de falha era o descolamento das fibras.

O espectro médio resultante de cada um dos três mecanismos na matriz de PU, calculado através da FFT, pode ser observado na Fig. 2.21. Apesar de ser possível notar diferenças entre cada curva quando cada mecanismo ocorre isoladamente, em uma aplicação prática eles aparecem sobrepostos, o que os tornaria praticamente indistinguíveis. A solução encontrada pelos autores foi usar a frequência de pico balanceada em conjunto com a energia por banda para criar conglomerados de EA, obtendo-se os gráficos da Fig. 2.22. Por energia de banda, entende-se como percentual da energia total que existe dentro de uma determinada banda de frequências de f_1 a f_2 , como na Eq. (2.3).

$$E_{f_1 \text{ a } f_2} = 100 \times \int_{f_1}^{f_2} Y(f) df / \int_0^{F/2} Y(f) df \quad (2.3)$$

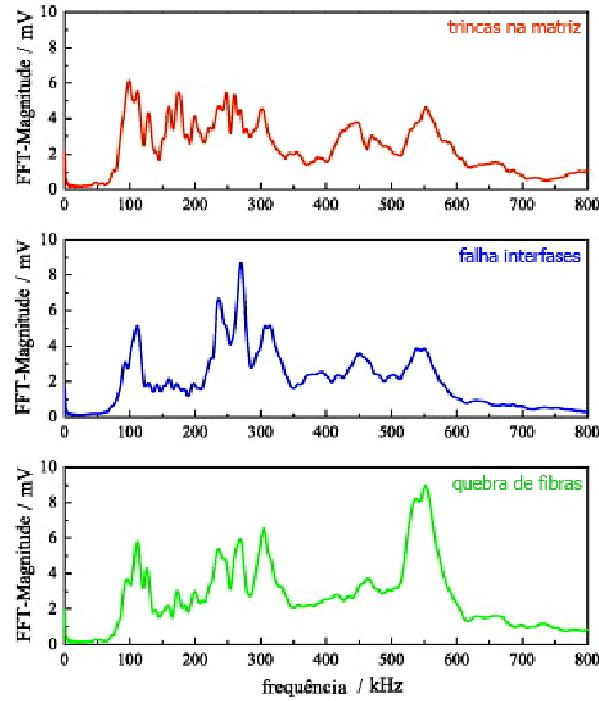


Figura 2.21 - Distinção de mecanismos de desgaste através do PSD em ensaios de tração de PU contendo fibras de carbono (KEMPF *et al.*, 2014, adaptada)

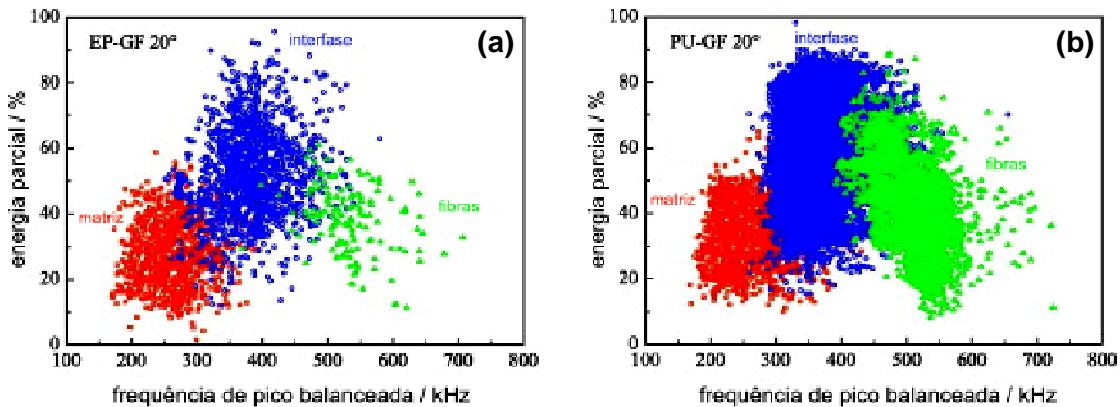


Figura 2.22 - Energia parcial da EA em função da frequência de pico balanceada e os conglomerados identificados em ensaios de tração Epóxi (a) e PU (b) reforçados (KEMPF *et al.*, 2014, adaptada)

Os conglomerados foram identificados através de algoritmos de IA baseados em redes neurais, mas também podem ser distinguidos visualmente. Deste modo, os autores puderam distinguir os mecanismos de desgaste mesmo quando ocorrem simultaneamente, pois cada um é caracterizado por um conglomerado diferente. Contudo, ao se comparar os resultados dos materiais, nota-se que não existe diferença entre as posições dos conglomerados da matriz de epóxi e os da matriz de PU, o que se deve provavelmente à relativa semelhança entre eles.

Uma abordagem semelhante é proposta por Vinogradov *et al.* (2013), que trabalharam com ensaios de tração para distinguir entre os dois mecanismos de deformação plástica em ligas de magnésio. Os dois mecanismos possíveis de surgir são deslizamento e geminação. Eles foram isolados variando o tamanho dos grãos, já que com grãos finos a deformação por deslizamento é predominante nos momentos iniciais do ensaio, e com grãos grosseiros a deformação por geminação é o predominante no início. Tais pesquisadores também conseguiram identificar conglomerados com sucesso em gráficos de energia em função da frequência.

2.2.5. Desgaste em Poliuretanos Termoplásticos

Segundo Yahiaoui *et al.* (2014), poliuretanos termoplásticos, ou simplesmente TPUs, tendem a se degradar através de dois mecanismos de desgaste quando deslizam contra a superfície de aço: riscos de abrasão e adesão. Na verdade, primeiramente são formadas ondas de Schallamach devido à fadiga, como visto na Fig. 2.23a. Tal fenômeno é amplamente conhecido por surgir no deslizamento de TPUs (da SILVA *et al.*, 2007; MARTÍNEZ *et al.*, 2010). Estas ondas tendem a levar ao desprendimento de material por adesão, formando pequenos rolos como os vistos na Fig. 2.23b. Estes pequenos rolos irão, por sua vez, gerar riscos de abrasão na superfície do próprio TPU.

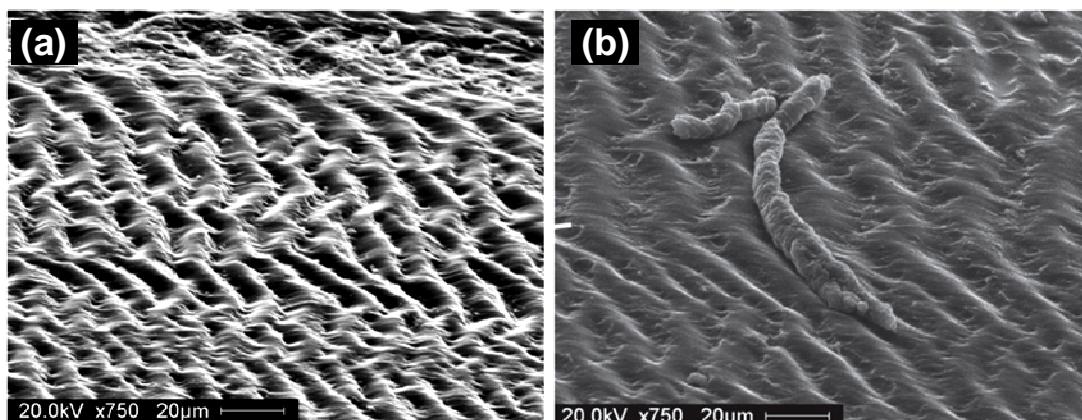


Figura 2.23 - Micrografias em MEV da superfície de um TPU que deslizou contra aço exibindo ondas de Schallamach (a) e rolos formados por adesão (b) (YAHIAOUI *et al.*, 2014, adaptada)

Segundo Yahiaoui *et al.* (2014), a ocorrência de altas cargas e velocidades levam a diversos efeitos. Para começar, a distância média entre as ondas de Schallamach aumentam, efeito que já foi reproduzido em ensaios em pequena escala no LTAD

(BERTHOLDI, 2014). Além disso, surge o efeito de *stick-slip* e ocorre a diminuição da amplitude da Emissão Acústica. É importante ressaltar que, apesar disso, para baixas cargas e velocidades, a amplitude da EA tende a acompanhar o crescimento destas variáveis. Os experimentos de Yahiaoui *et al.* (2014) também mostraram que a temperatura também acarreta na diminuição da amplitude da Emissão Acústica no deslizamento do TPU contra aço. Tal efeito sobre a amplitude da EA já era previsível segundo a teoria apresentada por Baranov *et al.* (2007), na seção 2.1.2b.

Quando o TPU é utilizado em uma amostra de *liner* que desliza contra um duto flexível de PA em escala real, ele apresenta inicialmente abrasão (PAES *et al.*, 2014). As partículas de desgaste que se desprendem continuam no contato, tanto gerando abrasão da amostra do duto flexível quanto se aderindo ao duto flexível (ver setas na Fig. 2.24a). Posteriormente, surge o mecanismo de microtrincamento por fadiga na amostra do *liner*, como evidenciado na Fig. 2.24b. Nesta figura, pode-se observar a presença de microtrincas perpendiculares à direção do deslizamento. Em resumo, o desgaste no *liner* é composto por microcorte e por microtrincamento, enquanto que o duto flexível sofre com microcorte devido às partículas de desgaste livres no contato (PAES *et al.*, 2014).

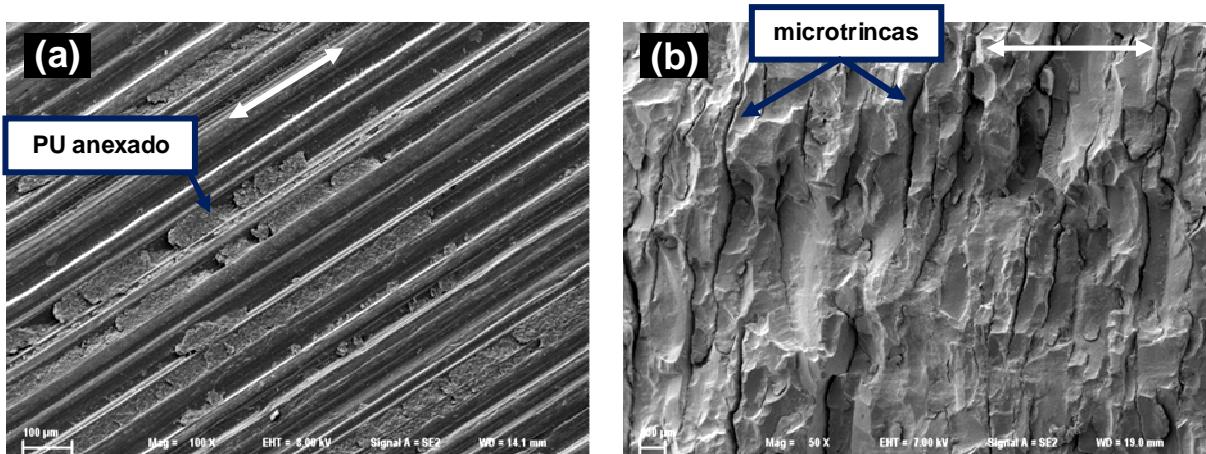


Figura 2.24 - Registros fotomicrográficos ao término de um ensaio de duto flexível contra *liner* em escala real apresentando o duto flexível (a) e microtrincamento no *liner* (b); as setas brancas indicam o sentido do deslizamento (PAES *et al.*, 2014, adaptada)

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os procedimentos adotados em cada ensaio empregado neste trabalho, bem como os detalhamentos dos métodos de análise e as descrições dos equipamentos utilizados. Além disso, a própria metodologia de aquisição e processamento de sinais acústicos é apresentada, detalhando os sensores, placas de aquisição, programas computacionais e algoritmos que compõem o sistema de aquisição da Emissão Acústica. A Figura 3.1 apresenta a sequência dos procedimentos experimentais adotados nesta dissertação.



Figura 3.1 - Resumo das etapas desenvolvidas neste trabalho. A seta indica a sequência de execução das atividades

3.1. Emissão Acústica

3.1.1. *Equipamentos para medição da Emissão Acústica*

Conforme descrito na seção 2.1.2 da revisão, especialmente na Fig. 2.2, sinais de EA são adquiridos através de um sistema de medição composto por um transdutor, um pré-amplificador e uma placa de conversão A/D com amplificadores e filtros internos, bem como um programa computacional para seu controle.

Foram utilizados dois modelos de transdutores piezelétricos distintos da fabricante *Physical Acoustics Corporation* (PAC). O primeiro modelo é o Micro30, cujo manual descritivo é apresentado no Anexo A. Ele possui pequenas dimensões e sensibilidade máxima na região entre 150 a 400 kHz. Já o segundo modelo é o ISPKWDIUC, cujo manual descritivo é apresentado no Anexo B. Apesar de possuir maiores dimensões, este último possui uma boa sensibilidade dentro de uma faixa maior de frequências, de 100 a 800 kHz, e é intrinsecamente seguro, ou seja, pode atuar submerso ou em ambientes explosivos.

Dos dois modelos de sensores, foram usados três sensores distintos. Dois deles são o FE13 e o FE14, ambos do modelo Micro30 e com Certificados de Calibração nos Anexos C e D, respectivamente. O terceiro é o AA11, do modelo ISPKWDIUC e com Certificado de Calibração no Anexo E. As descrições dos experimentos e as discussões dos resultados fazem sempre menção aos códigos dos sensores e não aos modelos.

O pré-amplificador utilizado foi o modelo 2/4/6 do mesmo fabricante, e que permite amplificações de 20, 40 ou 60 dB. Já o modelo de placa de aquisição usado foi o PCI-2, também da PAC, que possui dois canais de entrada, amplificadores e filtros internos, faixa de medição de -10 a 10 V e resolução de 16 bits (equivalente a $20\text{ V} / 2^{16} = 0,305\text{ mV}$). A placa possui taxas de aquisição de até 1, 2, 5, 10, 20 ou 40 MHz. Todos os valores de frequência de corte dos filtros e de amplificação estão no catálogo da placa no Anexo F. A alimentação do pré-amplificador é realizada pelo mesmo cabo que o conecta com a placa de aquisição.

O programa computacional para aquisição de dados utilizado foi o AEwin, também da PAC, próprio para a placa PCI-2. Todas as aquisições foram feitas utilizando a função *Waveform Streaming* do programa, que gera um arquivo de dados com a medição, e que pode ser lido e processado por outro programa, de acordo com a preferência do usuário. Os arquivos contendo os sinais adquiridos são compostos apenas pelos valores de amplitude

em Volts em função do tempo. Entretanto, tal função permite que se controle apenas a taxa de aquisição e a quantidade de pontos adquiridos. As taxas de aquisição possíveis são aquelas especificadas no manual descritivo do Anexo F. Já a quantidade de pontos deve ser necessariamente um múltiplo inteiro de 1.024 pontos (por exemplo, para este programa, uma aquisição de 10 kS equivale a 10.240 pontos).

3.1.2. Processamento de Sinais

Para processar os sinais acústicos adquiridos pelo software AEwin, foi utilizado o programa MATLAB, que importava os arquivos gerados pela função *Waveform Streaming*. A grande vantagem dele é sua flexibilidade, permitindo que todos os cálculos e todas as plotagens sejam programadas da maneira considerada mais adequada, além de maior controle do usuário sobre as rotinas. O MATLAB foi responsável, conforme será mostrado a seguir, por calcular a tensão RMS e identificar os *bursts* a partir dela. Ele também foi responsável por calcular e gerar os gráficos das frequências de pico e as energias em função da frequência centroide ou da frequência de pico balanceada.

a) Sinal RMS e Critério para Definição de *Bursts*

A rotina para cálculo da tensão RMS seguiu os procedimentos indicados na seção 2.1.3a. Já a rotina para identificação dos *bursts*, que foram descritos na seção 2.1.1, utilizou diretamente os cálculos do sinal RMS. Para cada tipo de ensaio, foi estabelecido um valor mínimo para dar início ao *burst* e outro para encerrar, além de um valor mínimo para o valor do pico de amplitude entre seu início e seu fim (ver Fig. 3.2). Todos estes valores foram definidos tomando como base as características do sensor usado, das ondas acústicas geradas durante o ensaio e do ruído de fundo que o meio oferecia.

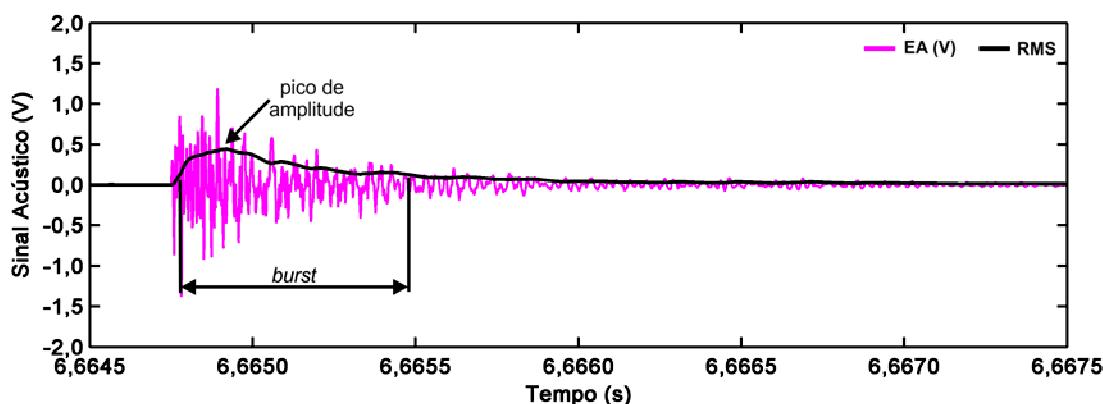


Figura 3.2 - Identificação de um *burst* usando sinal RMS

Uma consequência desta metodologia para identificação dos *bursts* é que cada um deles possuirá uma duração própria, já que não foi definida uma duração única para todos. Deste modo, cada um teve seu espectro calculado com uma resolução em frequência diferente. Entretanto, isto não chegou a ser um problema, uma vez que o mais importante é localizar a faixa de frequência que caracteriza os *bursts*, e não a frequência exata.

b) Transformada Rápida de Fourier, STFT e parâmetros derivados

O espectro de frequência de cada *burst* foi calculado usando a função específica do MATLAB. O cálculo do PSD foi feito extraindo o módulo de cada valor complexo da saída da Transformada de Fourier e elevando ao quadrado. Como cada *burst* possui sua própria duração, cada um terá um espectro discreto com uma resolução em frequência diferente. Entretanto, essas diferenças são muito pequenas e praticamente não podem ser percebidas quando colocadas em gráficos. Além disso, os parâmetros derivados do PSD foram calculados através do MATLAB. Esses parâmetros são a frequência de pico, que é o ponto de máximo do espectro, as frequências centroide e de pico balanceada, calculadas através das Eqs. 2.1 e 2.2, e as energias por banda, calculadas através da Eq. 2.3.

Por fim, a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) foi determinada subdividindo o sinal amostrado em subintervalos e calculando o PSD de cada um individualmente. Os resultados foram então dispostos em um spectrograma.

3.2. Ensaios de Esclerometria Retilínea

Conforme já discutido, ensaios de esclerometria retilínea em polímeros cujo comportamento tende a ser frágil leva à ocorrência de microtrincamentos, com possibilidade de ocorrência de *stick-slip*. Com o intuito de caracterizar o comportamento acústico de materiais poliméricos que sofrem estes tipos de desgaste, foi proposto um estudo envolvendo riscamento de diversos polímeros e com diferentes penetradores.

3.2.1. Procedimentos dos Ensaios de Esclerometria Retilínea

a) Parâmetros de Riscamento

Os riscos foram efetuados em um comprimento de 10 mm e a uma velocidade constante de 100 $\mu\text{m/s}$ (ver exemplo na Fig. 3.3). A força normal, por sua vez, foi variada de forma crescente e linear de zero até um valor máximo, programado para 120 N. Os valores

de comprimento e velocidade de risco empregados são comuns na literatura. O valor de carga máxima empregado, entretanto, é bem maior do que aquele normalmente encontrado em artigos científicos abordando materiais poliméricos, na tentativa de forçar a ocorrência do máximo de mecanismos de desgaste possível de ocorrer nestes sistemas.

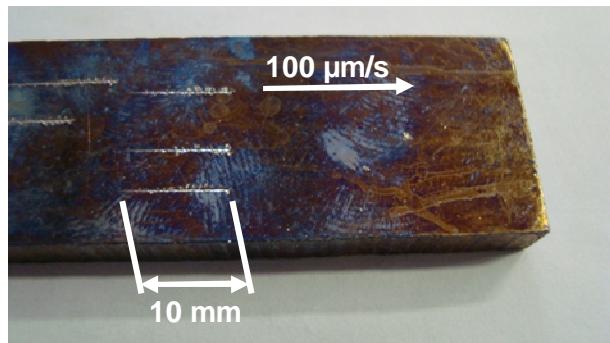


Figura 3.3 - Riscos em amostra de aço revestido com níquel químico; comprimento e direção dos riscamentos indicados

b) Penetradores

Foram utilizados cinco penetradores com pontas de diamante, sendo um Vickers e os demais cônicos com ângulo de ponta de 40° , 60° , 90° e 120° (ver Fig. 3.4), correspondentes a ângulos de ataque de 70° , 60° , 45° e 30° , respectivamente. A ponta de todos os penetradores cônicos era esférica com raio de 0,1 mm. Os penetradores tiveram suas dimensões medidas no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). Um exemplo pode ser visto na Fig. 3.5, que exibe as medições realizadas para o penetrador com ponta de 60° .

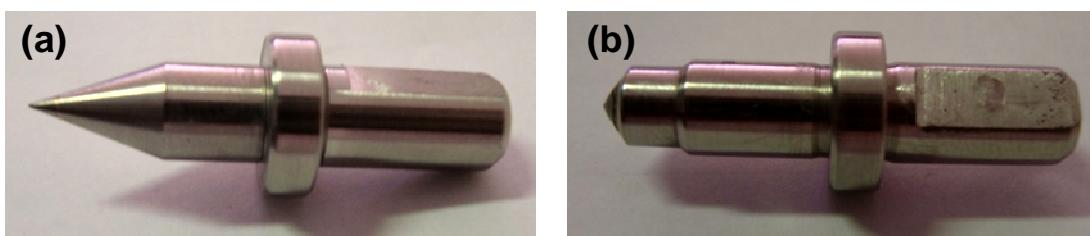


Figura 3.4 - Penetradores cônicos com ângulos de ponta de 40° (a) e 120° (b)

O penetrador Vickers possui uma ponta com formato piramidal com ângulo de ponta de 136° , o que corresponde a um ângulo de ataque de apenas 22° . A forma mais comum de se riscar usando este penetrador é usando uma de suas faces para frente. Entretanto, também foram realizados testes utilizando uma das arestas da ponta para a frente, afim de se avaliar a existência de alguma diferença em relação ao primeiro caso em termos de mecanismos de desgaste, uma vez que a primeira configuração aparenta ser mais severa. A

diferença no formato do riscamento entre as duas configurações pode ser observada nas micrografias da Fig. 3.6. Deste modo, totalizaram-se seis tipos de riscamentos diferentes, o que deu a possibilidade de se obter uma maior variedade de mecanismos de desgaste.

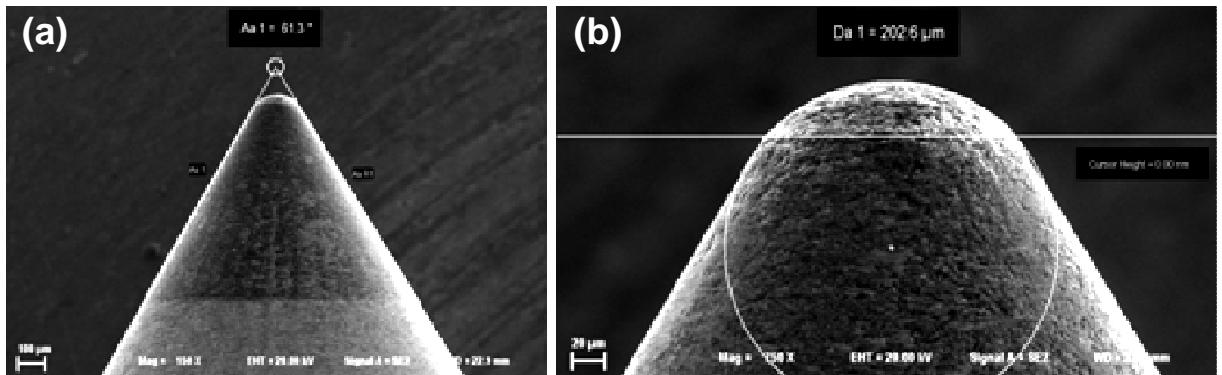


Figura 3.5 - Micrografias em MEV de um penetrador com ângulo de 60° e as medidas do ângulo (a) e do diâmetro (b) da ponta

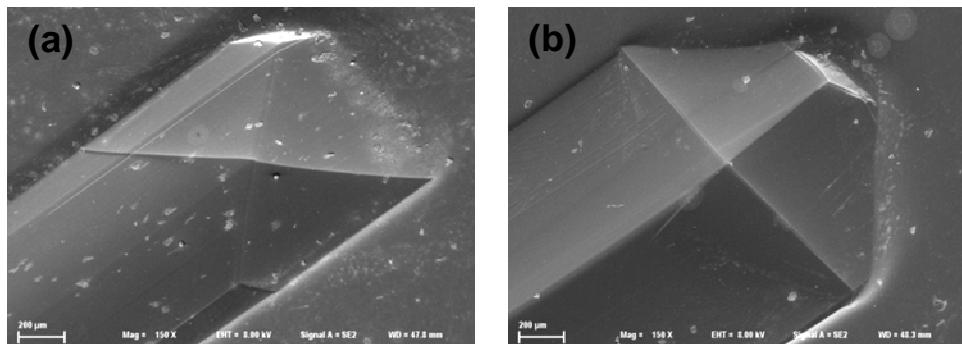


Figura 3.6 - Micrografias de riscos no PC com penetradores Vickers com face para frente (a) e com aresta para frente (b)

c) Materiais e Preparação das Amostras

Os materiais escolhidos para os testes foram o aço revestido com Ni-P (níquel químico), o poliestireno (PS), o acrílico (PPMA) e o policarbonato (PC). O aço foi escolhido como um dos materiais a ser riscado para ser utilizado como referência para os ensaios com polímeros, devido à facilidade tanto de se produzir trincas neste material quanto de se encontrar informações sobre ele na literatura técnica. A amostra possui substrato de aço ABNT 4140 com revestimento de 50 micra de espessura composto de Ni-4%P, e pode ser vista na Fig. 3.3. Como existe o risco de penetradores com pontas finas se danificarem ao riscar esta amostra, só foi utilizado o penetrador cônico de 120°.

O poliestireno e o policarbonato foram escolhidos por apresentarem comportamentos antagônicos. Conforme discutido na seção 2.2.3b, especialmente através da Fig. 2.13, enquanto o primeiro tende a ser mais frágil e possui baixa resistência mecânica, o que favorece o surgimento de trincas, o segundo tende a ser mais dúctil e possui maior resistência (JIANG *et al.*, 2009). Por fim, o acrílico foi escolhido por se tratar de um material comumente encontrado na literatura técnica.

As amostras possuíam dimensões de aproximadamente 25 x 150 mm² com 5 mm de espessura. Foi mantido o acabamento superficial original proveniente do molde nas faces ensaiadas, não sendo submetidas a nenhum processo de lixamento. Antes dos ensaios, as amostras foram limpas com álcool e ar comprimido. Depois dos ensaios, elas foram limpas em álcool no ultrassom por 180 s e depois secas com ar comprimido, para garantir que as partículas de desgaste soltas fossem removidas. Por fim, as amostras poliméricas foram metalizadas com ouro para que pudessem ser observadas no MEV. A Figura 3.7 exibe uma amostra de acrílico com alguns riscos e metalizada.

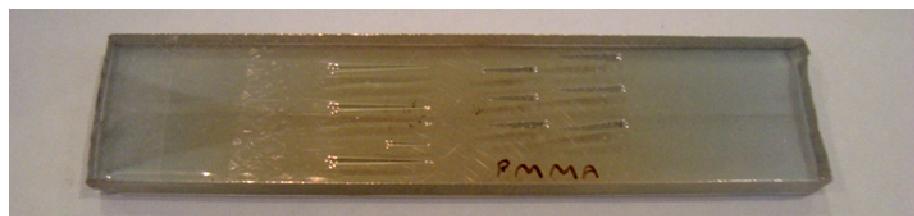


Figura 3.7 - Amostra de acrílico riscada com diferentes penetradores e posteriormente revestida com ouro

d) Métodos de Avaliação

Primeiramente, os resultados obtidos foram usados na confecção de gráficos relacionando tanto as forças normal e tangencial quanto o valor RMS com a posição do penetrador. Tais gráficos foram alinhados com as micrografias no MEV dos riscos de modo a fazer coincidir seus pontos de início e de fim com os pontos inicial e final em que o penetrador toca a peça. O MEV utilizado foi o modelo de alta resolução Supra 40 da Zeiss. Por fim, algumas regiões consideradas mais importantes foram registradas no MEV com ampliações maiores, de modo a se observar os mecanismos presentes com mais clareza.

Em seguida, os *bursts* de EA foram identificados e analisados no domínio da frequência. Para isso, cada um deles teve a sua frequência de pico identificada e disposta em um gráfico de dispersão em função da posição na qual ocorreu.

Uma observação pertinente é que a posição na qual cada *burst* ocorreu é apenas aproximada. Isso ocorre porque se dispõe apenas do instante em que ele ocorreu, sendo a posição do evento tribológico que a gerou uma estimativa com base neste valor e na velocidade do ensaio. Na prática, um evento tribológico como uma trinca pode ocorrer em uma posição posterior ou anterior à do penetrador, mas a metodologia empregada no presente trabalho não permite apontar quando isso ocorre. Caso, por exemplo, uma trinca ocorra na região à frente do penetrador, então os *bursts* detectados ficam atrasados nos gráficos de posição.

3.2.2. *Equipamento de Ensaios de Esclerometria Retilínea*

O equipamento de testes utilizado nos ensaios de riscamento é apresentado na Fig. 3.8 e é denominado de Macroesclerômetro, construído no LTAD em projetos anteriores (ARAÚJO, 2008). Ele pode efetuar ensaios com uma carga máxima de aproximadamente 170 N, permitindo controle tanto da velocidade quanto do comprimento de riscamento. O Macroesclerômetro é composto por duas mesas movidas por motores de passo (ver Fig. 3.8). A mesa inferior, onde é fixada a amostra, se movimenta na velocidade programada e pelo comprimento determinado. Já a mesa superior possui uma carga que se move com velocidade constante, de modo que a força gerada pelo braço de alavanca seja crescente.

Uma observação bastante importante é que a inclinação da mesa superior pode alterar a intensidade da força aplicada na direção normal, o que leva à necessidade de um alinhamento preciso da mesa superior na direção horizontal. No riscamento de materiais metálicos, caso para o qual o equipamento foi projetado, a inclinação da mesa é muito baixa porque a profundidade que o penetrador adentra na amostra é pequena. Entretanto, no caso de ensaio de polímeros com penetradores pontiagudos, estes podem adentrar a amostra em profundidades suficientes para inclinar a mesa superior, impedindo que a força máxima programada seja alcançada. Porém, como se deseja apenas encontrar mecanismos de desgaste e correlacioná-los com os sinais acústicos, ao invés de investigar em detalhes o comportamento dos polímeros diante riscamentos, tal limitação não é uma dificuldade grave.

A força de atrito do riscamento foi medida por uma célula de carga na mesa inferior. Já o coeficiente de atrito foi obtido ao se dividir esta força pela força normal, medida por uma célula de carga fixada acima do porta-penetrador. Os dados de força obtidos pelas células de carga foram usados apenas para a confecção de gráficos, ou seja, o controle da força normal foi realizado em malha aberta. Isto significa que o sistema não se corrige caso a força normal não alcance o valor máximo programado.

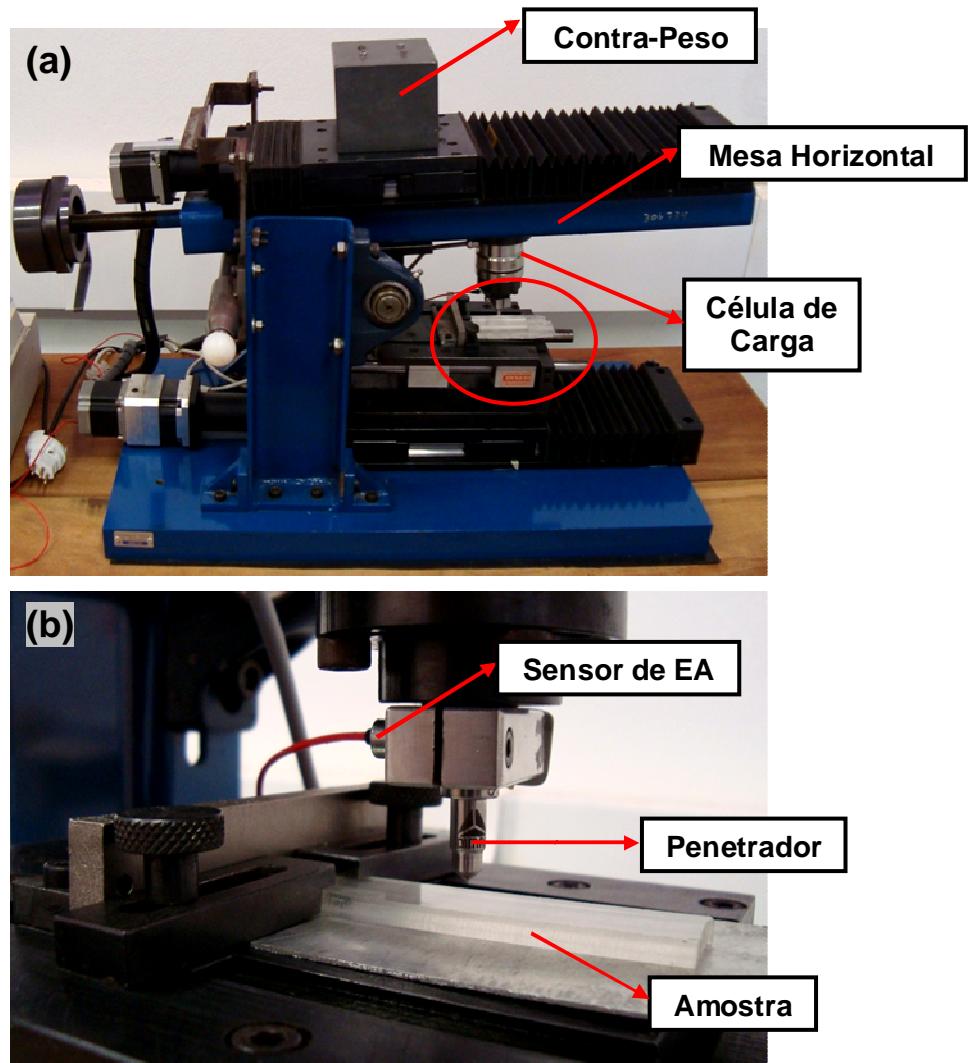


Figura 3.8 - Vista geral do Macroesclerômetro (a) e detalhe destacando o penetrador, o sensor de EA e a amostra (b)



Figura 3.9 - Sensor de EA com suporte plástico para permitir parafusamento ao Macroesclerômetro

O programa que controla o equipamento permite a entrada dos parâmetros de comprimento do riscamento (em mm), da velocidade de riscamento (em $\mu\text{m/s}$) e da força normal máxima (em N). Quando o ensaio se encerra, foi gerado um arquivo com as forças tangencial e normal em função do tempo. A taxa de aquisição de cada variável foi de 10 Hz.

3.2.3. Aquisição de Sinais Acústicos nos Ensaios de Esclerometria Retilínea

a) Equipamentos e Fixação do Sensor

Os equipamentos utilizados são aqueles indicados na seção 3.1.1 deste trabalho. O sensor empregado foi o FE13. Ele foi afixado no porta-penetrador (ver Fig. 3.8), ou seja, próximo à região onde ocorrem as trincas dos ensaios. O porta-penetrador foi projetado para a fixação do sensor, possuindo uma abertura própria. O sensor foi adaptado para esta abertura com a colagem de um suporte que permite que seja parafusado (ver Fig. 3.9).

O pré-amplificador foi ajustado para uma amplificação de 20 dB, pois este valor se mostrou o mais adequado em testes preliminares. O computador no qual a placa PCI-2 de aquisição dos sensores acústicos não é o mesmo que faz o controle do Macroesclerômetro. Por este motivo, os comandos para começar o ensaio e para começar a aquisição foram dados simultaneamente em dois computadores diferentes.

b) Parâmetros de Aquisição

Os dois parâmetros para programação da aquisição de dados no AEwin são a taxa de amostragem e o número de pontos. A taxa de aquisição empregada foi de 1 MHz, uma vez que não se espera que a frequência máxima dos eventos acústicos relacionados ao trincamento ultrapassem o valor de 500 kHz (HASE *et al.*, 2012). Já o número de pontos foi calculado de acordo com o tempo de aquisição. Um ensaio de 10 mm realizado a 100 $\mu\text{m/s}$ possui uma duração de 100 s, então foi determinado que a quantidade de pontos adquiridos seria de 100.000 kS.

3.2.4. Matriz de Ensaios de Esclerometria Retilínea

O uso de quatro materiais e de seis penetradores, considerando que o aço só foi ensaiado com um deles, levou ao total de 19 configurações de ensaio diferentes. Para cada configuração foram realizados três réplicas para verificar se os resultados estavam próximos, totalizando 57 ensaios. Foi realizada uma aquisição de EA para cada ensaio. Além disso, cada ensaio recebeu um número como identificação. A Tab. 3.1 sintetiza os ensaios realizados. É importante ressaltar que os ensaios foram realizados em lotes de três réplicas com o mesmo indentador contra a mesma amostra. Entretanto, a ordem dos lotes foi aleatória e que não seguiram necessariamente a numeração aqui adotada.

3.3. Ensaios Abrasivos

Neste ensaio, uma amostra de material em formato de pino é deslizada contra uma tira de papel abrasivo colada sobre um elemento plano. Seu principal objetivo foi estudar os eventos acústicos relacionados à abrasão dos polímeros usados no sistema formado pelo duto flexível e pelo *liner*. Deste modo, este conjunto de ensaios também permitiu avançar na tarefa de descrever a interação entre os dois componentes em serviço.

3.3.1. Procedimentos de Ensaios no Abrasômetro

a) Parâmetros dos Ensaios

Com o intuito de variar preferencialmente parâmetros que pudessem levar a diferenças significativas na severidade dos eventos abrasivos, foram variados apenas a granulometria do papel abrasivo e a carga. Os papéis abrasivos escolhidos foram de óxido de alumínio, com granulometria #400 (menor rugosidade) e #220, esperando-se que este último gere uma taxa de desgaste maior e, desse modo, uma atividade acústica mais intensa. Já as cargas escolhidas foram de 13,7 N (a menor carga possível para o equipamento) e 49,0 N (equivalente a 5 kg). Mais uma vez, espera-se que este segundo valor de carga leve a uma emissão acústica mais intensa.

Cada configuração levou a três deslizamentos consecutivos sobre uma tira de papel abrasivo novo, de modo a evitar que o material removido no início do ensaio leve ao surgimento de novos mecanismos de desgaste. Em outras palavras, o ensaio não chegam até o regime permanente. Cada deslizamento teve o comprimento de aproximadamente 50 mm e velocidade média de 20,83 mm/s. O valor aproximado do comprimento se deve ao fato do equipamento não controlar a distância deslizada.

Cada tira de papel abrasivo foi colada com uma fita dupla-face adesiva sobre superfície de uma placa metálica para evitar que a superfície se deforme durante o deslizamento do pino. Deste modo, entre cada deslizamento, bastou trocar a tira de papel abrasivo colada na placa.

b) Materiais e Preparação das Amostras

Como a proposta deste ensaio também envolve começar a conhecer o comportamento acústico dos materiais poliméricos do sistema duto flexível/enrijecedor, foram usadas amostras de poliamida e de poliuretano. Além desses dois, foi ensaiada uma

amostra de aço, pois é mais fácil encontrar resultados envolvendo este material na literatura, servindo assim como referência nas análises dos resultados.

Tabela 3.1 - Matriz de Ensaios dos testes de esclerometria linear

Penetrador	Réplica	Material		
		Aço/Ni-P	PC	PMMA
Cônico 40°	1	-	Ensaio 04	Ensaio 22
	2	-	Ensaio 05	Ensaio 23
	3	-	Ensaio 06	Ensaio 24
Cônico 60°	1	-	Ensaio 07	Ensaio 25
	2	-	Ensaio 08	Ensaio 26
	3	-	Ensaio 09	Ensaio 27
Cônico 90°	1	-	Ensaio 10	Ensaio 28
	2	-	Ensaio 11	Ensaio 29
	3	-	Ensaio 12	Ensaio 30
Cônico 120°	1	Ensaio 01	Ensaio 13	Ensaio 31
	2	Ensaio 02	Ensaio 14	Ensaio 32
	3	Ensaio 03	Ensaio 15	Ensaio 33
Vickers (face)	1	-	Ensaio 16	Ensaio 34
	2	-	Ensaio 17	Ensaio 35
	3	-	Ensaio 18	Ensaio 36
Vickers (aresta)	1	-	Ensaio 19	Ensaio 37
	2	-	Ensaio 20	Ensaio 38
	3	-	Ensaio 21	Ensaio 39
				Ensaio 57

O pino metálico foi confeccionado com aço ABNT 1010, com dureza Vickers 220, e possuiu diâmetro de 7 mm, que é o valor do diâmetro que o porta pinos possui, e uma comprimento de aproximadamente 50 mm. Já os polímeros não foram preparados em forma de pinos, mas em formas de pequenos discos com 8 mm de diâmetro e espessura de aproximadamente 4,5 mm. Tais discos foram então encaixados na ponta de um adaptador, que pode ser visto na Fig. 3.10, este sim fixado no porta pinos.

A poliamida usada foi a PA11, cujo módulo de elasticidade é de aproximadamente 300 MPa à temperatura ambiente, e foi retirada de um duto flexível. Já o poliuretano usado foi cedido pela mesma empresa que fornece o material dos *liners* e tem dureza 95 Shore A.

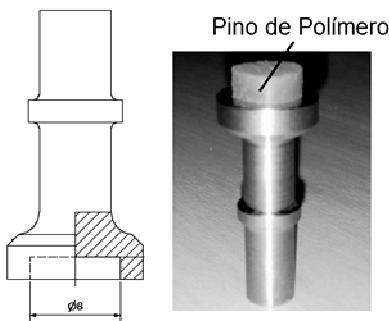


Figura 3.10 - Adaptador para amostras poliméricas no Abrasômetro

Todas as amostras foram lixadas com um papel abrasivo de granulometria #600 antes dos ensaios. Foi garantido sempre que este lixamento ficasse na direção perpendicular à do ensaio, de modo a se poder diferir nas micrografias as linhas resultantes da preparação do ensaio das linhas resultantes do ensaio propriamente dito. Antes de serem ensaiadas, as amostras foram limpas com álcool e ar comprimido para eliminar sujeiras e gordura. Depois de ensaiadas, as amostras metálicas foram limpas em um banho de álcool no ultrassom por 180 s. Em seguida, todas as amostras foram limpas com ar comprimido, para garantir que as partículas de desgaste soltas fossem removidas. Por fim, as amostras poliméricas foram metalizadas com ouro, conforme visto na Fig. 3.11, para poderem ser feitas micrografias de suas superfícies com o MEV.



Figura 3.11 - Amostras de PU (esq) e de PA (dir) ensaiadas e metalizadas para registro fotomicrográfico em MEV

c) Métodos de Avaliação

As superfícies de cada amostra ensaiada foram registradas no MEV. Dois modelos diferentes de MEV foram usados nas análises: o modelo Supra 40 e o modelo EVO MA 10, ambos da marca Zeiss. Para cada superfície, foram registradas uma vista geral e um conjunto de ampliações para a visualização dos detalhes.

Em seguida, os *bursts* de EA foram identificados. Foram considerados *bursts* os trechos do sinal RMS que excediam um limiar de 10 mV, encerrando quando voltavam para um nível menor que 3 mV. Estes valores foram empregados porque o ruído de fundo dos sinais adquiridos estava abaixo de 3 mV. Em seguida, foi usada a FFT para caracterizar os *bursts* no domínio da frequência. Para isso, cada um deles teve a sua frequência de pico identificada e disposta em um gráfico de dispersão em função do instante no qual ocorreu. Também foi confeccionado um gráfico de dispersão de pontos da energia por banda em função da frequência centroide para analisar a aplicabilidade do método da distinção dos mecanismos via análise de conglomerados.

3.3.2. *Equipamento para Ensaios Abrasivos*

O equipamento de testes utilizado nos ensaios abrasivos é o Abrasômetro que está apresentado na Fig. 3.12, construído em projetos anteriores no LTAD. Sua função básica é realizar ensaios do tipo pino contra plano em movimento alternado. Tal movimentação é obtida através de um motor controlado por um inverter de frequência que tem sua saída convertida em movimento linear através de um sistema biela-manivela. Além disso, o equipamento permite alterar tanto o comprimento quanto a velocidade deste movimento.

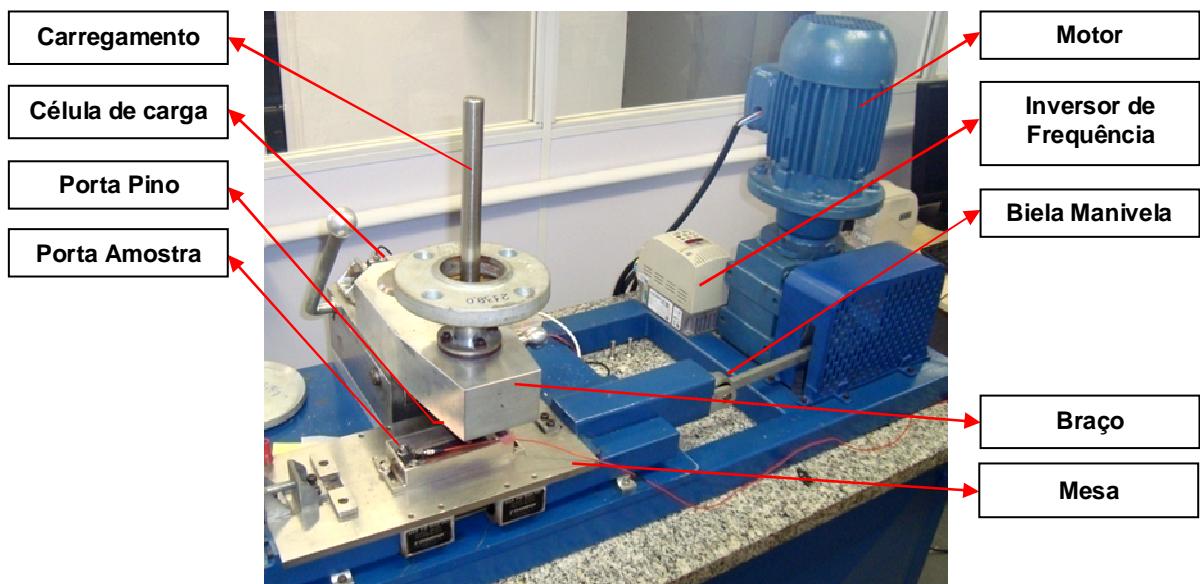


Figura 3.12 - Vista geral do Abrasômetro e seus principais componentes

A amostra plana é fixada em um porta amostra apropriado, presente na mesa em movimento alternado (ver Fig. 3.12). A placa metálica que porta tanto o sensor quanto o papel abrasivo foi fixada ao porta amostra com o auxílio e porcas e parafusos, conforme

exibido na Fig. 3.13. Já o pino foi preso a um porta pino no braço do equipamento, como pode ser visto nas Figs. 3.12 e 3.14. No caso dos pinos metálicos, eles foram fixados diretamente no porta pino, mas no caso das amostras poliméricas, a amostra a ser ensaiada não foi fixada diretamente no porta pinos, mas sim o adaptador (ver Fig. 3.14b).

No Abrasômetro, a força normal foi aplicada por um peso morto através de uma haste fixada no seu braço, logo acima do porta pinos (ver Fig. 3.12). Já a força tangencial é aplicada através do motor e do sistema biela-manivela e medida através de uma célula de carga e enviada ao programa de monitoramento do equipamento. Vale ressaltar que o programa usado para monitorar este equipamento não é capaz de controlá-lo ou acioná-lo. O Abrasômetro foi acionado diretamente no inverter de frequência e os dados de força foram adquiridos independentemente de haver ou não movimentação na mesa. Além disso, o carregamento e o comprimento do movimento foram regulados mecanicamente.



Figura 3.13 - Porta amostra do Abrasômetro com placas, papel abrasivo e sensor

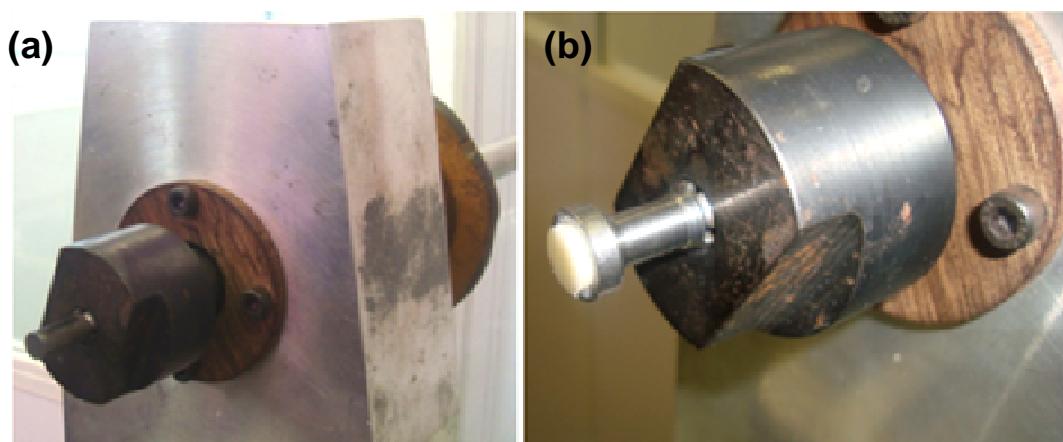


Figura 3.14 - Porta pinos do Abrasômetro com um pino metálico (a) e com um adaptador para pinos poliméricos (b)

Como cada ensaio foi realizado mediante a passagem de um pino sobre um papel abrasivo uma única vez, o movimento realizado foi somente de ida, não sendo realizada a volta para não reutilizar o papel abrasivo. Por isso, o ensaio precisou ser interrompido ao término da metade do primeiro ciclo. A sequência de operações utilizada para garantir esta configuração experimental foi a seguinte:

1. Acionar o Abrasômetro através do inversor de frequência com a haste do porta pino levantada, não havendo contato entre pino e amostra;
2. Iniciar aquisições de força e de EA;
3. Liberar manualmente a haste para que o pino toque a amostra no instante em que um novo ciclo se iniciar. Deste modo, o transiente que ocorre durante o acionamento do motor elétrico não influencia o início do ensaio;
4. Levantar a haste novamente ao término da metade do ciclo, garantindo que não haja a parte da volta do movimento alternado;
5. Desligar o Abrasômetro (as aquisições se encerram automaticamente).

Uma última observação sobre o equipamento é que seu funcionamento leva ao atrito entre diversos componentes internos, acarretando em alto nível de ruído que alcança o sensor de EA. Para minimizar este problema, a placa metálica na qual o sensor e o papel abrasivo foram fixados foi posicionada sobre uma placa de poliuretano, cuja função era amortecer os ruídos do equipamento. A Figura 3.13 exibe a placa de PU entre a placa metálica e o porta amostras. O uso desta estratégia é justificado pelos gráficos da Fig. 3.15 a seguir, que mostram o sinal RMS da leitura do sensor de EA durante o funcionamento em vazio do Abrasômetro (motor ligado e braço levantado) com a placa metálica, que porta o sensor, diretamente no porta amostras e depois com a placa de PU intermediando. Nota-se que o alto nível de ruídos do primeiro caso, que dificulta as análises dos resultados, desaparece quase completamente no segundo caso. O que resta é apenas um ruído de fundo contínuo, porém com amplitude maior do que no caso do equipamento desligado.

3.3.3. Aquisição de Sinais Acústicos nos Ensaios no Abrasômetro

a) Equipamentos e Fixação do Sensor

O sensor empregado foi o modelo FE14, e foi fixado usando cera de abelha na mesma placa metálica onde foram coladas as fitas de papel abrasivo (ver Fig. 3.13). Além disso, o cabo do sensor foi fixado em dois pontos antes de chegar na região do ensaio, com o objetivo de evitar que sua movimentação levasse ao desprendimento do sensor.

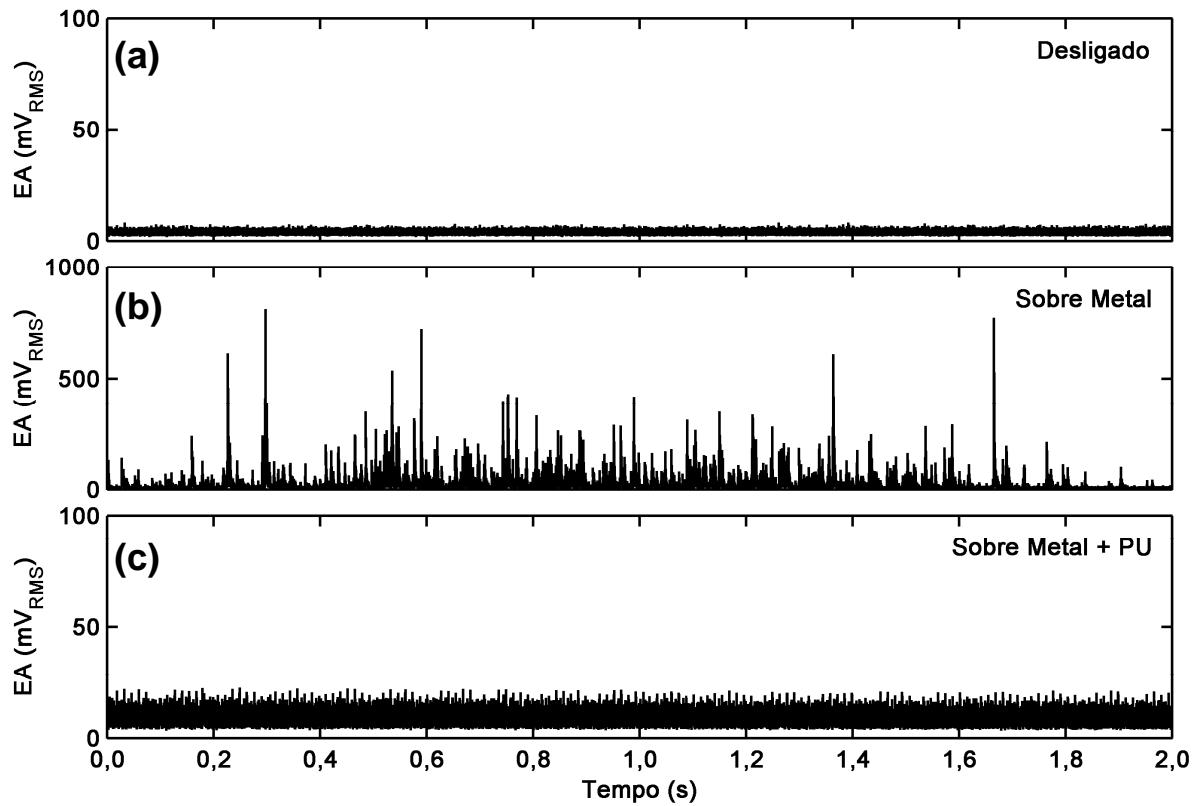


Figura 3.15 - Valor RMS da Emissão Acústica adquirida no Abrasômetro durante meio ciclo nas situações: desligado (a), funcionando em vazio com sensor colocado sobre amostra metálica (b) e funcionando em vazio com sensor colocado sobre amostra de metal + PU (c)

O pré-amplificador foi ajustado para uma amplificação de 60 dB no caso dos polímeros e 40 dB no caso do metal, pois estes valores se mostraram os mais adequados nos testes preliminares. O computador no qual a placa PCI-2 de aquisição dos sensores acústicos não foi o mesmo que fez o monitoramento do Abrasômetro. Por este motivo, a duração da aquisição foi maior que a duração do deslizamento do pino sobre o papel abrasivo, de modo a garantir que toda ela seria monitorada e a evitar problemas com sincronia e *trigger* (início da aquisição de dados).

b) Parâmetros de Aquisição

A taxa de aquisição empregada nas aquisições foi de 5 MHz. Já o número de pontos foi calculado de acordo com o tempo de aquisição necessário. Um ensaio de 50 mm realizado a 20,83 mm/s possuía uma duração de 2,4 s, mas como a duração da aquisição deveria ser maior, foi escolhida uma aquisição de 8 s. Com base neste valor, foi determinado que a quantidade de pontos adquiridos seria de 39.062 kS.

Deve-se ressaltar que a posição na qual cada *burst* ocorreu, ao contrário dos ensaios esclerométricos, não pôde sequer ser estimada com exatidão. A única informação que se tem é o instante de tempo no qual cada um ocorreu, mas não se sabe em qual posição ao longo de toda superfície do pino. Por este motivo, não será possível construir imagens relacionando eventos acústicos com eventos tribológicos como no caso do caso anterior.

3.3.4. Matriz de Ensaios no Abrasômetro

O uso de três materiais, de dois tipos de papel abrasivo e de duas cargas levou ao total de 12 configurações diferentes. Para cada configuração foram realizados três deslizamentos sobre lixas novas, totalizando 36 ensaios. Além disso, cada ensaio recebeu um número como identificação e teve sua EA adquirida. Com tal identificação, pode-se consultar a Tab. 3.2 para saber o seu material, o penetrador e a réplica. Por fim, cada combinação de papel abrasivo e carregamento recebeu um código de A a D. É importante ressaltar que os ensaios foram realizados em lotes de três deslizamentos do mesmo pino contra três tiras novas de papel abrasivo, mas com a mesma granulometria. Entretanto, a ordem não seguiu a numeração aqui adotada.

Tabela 3.2 - Matriz de Ensaios dos testes de deslizamento contra papel abrasivo

Carregamento	Papel Abrasivo	Réplica	Material		
			Aço	PA	PU
13,7 N	#400 (A)	1	Ensaio 01	Ensaio 07	Ensaio 13
		2	Ensaio 02	Ensaio 08	Ensaio 14
		3	Ensaio 03	Ensaio 09	Ensaio 15
	#220 (B)	1	Ensaio 04	Ensaio 10	Ensaio 16
		2	Ensaio 05	Ensaio 11	Ensaio 17
		3	Ensaio 06	Ensaio 12	Ensaio 18
	#400 (C)	1	Ensaio 19	Ensaio 25	Ensaio 31
		2	Ensaio 20	Ensaio 26	Ensaio 32
		3	Ensaio 21	Ensaio 27	Ensaio 33
49,0 N	#220 (D)	1	Ensaio 22	Ensaio 28	Ensaio 34
		2	Ensaio 23	Ensaio 29	Ensaio 35
		3	Ensaio 24	Ensaio 30	Ensaio 36

3.4. Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida

Este conjunto de ensaios tem como objetivo simular o contato entre os materiais do sistema *riser* contra *liner* em pequena escala e com curtas durações, verificando os mecanismos de desgaste e seu comportamento acústico. Os testes realizados foram do tipo pino contra plano com movimento alternado, sendo realizados no Abrasômetro. Espera-se encontrar aqui nestes ensaios uma prévia dos resultados que serão obtidos nos ensaios em escala real. Entretanto, diferentemente dos ensaios em escala real, estes ensaios não foram realizados submersos, especialmente porque o sensor à prova d'água disponível no laboratório não cabia no porta amostras.

3.4.1. Procedimentos dos Ensaios em Escala Reduzida

a) Materiais e Preparação das Amostras

Os materiais utilizados foram a mesma poliamida e o mesmo poliuretano dos ensaios abrasivos. Nestes ensaios, o pino foi de PA e o plano de PU. Os materiais poliméricos empregados neste ensaio possuem a mesma origem daqueles utilizados no ensaio abrasivo. Os pinos de PA também foram preparados da mesma forma que no caso anterior (ver seção 3.3.1b e Fig. 3.14). Já as placas planas de PU foram cortadas para que assumissem dimensões de aproximadamente $30 \times 100 \times 7 \text{ mm}^3$, como pode ser visto na Fig. 3.16. Sua superfície de testes foi lixada até a granulometria #600 com movimentos circulares.

Antes de serem ensaiadas, as amostras (tanto os pinos de PA quanto os planos de PU) foram limpas com álcool e ar comprimido para eliminar sujeiras e gordura. Depois de ensaiadas, elas foram registradas com câmera fotográfica convencional. Em seguida, foram limpas com álcool e com ar comprimido novamente, para garantir que as partículas de desgaste soltas fossem removidas. Por fim, as amostras foram metalizadas com ouro para que suas superfícies pudessem ser registradas no MEV.

b) Parâmetros de Deslizamento

O movimento alternado empregado foi realizado com curso de 50 mm (100 mm de ida e volta), e com uma velocidade média de 20,83 mm/s. A distância total de deslizamento foi de 2 km, totalizando 96.000 s de ensaio (26h40min). Esta distância aparentemente curta quando comparada à dos ensaios em escala real foi escolhida porque testes preliminares

mostraram que após aproximadamente 1 km, o coeficiente de atrito já se estabilizava. Como a proposta deste tipo de ensaio era ser breve, a distância final foi fixada em 2 km.

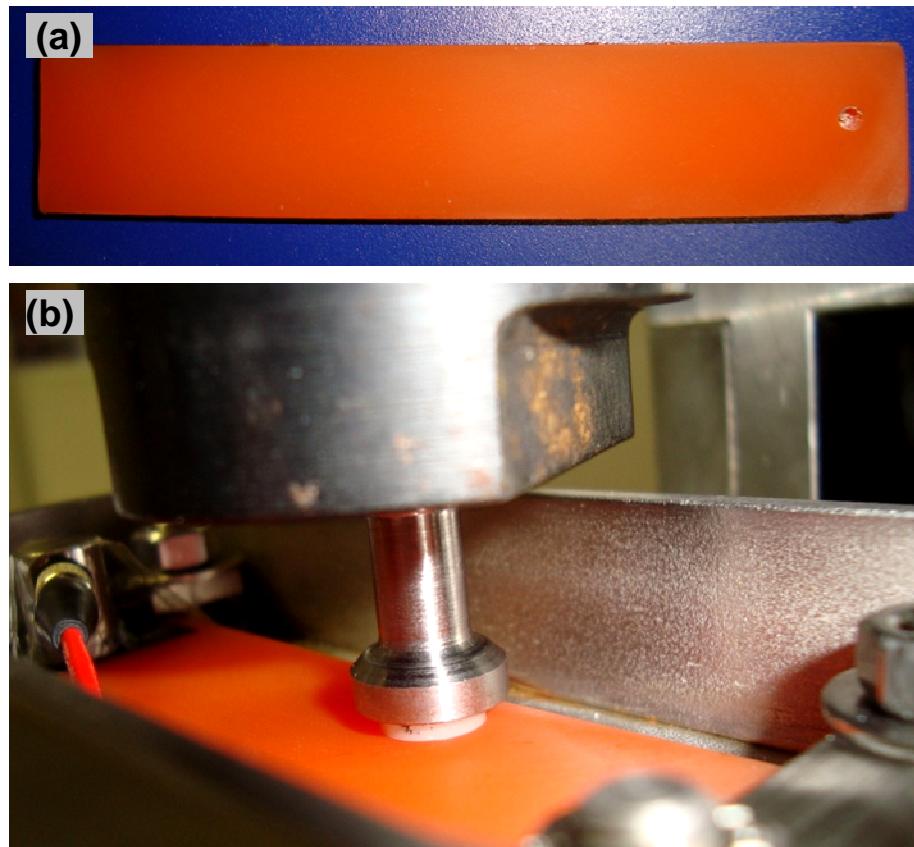


Figura 3.16 - Amostra de poliuretano para ensaios de deslizamento alternado (a) e posicionada para ensaio com o pino de PA e com o sensor de EA (b)

Foram usadas duas pressões de contato distintas, 2 e 3 MPa. Estes valores foram adotados porque se estima que as pressões de contato entre o duto flexível e o *liner* estejam dentro deste intervalo. Como as amostras de PA possuíam diâmetro de 8 mm, os valores de pressão foram atingidos usando-se cargas de 10 e 15 kgf, respectivamente.

c) Métodos de Avaliação

Por se tratar de um ensaio com duração de várias horas, a EA não pôde ser adquirida e armazenada durante toda a sua duração. Ao invés disso, a cada 100 m era feita uma aquisição de 16 s, incluindo uma aquisição logo no início de cada ensaio (antes de completar 1 m de distância total percorrida).

Primeiramente, foi analisado o coeficiente de atrito e os valores RMS da EA ao longo das aquisições. Em seguida, os *bursts* de EA foram identificadas, e em seguida analisados com o método das frequências de pico. Por fim, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO MA 10 da fabricante Zeiss, para terem suas superfícies e mecanismos de desgaste registrados.

3.4.2. *Equipamento de Ensaios de Deslizamento em Escala Reduzida*

O equipamento utilizado para a realização dos testes foi o Abrasômetro, o mesmo dos ensaios abrasivos. Contudo, neste caso foi necessário utilizar algumas funções do equipamento que não foram usadas no ensaio anterior e que merecem atenção.

Em primeiro lugar, como o movimento alternado foi usado nos ensaios, o coeficiente de atrito apresentou alguns vales correspondentes aos pontos de inversão do movimento. Para eliminar esses pontos de inversão foi utilizada a força tangencial fornecida pela célula de carga do equipamento. Toda vez que seu valor trocava de sinal, o ponto no qual isso ocorreu era identificado e eliminado. Por garantia, o ponto anterior e o posterior também foram eliminados, pois o ponto de inversão do movimento (vale) poderia ser na verdade o ponto de inversão. A Fig. 3.17 apresenta uma curva de coeficiente de atrito com as inversões e os pontos retirados pela metodologia proposta. Em seguida, os pontos remanescentes foram filtrados com um filtro digital Butterworth passa-baixa de terceira ordem com frequência de corte igual a 1% da frequência de aquisição.

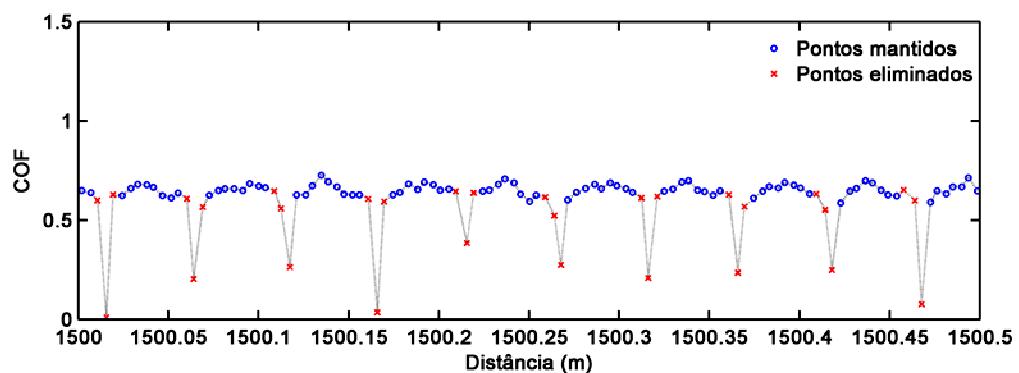


Figura 3.17 - Coeficiente de atrito em função da distância percorrida com os vales de inversão; os pontos em vermelho foram os eliminados pelo método utilizado

A velocidade de 20,83 mm/s é a velocidade média desenvolvida pela mesa de testes, não sendo constante durante a operação. Esta velocidade pode ser alterada ao se ajustar o comprimento do ciclo ou através do inversor de frequência.

3.4.3. Aquisição de Sinais Acústicos nos Ensaios em Escala Reduzida

Deve-se ressaltar que a posição na qual cada evento acústico ocorreu não pode ser indicada, uma vez que se conhece apenas o instante de tempo no qual ele ocorreu, mas não qual posição ao longo de toda superfície do pino. Ressalta-se também que o atrito entre os componentes internos, que é considerado ruído nesta aplicação, não interferiu nas medições, uma vez que a própria placa de PU na qual o sensor de EA foi fixado já o amortece, conforme visto anteriormente na seção 3.3.2, mais especificamente na Fig. 3.15.

a) Equipamentos

O sensor empregado foi o modelo FE14, e foi fixado usando cera diretamente sobre a placa de PU (ver Fig. 3.16b). Além disso, a fim de evitar que a movimentação do cabo não leve ao desprendimento do sensor, ele foi fixado em dois pontos antes de chegar ao sistema de medição, garantindo que sua movimentação não leve ao desprendimento do sensor.

O pré-amplificador foi ajustado para uma amplificação de 60 dB, pois como polímeros apresentam grande amortecimento, é necessária a maior amplificação possível. O computador no qual a placa PCI-2 de aquisição dos sensores acústicos não foi o mesmo que fez o monitoramento do Abrasômetro. Por este motivo, a duração da aquisição foi maior que a duração do deslizamento do pino sobre o papel abrasivo, de modo a garantir que toda ela seria monitorada e a evitar problemas com sincronia e *trigger*.

b) Parâmetros de Aquisição

A taxa de aquisição empregada nas aquisições foi de 5 MHz. Já o número de pontos foi calculado de acordo com o tempo de aquisição necessário. Um ciclo de 100 mm realizado a 20,83 mm/s possui uma duração de 4,8 s. Para adquirir pelo menos dois ciclos completos, do início ao fim, foi escolhida uma aquisição de 16 s. Com base neste valor, foi determinado que a quantidade de pontos adquiridos seria de 78.125 kS. Além disso, uma aquisição extra com o equipamento ligado, porém sem movimentação, foi realizada para que se pudesse caracterizar o ruído de fundo.

3.4.4. Matriz de Ensaios em Escala Reduzida

Foram realizados dois ensaios, sendo efetuadas aquisições de EA a cada 100 metros, incluindo no instante inicial do ensaio (chamado aqui de 0 m). Cada ensaio recebeu um número de identificação, presente na Tab. 3.3, assim como cada aquisição, na Tab. 3.4.

Tabela 3.3 - Matriz com identificação dos ensaios em escala reduzida

Ensaio	Pressão de Contato	Distância Deslizada
Ensaio 01	2 MPa	2 km
Ensaio 02	3 MPa	2 km

Tabela 3.4 - Cronograma de aquisições dos ensaios em escala reduzida

Distância (m)	Ensaio	
	01	02
0	Aquisição 01	Aquisição 22
100	Aquisição 02	Aquisição 23
200	Aquisição 03	Aquisição 24
300	Aquisição 04	Aquisição 25
400	Aquisição 05	Aquisição 26
500	Aquisição 06	Aquisição 27
600	Aquisição 07	Aquisição 28
700	Aquisição 08	Aquisição 29
800	Aquisição 09	Aquisição 30
900	Aquisição 10	Aquisição 31
1000	Aquisição 11	Aquisição 32
1100	Aquisição 12	Aquisição 33
1200	Aquisição 13	Aquisição 34
1300	Aquisição 14	Aquisição 35
1400	Aquisição 15	Aquisição 36
1500	Aquisição 16	Aquisição 37
1600	Aquisição 17	Aquisição 38
1700	Aquisição 18	Aquisição 39
1800	Aquisição 19	Aquisição 40
1900	Aquisição 20	Aquisição 41
2000	Aquisição 21	Aquisição 42

3.5. Ensaio de Deslizamento em Escala Real

Este ensaio teve como objetivo principal simular o contato entre duto flexível e enrijecedor em escala real, submerso e com longa duração, sendo considerado um teste de bancada de acordo com a Fig. 2.18. Os objetivos principais do teste foram verificar os mecanismos, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste, bem como seu comportamento acústico. O teste foi realizado usando um tribômetro e um conjunto de amostras construídos especificamente para esta aplicação (BERTHOLDI, 2014; PAES *et al.*, 2014)..

É importante ressaltar que este ensaio faz parte de um projeto que está sendo desenvolvido pelo LTAD, e que os detalhes a cerca do controle do equipamento, da identificação dos mecanismos de desgaste e da medição da taxa de desgaste são partes dos trabalhos de outros pesquisadores. Além disso, quando este trabalho foi encerrado, o ensaio ainda estava em andamento, impossibilitando que fossem feitas análises mais aprofundadas aqui. Portanto, os mecanismos de desgaste foram avaliados à vista desarmada e foi analisada apenas a emissão acústica.

3.5.1. Procedimentos do Ensaio de Deslizamento em Escala Real

a) Parâmetros de Deslizamento

O ensaio de deslizamento foi previsto para se encerrar com um percurso de deslizamento de 30 km, executado em movimento alternado com amplitude de 30 mm (ou 60 mm ida e volta), totalizando 500.000 ciclos. Entretanto, apenas a primeira metade deste ensaio foi concluída a tempo de ser apresentada neste trabalho. Além disso, o ensaio foi interrompido a cada 50.000 ciclos (3 km) para avaliar os mecanismos de desgaste através de registros fotográficos e para recolher partículas de desgaste soltas.

O ensaio foi realizado submerso em água doce a uma temperatura de 16 °C. A velocidade de deslizamento foi mantida constante em 4 mm/s, enquanto a pressão de contato foi mantida entre 2 e 3 MPa durante a maior parte do contato. Estes valores de temperatura, velocidade e pressão são estimativas do funcionamento do sistema *liner/riser* realizadas pela operadora das plataformas de petróleo que auxilia o projeto do laboratório.

Com este valor de velocidade, o ciclo deveria ter duração de 15 s. Entretanto, sua duração na verdade é 16,44 s, o que ocorre devido ao tempo que fica parado durante a inversão do sentido do movimento.

b) Materiais e Preparação das Amostras

Neste ensaio, foi utilizado um duto flexível de PA com diâmetro interno de 6" (aprox. 152,4 mm). Além dele, foram confeccionadas duas amostras de PU que simulam o *liner*, uma para cada lado do duto flexível. Ambas as amostras foram fabricadas pela empresa que fabrica os *liners* da Petrobras a partir de um projeto feito pelo laboratório (BERTHOLDI, 2014), cujas dimensões podem ser vistas na Fig. 3.18 e na Tab. 3.5. Além disso, foi incluída uma área plana na lateral que permita fixar o sensor de EA, que pode ser vista nesta figura.

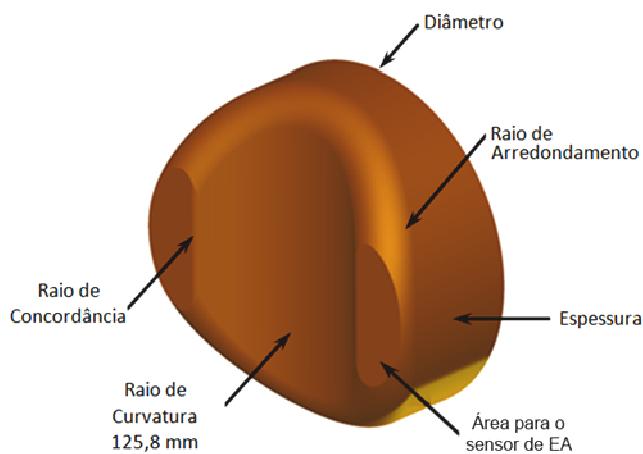


Figura 3.18 - Geometria da peça de PU, as dimensões das variáveis estão presentes na Tab. 3.5 (BERTHOLDI, 2014)

Tabela 3.5 - Dimensões da peça de PU, a representação das variáveis geométricas estão na Fig. 3.18 (BERTHOLDI, 2014)

Parâmetros Geométricos	Valores (mm)
Diâmetro da Amostra	300
Espessura da Menor Seção	120
Raio de Arredondamento	30
Raio de Concordância	50

Devido à deformação dos materiais durante o contato, não é possível garantir uma pressão de contato uniforme. Além disso, a pressão de contato pode se alterar devido à movimentação do sistema. Por esses motivos, o projeto buscou garantir que a maior parte do contato permanecesse com a pressão o mais uniforme possível dentro da faixa de 2 a 3 MPa, conforme pode ser visto nos resultados de simulações computacionais na Fig. 3.19.

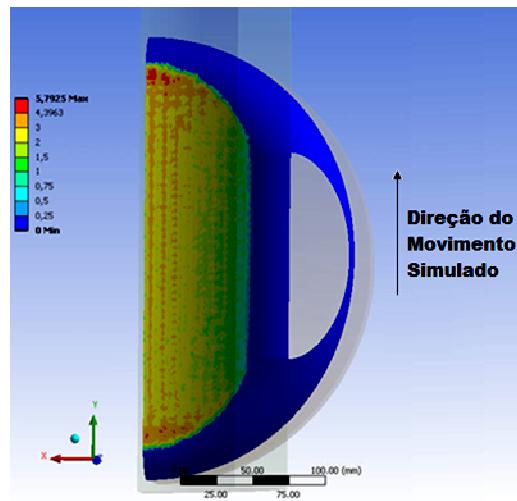


Figura 3.19 - Resultado da simulação da pressão de contato na peça de PU durante movimentação e com carga de 55 kN (BERTHOLDI, 2014)

A montagem experimental é apresentada na Fig. 3.20. Nela, podem ser observados o duto flexível no centro e as duas amostras de PU que simulam o papel do *liner* em suas laterais. Na ampliação da Fig. 3.20b, é possível observar o sensor fixado no porta sensor.

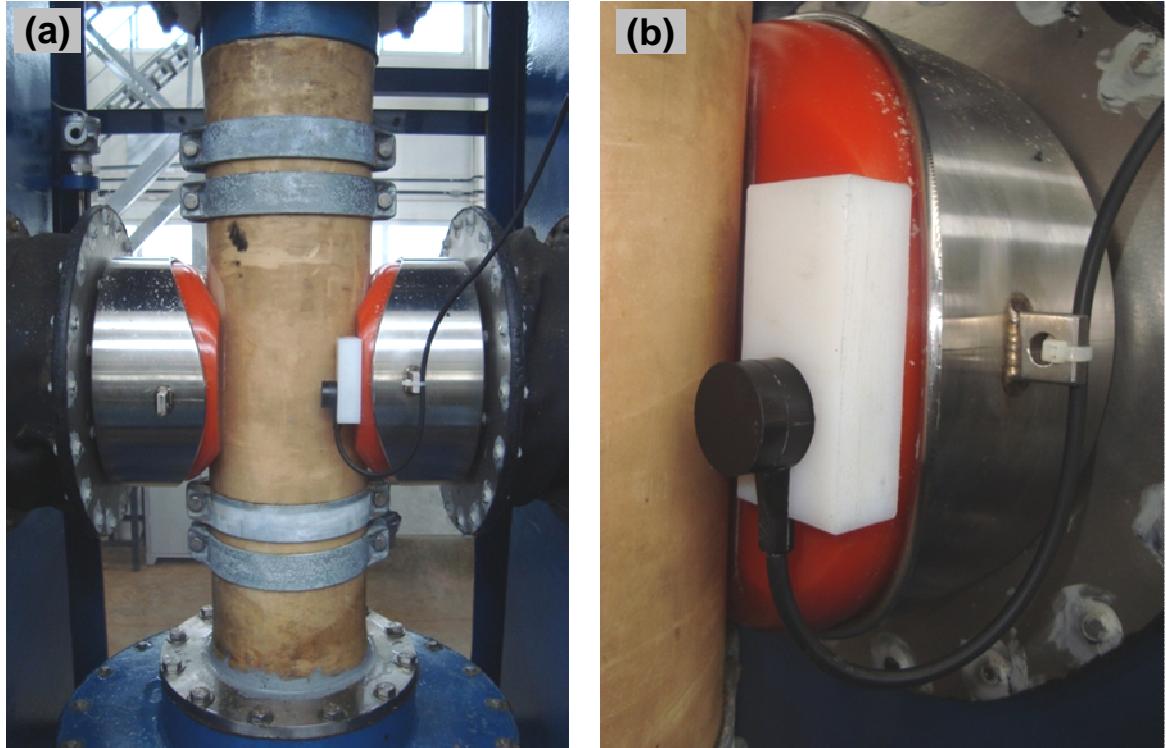


Figura 3.20 - Montagem experimental do ensaio em escala real com duto flexível e enriquecedores (a) e ampliação do sensor preso ao porta sensor (b)

c) Métodos de Avaliação

Nas paradas a cada 50.000 ciclos, foram feitos registros fotográficos das superfícies das amostras e das partículas de desgaste. As análises envolvendo coeficiente de atrito e perda de volume e de massa, bem como os registros fotomicrográficos no MEV, só podem ser realizados após o término dos 500.000 ciclos, não podendo ser inclusos neste trabalho. Além disso, as análises das frequências de pico foram complementadas com o a STFT.

3.5.2. Equipamento de Ensaio de Deslizamento em Escala Real

O equipamento de testes usado neste ensaio é denominado Tribômetro, representado na Fig. 3.21, e foi projetado e construído no próprio LTAD (HWANG *et al.*, 2006). A força de compressão foi gerada por um sistema hidráulico e possuiu o valor constante de 55 kN, enquanto que a força vertical foi controlada para que o sistema mantivesse uma velocidade constante de 4 mm/s. Todas as variáveis foram monitoradas por um sistema de controle, que também armazenou e registrou os dados.

Uma informação importante é que as duas amostras de PU foram referenciadas como sendo a amostra da esquerda e a amostra da direita, seguindo a vista da Fig. 3.21.

3.5.3. Aquisição de Sinais Acústicos no Ensaio em Escala Real

a) Equipamentos

O sensor empregado foi o AA11, à prova d'água, e foi fixado sobre a parte plana da amostra da direita de PU (ver Fig. 3.18) com o auxílio de um porta sensor (ver Fig. 3.20b). O pré-amplificador foi ajustado para uma amplificação de 60 dB, pois como polímeros apresentam grande amortecimento, foi necessária a maior amplificação possível. O porta sensor foi fabricado em Technyl e colado diretamente na peça de PU, sendo o sensor apenas encaixado em seu interior. Além disso, a fim de evitar que a movimentação do cabo não levasse ao desprendimento do sensor, ele foi fixado em um ponto antes de chegar na região do ensaio (ver Fig. 3.20), garantindo uma restrição segura de sua movimentação.

b) Parâmetros de Aquisição

Como o ensaio é extremamente longo, a EA não pôde ser adquirida e armazenada para análises durante toda a sua duração. Ao invés disso, a cada 5.000 ciclos (300 m ou 23h50min) era feita uma aquisição. A taxa de aquisição empregada foi de 5 MHz, para trabalhar com uma maior frequência máxima observável. Foi escolhida uma aquisição de 30 s para tentar garantir que fosse adquirido sempre pelo menos um ciclo do início até o fim. Com base neste valor, foi empregada uma quantidade de pontos adquiridos de 146.485 kS.

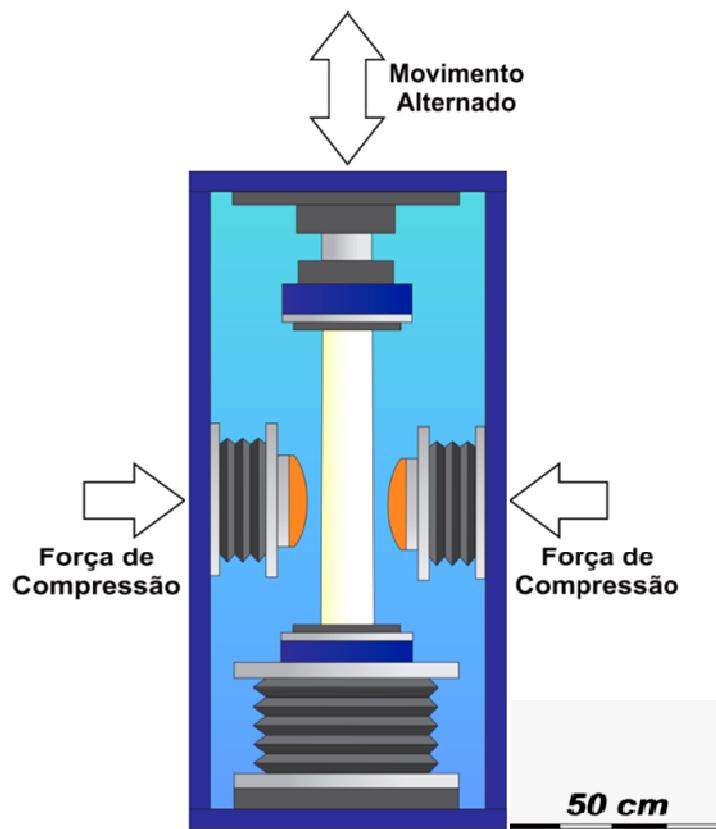


Figura 3.21 - Tribômetro em grande escala para simulação da interação entre *liner* e *riser*

c) Cronograma de aquisições

Conforme já discutido, foram realizadas amostragens a cada 5.000 ciclos, sendo que a cada 50.000 ciclos foram feitas paradas para caracterização e coleta de partículas de desgaste. A Tabela 3.6 exibe o cronograma destas aquisições, levando em consideração os conjuntos de 50.000 ciclos realizados. Deste modo, por exemplo, a aquisição 35 foi realizada com 150.000 + 25.000 ciclos.

Tabela 3.6 - Cronograma de aquisições do ensaio em escala real

Ciclos	Conjunto				
	01	02	03	04	05
5.000	Aqus. 01	Aqus. 11	Aqus. 21	Aqus. 31	Aqus. 41
10.000	Aqus. 02	Aqus. 12	Aqus. 22	Aqus. 32	Aqus. 42
15.000	Aqus. 03	Aqus. 13	Aqus. 23	Aqus. 33	Aqus. 43
20.000	Aqus. 04	Aqus. 14	Aqus. 24	Aqus. 34	Aqus. 44
25.000	Aqus. 05	Aqus. 15	Aqus. 25	Aqus. 35	Aqus. 45
30.000	Aqus. 06	Aqus. 16	Aqus. 26	Aqus. 36	Aqus. 46
35.000	Aqus. 07	Aqus. 17	Aqus. 27	Aqus. 37	Aqus. 47
40.000	Aqus. 08	Aqus. 18	Aqus. 28	Aqus. 38	Aqus. 48
45.000	Aqus. 09	Aqus. 19	Aqus. 29	Aqus. 39	Aqus. 49
50.000	Aqus. 10	Aqus. 20	Aqus. 30	Aqus. 40	Aqus. 50