MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA MONITORAMENTO DE RISERS FLEXÍVEIS

Ricardo Callegari Jacques

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA MONITORAMENTO DE RISERS FLEXÍVEIS

RICARDO CALLEGARI JACQUES
Mestre em Engenharia
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2009

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Ruzzante, CNEA (Argentina);
Dr. Sérgio Damasceno Soares, CENPES-PETROBRAS;
Prof. Dr. Afonso Reguly, PPGEM-UFRGS.

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Telmo Strohaecker por ter possibilitado a minha participação neste projeto e pelas discussões referentes à parte de fadiga da tese.

Ao Prof. Dr. Ruzzante por ter me recebido na Argentina e ter me ensinado as bases da Emissão Acústica.

Ao Dr. Damasceno que me recebeu várias vezes no CENPES e teve a disponibilidade e paciência de discutir vários resultados desta tese.

Ao Prof. Dr. Reguly por ter discutido procedimentos de ensaios e por ter sanado várias dúvidas que eu tive durante a tese.

Ao Msc. Cláudio Camerini por ter trazido este projeto até a UFRGS e ter incentivado a aquisição do equipamento de EA utilizado nesta tese, assim como fornecimento dos *risers* estudados.

À minha família pelo apoio, compreensão e paciência nos momentos difíceis.

Ao Eng. Bianchessi, que me ajudou no começo da tese me explicando a base de processamento de sinais e instrumentação.

Ao Msc. Flores, que facilitou grandemente a conclusão desta tese através de discussões de resultados de ensaios, sugestões de procedimentos, explicações de métodos de análise que eu não conhecia e crítica geral da tese.

Ao meu colega de laboratório Dr. Martins por ter ajudado na elaboração dos testes e pelas discussões de análises.

Aos colegas do LAMEF pela ajuda a conduzir os ensaios.

Ao Prof. Dr. Gallego por ter me recebido em Granada e pelas discussões e sugestões.

À Prof. Dra. Sidia Callegari pela ajuda na parte de estatística.

Ao CNPq por ter patrocinado parte deste projeto através de uma bolsa de doutorado.

"If I have seen further
it is only by standing on the shoulders of giants."

Isaac Newton

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO 1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 TUBOS FLEXÍVEIS E COMPONENTES ASSOCIADOS 4
2.1.1 Tubos flexíveis 4
2.1.2 Conectores 7
2.1.3 Limitadores (*Bend Stiffners/Bend Limiters*) 9
2.1.4 Mecanismos de Dano 9
2.1.5 Fadiga de *risers* 15
2.2 EMISSÃO ACÚSTICA (EA) 16
2.2.1 Fontes de Emissão Acústica 19
2.2.2 Propagação de Ondas 21
2.2.3 Atenuação do Sinal de Emissão Acústica 23
2.2.4 Detecção e Equipamento de Emissão Acústica 25
2.2.5 Parâmetros de Medição do Sinal de EA 32
2.2.6 Localização das fontes 35
2.2.7 Ruído 37
2.2.8 Efeito Kaiser, Corolário Dunegan e Razão Felicity 40
2.2.9 Emissão Acústica em cabos e tubos de multicamadas 40
2.3 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS E DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES DE EMISSÃO ACÚSTICA 46
3.0 OBJETIVOS E DIVISÃO DO TRABALHO 49
3.1 OBJETIVOS 49
3.2 DIVISÃO DO TRABALHO 49
4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 51
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 51
4.1.1 Riser de 6 polegadas correspondente ao Grupo de Ensaios No.2 51
4.1.2 Tiras da armadura de tração do *riser* do Primeiro e Terceiro Grupos de Ensaios 52
4.2 EQUIPAMENTO E ANÁLISE DE EMISSÃO ACÚSTICA 53
4.2.1 Equipamento de EA para aquisição de dados 53
4.2.2 Sensores de EA utilizados 53
4.2.3 Acoplamento dos sensores 54
4.3 SISTEMAS E PROCEDIMENTOS DE CARREGAMENTOS 54
5.0 PRIMEIRO GRUPO DE ENSAIOS 55
5.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DO PRIMEIRO GRUPO DE ENSAIOS 55
5.2 RESULTADOS DO PRIMEIRO GRUPO DE ENSAIOS 56
5.3 CONCLUSÕES PARCIAIS 65
6.0 SEGUNDO GRUPO DE ENSAIOS 67

6.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DO SEGUNDO GRUPO DE ENSAIOS 67
6.2 RESULTADOS DO SEGUNDO GRUPO DE ENSAIOS 70
6.3 CONCLUSÕES DO SEGUNDO GRUPO DE ENSAIOS 79
7.0 TERCEIRO GRUPO DE ENSAIOS 80
7.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DO TERCEIRO GRUPO DE ENSAIOS 80
7.2 RESULTADOS DO TERCEIRO GRUPO DE ENSAIOS 81
7.3 CONCLUSÕES DO TERCEIRO GRUPO DE ENSAIOS 95
8.0 QUARTO GRUPO DE ENSAIOS 96
8.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DO QUARTO GRUPO DE ENSAIOS 96
8.2 RESULTADOS DO QUARTO GRUPO DE ENSAIOS 97
8.3 CONCLUSÕES DO QUARTO GRUPO DE ENSAIOS 104
9.0 CONCLUSÕES 105
10.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 107
11.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Camadas do riser (adaptado de TECHNIP 2007). 5
Figura 2.2: Linha de produção de petróleo e designações (BAI 2001). 6
Figura 2.3: End fittings (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE 2002). 7
Figura 2.4: Montagem do end fitting (MARINHO 2006). 8
Figura 2.5: Dano à camada polimérica externa (MARINHO 2006). 13
Figura 2.6: Arames da armadura de tração rompidos (MARINHO 2006). 14
Figura 2.7: Emissão acústica em um vaso de pressão cilíndrico. 17
Figura 2.8: Classificação de fontes de EA segundo RUZZANTE 1998. 20
Figura 2.9: Ondas longitudinais (ANDREUCCI 2008). 21
Figura 2.10: Ondas transversais (ANDREUCCI 2008). 22
Figura 2.11: Analogia à atenuação geométrica. 23
Figura 2.12: esquema de um sensor piezoelétrico típico 27
Figura 2.13: Diagrama de Blocos de um sistema DiSP (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005). 30
Figura 2.14: Parâmetros temporais de aquisição: PDT, HDT e HLT. 32
Figura 2.15: Parâmetros de medição do sinal de EA (adaptado de MIX 2005) 33
Figura 2.16: Localização linear através da técnica de EA. 35
Figura 2.17: Localização planar através da técnica de EA (VALLEN 2007). 36
Figura 2.18: Localização zonal através da técnica de EA. 37
Figura 4.1: Camadas do riser, (a) vista geral e (b) vista detalhada 51
Figura 4.2: Metalografia de um arame da armadura de tração mostrando ferrita e perlita alinhadas preferencialmente de cima pra baixo 52
Figura 4.3: (a) Curva de calibração fornecida pela PAC para o sensor R15I-AST; (b) curva de calibração fornecida pela PAC para o sensor WDI-AST. 54
Figura 5.1: (a) Vista lateral e (b) visão superior das tiras entalhadas. 55
Figura 5.2: (a) Montagem dos sensores de EA e tira na máquina de tração; (b) detalhe mostrando o entalhe. 56
Figura 5.3: Áreas remanescentes das seções resistentes após o entalhe (a) a menor área, (b) a segunda menor área, (c) a segunda maior área e (d) a maior área. 57
Figura 5.4: Emissão acústica da tira com área de 12% da seção original (ruptura perto de 10s) 58
Figura 5.5: EA da tira com área de 37% da seção original (ruptura perto de 20s). 58
Figura 5.6: EA da tira com área de 60% da seção original (ruptura perto de 28s). 59
Figura 5.7: EA da tira com área de 82% da seção original (ruptura perto de 50s). 59
Figura 5.8: Carregamento da tira com seção de 12% da área original. 60
Figura 5.9: Carregamento da tira com seção de 37% da área original. 60
Figura 5.10: Carregamento da tira com seção de 60% da área original. 61
Figura 5.11: Carregamento da tira com seção de 82% da área original. 61
Figura 5.12: Menor dos entalhes, 82% de seção restante. 63
Figura 5.13: Entalhe médio, 60% de área de seção restante. 64
Figura 5.14: entalhe grande, 37% de seção restante. 64
Figura 5.15: Maior dos entalhes, 12% de seção restante. 65

Figura 6.1: Riser de 6 polegadas de diâmetro montado na treliça. 67
Figura 6.2: Entalhes feitos nas tiras com uma retífica manual Dremmel. 68
Figura 6.3: Disposição dos sensores no riser. 68
Figura 6.4: Sensores de EA montados no conector do riser, câmera montada no riser para medir rotação e aparelho 3MA para medições magnéticas de tensão nas tiras. 69
Figura 6.5: Sensores de emissão acústica montados diretamente nas tiras do riser e sobre a capa polimérica do riser. 69
Figura 6.6: Carregamento e resposta em Amplitude de EA para o dia 6 / 5 / 2008. 71
Figura 6.7: Carregamento e resposta em Energia PAC de EA para o dia 6 / 5 / 2008. 71
Figura 6.8: Carregamento e resposta em ASL de EA para o dia 6 / 5 / 2008. 72
Figura 6.9: Carregamento e resposta em Duração de EA para o dia 6 / 5 / 2008. 73
Figura 6.10: Carregamento e resposta em Tempo de Subida de EA para o dia 6/5/2008. 73
Figura 6.11: Carregamento e resposta em Amplitude de EA para o dia 7 / 5 / 2008. 74
Figura 6.12: Carregamento e resposta em Energia de EA para o dia 7 / 5 / 2008. 75
Figura 6.13: Carregamento e resposta em ASL de EA para o dia 7 / 5 / 2008. 75
Figura 6.14: Carregamento e resposta em Duração de EA para o dia 7 / 5 / 2008. 76
Figura 6.15: Carregamento e resposta em Tempo de Subida de EA para o dia 7/5/2008. 76
Figura 6.16: Forma de onda observada clássica de literatura. 77
Figura 6.17: Problema de ruído de fundo na aquisição da forma de onda. 78
Figura 6.18: Problema de saturação na aquisição da forma de onda. 78
Figura 7.1: (a) Amostra que consiste de uma tira fadigada e montada numa caixa metálica, sensores e prendedores magnéticos; (b) montagem dos sensores na amostra. 80
Figura 7.2: (a) Menor seção resistente, 30% da área original; (b) segunda menor seção resistente, 49% da área original; (c) segunda maior seção resistente, 67% da área original; (d) maior seção resistente, 85% da área original. 82
Figura 7.3: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 85% da seção original. 82
Figura 7.4: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 67% de seção remanescente . 83
Figura 7.5: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 49% de seção remanescente. 83
Figura 7.6: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 37% de seção remanescente. 84
Figura 7.7: Resultados dos sensores de EA colocados nas garras da máquina para a amostra que tinha 85% de seção remanescente. 85
Figura 7.8: Comparação entre os sensores R15I-AST e WDI-AST de EA. 85
Figura 7.9: Frequencia Média dos sensores montados no corpo de prova. 86
Figura 7.10: (a) Forma de onda de EA do descolamento para a amostra 1 e o sensor WDI-AST; (b) forma de onda de EA do descolamento para a amostra 2 e o sensor WDI-AST. 88
Figura 7.11: (a) Forma de onda de EA da ruptura para a amostra 1 e o sensor WDI-AST; (b) forma de onda de EA da ruptura para a amostra 2 e o sensor WDI-AST. 88
Figura 7.12: (a) Forma de onda de EA do descolamento para a amostra 1 e o sensor R15I-AST; (b) forma de onda de EA do descolamento para a amostra 2 e o sensor R15I-AST. 89
Figura 7.13: (a) Forma de onda de EA da ruptura para a amostra 1 e o sensor R15I-AST; (b) forma de onda de EA da ruptura para a amostra 2 e o sensor R15I-AST. 89

Figura 7.14: Comparação de Energia calculada pelo Matlab e AEWin para o sensor R15I. 92
Figura 7.15: Comparação de Energia calculada pelo Matlab e AEWin para o sensor WDI. 92
Figura 7.16: Sinais de "Energia Zero" coletados pelo sensor WDI nas amostras 1-4. 93
Figura 7.17: Aumento da área próxima à origem dos eixos x,y das Figuras 7.15 e 7.16. 94
Figura 8.1: Esquema da montagem dos sensores no riser para o teste de fadiga. 96
Figura 8.2: Gráficos de Amplitude de EA x Tempo para as 2 primeiras tiras que romperam. 98
Figura 8.3: Gráficos de Energia de EA x Tempo para as 2 primeiras tiras que romperam. 98
Figura 8.4: Gráficos de Amplitude de EA x Tempo para a terceira tira que rompeu. 99
Figura 8.5: Gráficos de Energia de EA x Tempo para a terceira tira que rompeu. 100
Figura 8.6: Gráficos da Amplitude x Tempo para as rupturas da quarta e quinta tira. 101
Figura 8.7: Gráficos de Energia x Tempo para as rupturas da quarta e quinta tira. 101
Figura 8.8: Duas formas de onda com valores de ASL muito próximos. 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Composição Química das tiras. 52
Tabela 4.2: Propriedades Mecânicas da tira da armadura de tração. 53
Tabela 5.1: Distribuição das Energias PAC em blocos para cada tira entalhada. 62
Tabela 5.2: Resumo dos resultados de EA dos ensaios. 62
Tabela 6.1: Calibração dos sensores do ensaio de EA no primeiro *riser*. 70
Tabela 7.1: Configuração dos sensores 81
Tabela 7.2: Distribuição do número de sinais por amostra testada para o sensor WDI-AST. 87
Tabela 7.3: Distribuição do número de sinais por amostra testada para o sensor R15l-AST. 88
Tabela 7.4: Comparação entre os parâmetros de EA baseados em tempos resultantes do AEWin e os extraídos via Origin para a amostra 1 (85%de seção) e 2 (67%). 90
Tabela 8.1: Comparação do limiar de 45dB com limiar de 60dB para cada um dos parâmetros de EA nas diferentes rupturas 102

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	15
Equação 2	21
Equação 3	25
Equação 4	33
Equação 5	36
Equação 6	36
Equação 7	36
Equação 8	36
Equação 9	40

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D – Analógico / Digital
API – *American Petroleum Institute* – Instituto Americano de Petróleo
ASL – *Average Signal Level* – Nível de Sinal Médio
CONTEC - Comissão de Normas Técnicas Petrobras
COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
DSP - *Digital Signal Processing* – Processamento Digital de Sinais
EA – Emissão Acústica
HDT – *Hit Definition Time* – Tempo de definição de sinal
HLT – *Hit Lockout Time* – Tempo de parada de aquisição de sinal
LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física
MSPS – *Mega Samples Per Second* – Mega amostras por segundo
PAC - *Physical Acoustics Corporation* – Corporação de Acústica Física
PASA – *Physical Acoustics South América* – Acústica Física da América do Sul
PCI- *Peripheral Component Interconnect* – Interconexão de Componentes Periféricos
PDT – *Peak Definition Time* – Tempo de Definição de Pico
PVDF - *Polyvinylidene Fluoride*
RMS – *Root Mean Square – valor eficaz, raiz dos quadrados médios*
TOFD – *Time of Flight Diffraction* – Difração do Tempo de Vôo
UKOOA - *United Kingdom Offshore Operators Association* – Associação de Operadores marítimos do Reino Unido.
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VIV - *Vortex Induced Vibrations* - Vibrações Induzidas por Vórtice.

RESUMO

A exploração de petróleo em águas profundas no Brasil iniciou devido a uma necessidade da indústria petrolífera nacional de oferecer preços competitivos para seus produtos no mercado mundial. Essa exploração se tornou possível e economicamente viável devido ao surgimento de tubos flexíveis de multi-camadas. Esses dutos são empregados corriqueiramente no Brasil e existe uma necessidade de inspeção e avaliação da vida útil dos mesmos de um modo contínuo sem paradas na produção. Dentre as técnicas de ensaios não destrutivos disponíveis para esse tipo de aplicação, a Emissão Acústica (EA) tem grande potencial pois permite o monitoramento da integridade estrutural do riser através da aquisição contínua de sinais sonoros que percorram a estrutura e cheguem até os sensores. Esses sinais podem ser tratados estatisticamente e no futuro podem levar à automatização do processo. Para tanto, é necessário um estudo dos parâmetros de Emissão Acústica para se verificar quais são os mais adequados e quais são as melhores condições para adquirir o sinal com o mínimo de erro e ruído. Neste trabalho, estudou-se a resposta acústica de tiras retiradas de risers frente a ensaios de tração e risers em escala real em carregamentos de tração e fadiga. Os resultados mostram que é possível a detecção de ruptura dos arames em todos esses casos, e que parâmetros de EA como Duração e Contagens e são fortemente influenciados por ruído. Além disso, foi criado um limite de confiança de 200μs para Tempo de Subida e 2ms para Duração de modo que se possa avaliar se o limiar e os parâmetros temporais de aquisição estão adequados.

ABSTRACT

The production of oil in deep waters by the national industry was initiated due to a need to offer competitive prices in the world wide market. This type of enterprise was possible and interesting in the economic point of view mainly due to the development of multi-layered flexible risers. This type of tube is often employed in Brazil and there is a need for an inspection and health monitoring strategy in a continous way without stopping production. Among the non-destructive techniques available for this type of application, the Acoustic Emission technique shows a great potential since it allows the monitoring of structural integrity though continous aquisition of sound waves that run in the structure and arrive at the sensors. These signals may be statistically treated and in the future may also lead to the automation of the process. Thus, a study of the parameters for Acoustic Emission is needed, in order to verify which parameters and acquisition rules are adequate to minimize error and noise. This works presents results from tests where wires taken from risers were load tested and also results from real risers subject to load and fatigue. The results show that it is possible to detect the rupture of the wires in all the above cases, and that parameters such as Duration and Counts are highly influenced by noise. Besides that, a “trust range” was created (200ms for Rise Time and 2ms for Duration) allowing the analyst to evaluate if the threshold and time based aquisition rules are appropriate.

1.0 INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo está a cada dia investindo mais em tecnologias de extração de petróleo, transporte de produtos e manutenção de equipamentos. Isso representa ganhos econômicos, na forma de melhoria de desempenho, e ambientais, na forma de melhoria da segurança dos equipamentos.

No caso da Petrobras, a maior parte da produção do petróleo se encontra no mar, mais precisamente na Bacia de Campos (aproximadamente 82% correspondendo à Bacia de Campos e 65% sendo feita em águas com profundidade maior que 400m). Já que grande parte da matéria prima está no mar, surgiu uma necessidade de exploração em águas profundas, o que levou à utilização de dutos flexíveis, que são compostos de camadas de aços e polímeros. Quando esses tubos fazem a ligação vertical entre a plataforma e o poço, esses dutos são denominados *risers* e estão submetidos a um grande número de esforços e fatores que podem levar ao seu rompimento e falha em serviço. Várias investigações têm sido feitas nessa área (WITZ 1996, OUT 1995, BOGARIN 1996, LEMOS 2005) na tentativa de avaliar esforços, deslocamentos e comportamento dos tubos, tanto através de simulações como por medições práticas em laboratório, onde trechos de *risers* são submetidos a ensaios de tração, torção e fadiga. Existe, portanto, uma grande preocupação com a manutenção das plataformas e de todo equipamento ligado à extração de petróleo do fundo do mar.

Dentre outras áreas de pesquisa, o estudo de métodos não destrutivos que avaliem a integridade de *risers* tem recebido bastante atenção, já que a falha de um componente desse tipo pode acarretar conseqüências drásticas como desastres ecológicos (derramamento de petróleo no mar) e problemas econômicos (quedas de produção), podendo até fazer uma plataforma afundar. Isso se deve à possibilidade de rompimento de um tubo que esteja conduzindo gás ou ar, ocasionando acúmulo de gás abaixo da plataforma, queda na

densidade da água e perda da sustentação da plataforma. É importante, portanto, desenvolver técnicas que permitam a inspeção não intrusiva periódica ou contínua desses dutos sem a necessidade de paradas de produção. Dentre as técnicas de ensaios não destrutivos, a emissão acústica demonstra grande potencialidade.

A Emissão Acústica (EA) é uma tecnologia poderosa em desenvolvimento nas últimas décadas como uma técnica de ensaio não destrutivo para monitoramento de defeitos e crescimentos de trincas em diversos equipamentos: vasos de pressão, sistemas de dutos e reatores, entre outros. Essa técnica se baseia na leitura e análise de uma onda sonora que é emitida quando o material em questão alivia a energia elástica acumulada, por exemplo, na forma de uma trinca. A corrosão no fundo de tanques de óleo também produz sinais acústicos que se propagam pelo óleo líquido até a parede do tanque, onde ela pode ser detectada. Essa técnica se torna, portanto, uma importante ferramenta para a manutenção de linhas de alta pressão e de outros equipamentos de alta segurança, os quais podem causar verdadeiros desastres caso falhem em serviço (VALLEN 2007).

A Emissão Acústica permite o emprego de técnicas de reconhecimento de padrões para associar os resultados acústicos a parâmetros de integridade estrutural. Isso pode gerar uma automatização do processo de monitoração de *risers* flexíveis, o que acaba tornando esse tipo de estudo um atrativo econômico.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Grande parte da produção brasileira de petróleo se encontra no mar e faz uso de componentes e estruturas marinhas como plataformas, amarras, bóias e dutos. Essas estruturas comumente estão submetidas a esforços mecânicos pela movimentação das ondas, corrosão devido à atmosfera marítima e desgaste dos componentes. Desde o início da exploração de gás e petróleo em águas profundas, tubos flexíveis foram considerados a melhor opção para o transporte de fluidos (MARINHO 2007). Esse tipo de tubo é mais fácil de ser instalado, transportado e operado do que tubos rígidos. Uma outra vantagem, é que diferente dos tubos rígidos, os flexíveis podem ser recuperados e reinstalados.

Os primeiros tubos flexíveis foram instalados em 1977, no campo de Garoupa, na Bacia de Campos. Atualmente, aproximadamente 80% da produção brasileira de petróleo e gás é produzida por tubos flexíveis (CARNEVAL 2006). Uma rede aproximada de 5.300km desses dutos conecta as diversas estruturas de produção (bóias, plataformas, etc...) e existem aproximadamente 1200 tubos flexíveis em operação no Brasil.

Devido à grande importância econômica, diversos estudos foram direcionados para a avaliação de *risers*, não somente no Brasil (BOGARIN 1996, LEMOS 2005) mas a nível mundial (WITZ 1996, OUT 1995), à medida que pesquisadores começaram a se preocupar em como inspecionar a qualidade e vida útil dos tubos. Em 1995, Patel apresentou uma revisão de trabalhos (PATEL 1995) que citava diferentes técnicas para a análise estática e dinâmica de *risers*, onde se levava em conta o estudo de forças, deformações e momentos fletores relacionados ao tubo. Algumas dessas técnicas incluem o uso de elementos finitos, análises dinâmicas no domínio tempo e desenvolvimento de programas que utilizam meios analíticos e numéricos para prever o comportamento dos *risers*.

Mais tarde, LYONS (1996) apresentou um trabalho onde um *riser* da plataforma *Emerald Producer* é instrumentado e monitorado através do uso de extensômetros (*strain gages*) e algoritmos tipo *Rainflow*, sendo também montado um sensor de Emissão Acústica. Apesar de ser citado nesse trabalho que a técnica de Emissão Acústica é muito promissora, nenhum resultado é apresentado.

Esse estudo incentivou pesquisadores do mundo inteiro a trabalhar com técnicas não destrutivas, não intrusivas e que possam fazer o monitoramento contínuo dessas estruturas como: análises de vibrações, emprego de fibras óticas e métodos magnéticos para medição de tensão e emissão acústica. Como consequência, surgiu a necessidade de análise desses dados e reconhecimento de padrões. Métodos estatísticos como análise de agrupamentos (GODIN 2004) e redes neurais (DA SILVA 2006) vêm sendo estudados na tentativa de criar um sistema para automatização desse monitoramento.

2.1 Tubos Flexíveis e componentes associados

2.1.1 Tubos flexíveis

Tubos flexíveis são tubos para alta pressão feitos de uma combinação de camadas que os torna deformáveis no dobramento e fortes e rígidos em carregamentos simétricos ao eixo como: pressão, tensão e torção. Isso é possível devido aos elementos selantes, que são cilindros poliméricos flexíveis, e aos elementos suportadores de carga, que são tiras de aço helicoidais dispostas ao redor dos cilindros. Dois tipos genéricos apareceram nas últimas duas décadas: o tubo flexível sem elementos adesivos entre as camadas e o tubo flexível com os reforços de aço ligados a uma matriz elastomérica (OUT 1995).

Tipicamente, um tubo flexível contém as seguintes camadas principais (BOGARIN 1996), mostradas na Figura 2.1:

- uma camada interna feita de aço contra colapso para resistir a pressões externas e efeito de confinamento durante carregamento axial;

- uma camada polimérica a prova de vazamentos ou uma camada compósita de borracha reforçada por fibras;

- camadas de armaduras de tração e pressão com tiras (também chamadas de arames) de aço aplicadas de forma helicóide para resistir cargas axiais e pressão interna;

- uma camada externa plástica impermeável que mantém as armaduras juntas e as protege de corrosão externa, abrasão e dano.

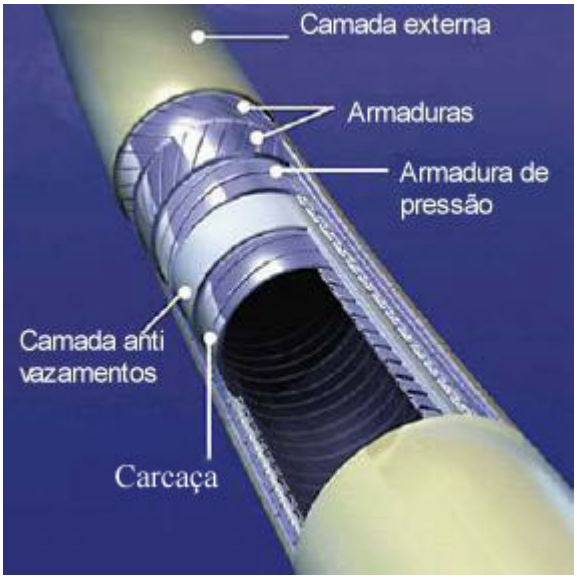

Figura 2.1: Camadas do *riser* (adaptado de TECHNIP 2007).

Os diferentes tipos de tubo são caracterizados pela sua função (Figura 2.2). Existem assim *flowlines*, *risers* flexíveis estáticos e dinâmicos e *jumpers*. As definições de cada tubo flexível de acordo com a norma da Petrobras CONTEC N-2409 (COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS 2004) são as seguintes:

Flowline: tubo flexível deitado no fundo do mar ou enterrado, usado para ligar dois equipamentos submarinos, equipamento submarino a um *riser* flexível ou mesmo para interconectar *risers* flexíveis.

Riser flexível estático: tubo flexível usado para ligar um tubo rígido ou flexível instalado no fundo do mar a uma planta de produção de uma plataforma fixa, acima da

superfície, passando através de um tubo “I” ou de um “J” ou ancorado na superfície da plataforma.

Riser flexível dinâmico: tubo flexível normalmente utilizado para conectar equipamentos submarinos, incluindo tubos, a uma unidade flutuante, a uma plataforma fixa na superfície, a uma unidade fixa ou mesmo duas unidades flutuantes.

Jumper: seção curta de um tubo flexível. Pode precisar de requisitos adicionais de acordo com a sua aplicação.

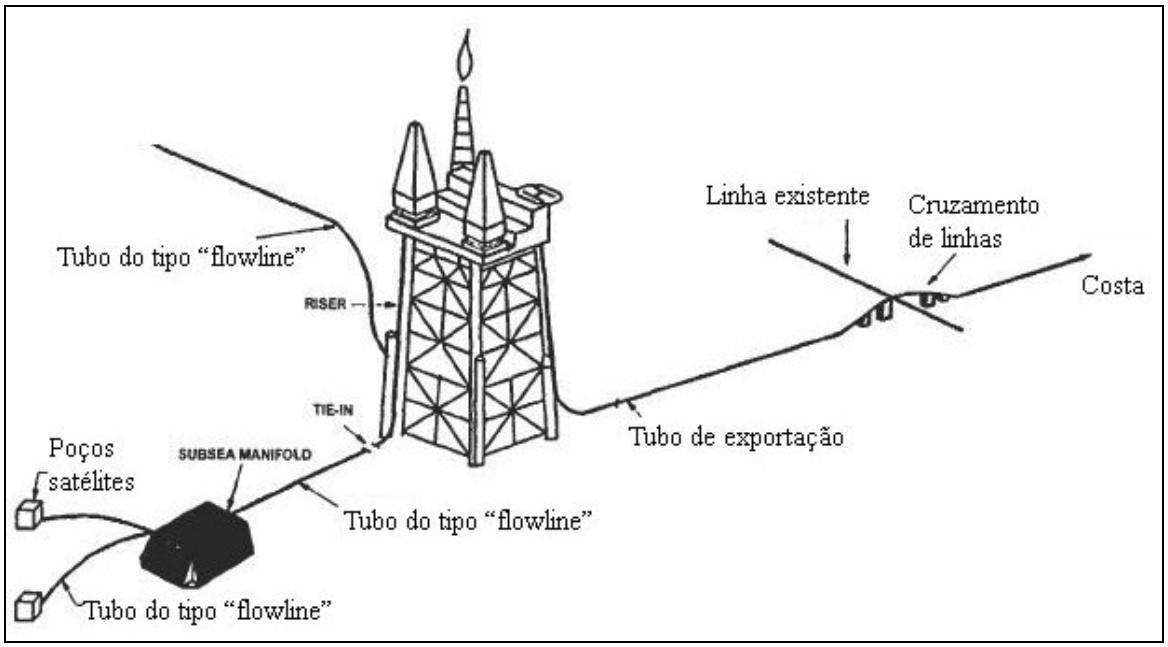

Figura 2.2: Linha de produção de petróleo e designações (adaptado de BAI 2001).

Tubos flexíveis podem ter as camadas aderidas ou não aderidas (LEMOS 2005). Nos tubos de camadas aderidas (*bonded pipes*) não ocorre deslizamento entre as mesmas. As camadas poliméricas são compostas por elastômeros vulcanizados contendo reforços metálicos em seu meio. Nos tubos de camadas não aderidas (*unbonded pipes*) pode ocorrer deslizamento entre as mesmas.

A rugosidade da camada interna também é um critério de classificação (LEMOS 2005). Os tubos nos quais a camada mais interna é formada de tiras intertravadas são chamados de *Rough Bore*. São usados para o transporte de fluidos que possam conter

gases livres ou dissolvidos (como é o caso do óleo produzido) ou em casos onde é necessário um aumento da resistência ao colapso no caso de quedas de pressão internas. Existem também tubos, denominados de *Smooth Bore,* onde a camada mais interna é formada por uma camada plástica, sendo utilizado para transporte de produtos sem a presença de gás, por exemplo, injeção de água. Caso existisse gás no fluido transportado, parte dos gases permearia através da camada polimérica acumulando-se na região anular (entre camadas). Na ocorrência de despressurização rápida no interior do tubo, o gás tenderia a retornar imediatamente para dentro do tubo, causando o colapso da camada interna.

2.1.2 Conectores (*End fittings*)

As terminações de um tubo flexível (Figura 2.3) são conhecidas como conectores (*end fittings),* sendo utilizadas para conectar os tubos a plataformas, tubos e outras estruturas.

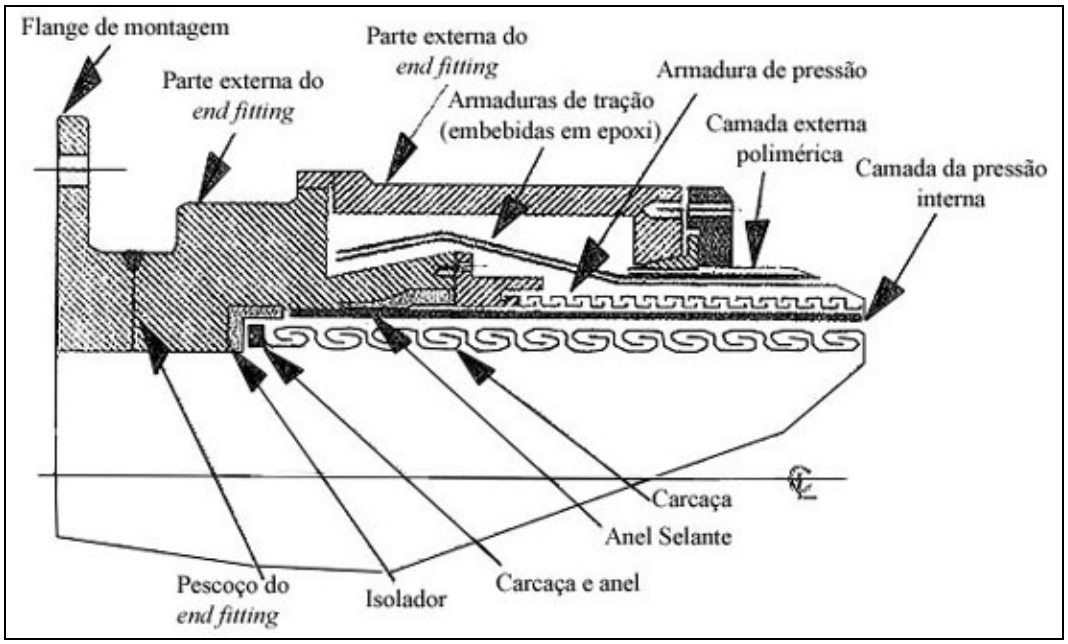

Figura 2.3: Conectores*End fittings* (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE 2002).

Os *conectores* (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE 2002) podem ser construídos durante a manufatura do tubo ou em campo e têm como propósitos principais:

- Terminar todos os elementos de força na construção do tubo de modo que cargas axiais e momentos fletores possam ser transmitidos para o conector sem afetar as camadas contentoras de fluidos;

- Fornecer uma transição de pressão entre o corpo do tubo e o conector.

Essas terminações para os tubos representam concentradores de tensão para fadiga (SAEVIK 1995). Isso ocorre devido à curvatura do tubo que é preso na terminação e à fixação dos vários elementos do tubo flexível em uma estrutura rígida. A fim de estabelecer uma transição menos abrupta, a terminação comumente é envolta por um componente polimérico limitador de movimento chamado de *Bend Stiffner*.

A montagem do conector pode ser vista na Figura 2.4. Uma das pontas do *riser* é descascada até se chegar nas tiras mais externas. As tiras são então dobradas e encaixadas no conector de acordo com um procedimento que muda de acordo com a configuração do conector. Uma vez que as tiras foram presas à terminação, uma resina é vazada de modo a preencher os vazios entre as tiras. Comumente, durante a montagem, as tiras são aquecidas com tochas ou maçaricos para facilitar seu dobramento.

Figura 2.4: Montagem do conector (MARINHO 2006).

Outras estruturas como cabos de multi-camadas (GAILLET 2004) e cabos de ancoragem (HANZAWA 1982) possuem terminações muito parecidas com as dos conectores dos *risers*, onde os arames individuais são deslocados, colocados dentro de

uma terminação, dobrados e o espaço interior é preenchido com resina ou com metal branco.

No Brasil não existe procedimento de montagem de *conectores*. O aquecimento das tiras e os ângulos de dobra não são controlados. Assim sendo, muitas dessas tiras podem ser fragilizadas durante essa etapa, o que pode deteriorar a vida útil do *riser*. Essa fragilização pode ser resultado de: um sobreaquecimento dos arames e formação de estruturas como austenita, de um resfriamento descontrolado que gera martensita não revenida, ou até de um aumento de rugosidade e iniciação de trincas devido ao dobramento dos arames e encruamento do material.

A indústria nacional já demonstrou preocupação com esse tipo de problema e pesquisa de um procedimento de montagem dos conectores nos *risers* já está em desenvolvimento.

2.1.3 Limitadores (*Bend Stiffners/Bend Limiters*)

Esses limitadores normalmente são usados para aplicações dinâmicas mas também podem ser usados para aplicações estáticas (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE 2004). São projetados para resultar em nenhum dobramento do tubo por um comprimento de aproximadamente um diâmetro externo do tubo a partir do conector. Abaixo disso, é permitido que o dobramento cresça gradualmente dentro de certos limites.

Assim, os bend stiffners tem como propósito reduzir as concentrações de tensão globais e locais. Eles também fornecem uma transição de rijeza mais suave, movendo a localização crítica de fadiga para fora da região da terminação (SAEVIK 1995).

2.1.4 Mecanismos de Dano

Na norma CONTEC N-2409 da Petrobras (COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS 2002) são citados vários modos de falha, que é definida como sendo um evento que faz o tubo não atuar como especificado. Os tipos de falha são agrupados de acordo com o lugar onde ocorrem:

Falhas nas Camadas Estruturais:

- Ruptura de tiras da camada estrutural causada por tensão, pressão interna, compressão radial, torção, curvatura ou combinação de alguma dessas cargas;
- Ruptura por fadiga do material constituinte da camada estrutural;
- Deformação excessiva permanente ou temporal da camada causada por cargas;
- Colapso da carcaça ou armadura de pressão causado por pressão externa aplicada em camadas poliméricas mais leves que a água;
- Colapso da carcaça ou armadura de pressão causado por aperto da armadura de tração, associado ou não com qualquer outra carga radialmente compressiva atuando simultaneamente no tubo.
- Formação de "gaiola de pássaro" (*birdcaging*) da armadura de tensão causada por fricção entre duas camadas estruturais;
- Perda de acoplamento entre estruturas de acoplamento causado por dobramento excessivo, torção excessiva ou compressão axial durante instalação ou operação;
- Desgaste excessivo causado por fricção entre duas camadas estruturais;
- Corrosão excessiva, degradação química e/ou biológica, ou abrasão de qualquer camada estrutural causada por fenômeno galvânico, fluidos agressivos ou abrasivos ou por contato do meio ambiente com a camada estrutural;

Falhas na Barreira de Pressão:

- Ruptura causada por pressão interna, tensão, torção, dobramento ou pela combinação de algumas dessas cargas;
- Extrusão excessiva da camada de pressão através de espaços entre arames/tiras da camada estrutural adjacente, causada por efeito da pressão, para os limites de temperatura considerados, incluindo deformações de curta e longa duração;

- Ruptura do material por fadiga;
- Desgaste excessivo causado por fricção com outra camada;
- Dano à camada devido ao rasgamento intermolecular ou interlamelar do material, causado por despressurização de gás difundido no material polimérico da barreira de pressão;
- Degradação química excessiva causada pela ação de fluidos ou ambiente externo;
- Perda de propriedades físicas causada pela temperatura do fluido interno ou ambiente externo;
- Erosão excessiva causada por fluido interno ou abrasão causada por *pigs* (sistemas de inspeção de dutos dotados de sensores);
- Difusão excessiva de gás causada por envelhecimento, fadiga/desgaste, erosão ou empolamento.

Falhas no *End Fitting*:

- Escoamento de qualquer parte estrutural do conector causado por tensão, pressão, dobramento, torção ou combinação dessas cargas;
- Colapso hidrostático da estrutura do conector;
- Ruptura da estrutura do conector por fadiga;
- Corrosão ou degradação excessiva de qualquer parte estrutural do conector causada pela ação do fluido interno ou ambiente externo;
- Perda de propriedades físicas de qualquer parte estrutural do conector induzida pela temperatura do fluido interno ou do ambiente externo (incluindo fragilidade por temperatura ou concentração de tensão residual);
- Perda do sistema de ancoramento das armaduras de tração causada por tensão, pressão, dobramento, torção ou combinação de algumas dessas cargas;

- Deslocamento relativo excessivo entre os cantos das camadas e do corpo do conector;

- Vazamento através do sistema selante (interno ou externo), observado quando tensão, pressão dobramento ou torção são aplicados;

- Dano ao sistema selante (interno ou externo) causado por fadiga;

- Dano à região da barreira de pressão em contato com o conector causado pela ação de tensão, pressão, dobramento, torção ou combinação de algumas dessas cargas;

- Degradação de curta ou longa duração do sistema selante (interno ou externo) ou da resina de enchimento causado por agentes físicos, químicos ou corrosivos e pela temperatura do fluido interno ou ambiente externo.

Falha por Aumento de Peso do Tubo:

- Causado por cera ou depósitos orgânicos;

Existe na norma API 17B (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE 2002) uma tabela onde são relacionados diversos tipos de falhas de tubos flexíveis, divididos pelo modo de falha dos componentes: colapso, estouro, falha por tensão, falha por compressão, excesso de dobramento, falha por torção, falha por fadiga, erosão e corrosão. Na grande maioria dos casos, os modos de falha são os mesmos citados pela CONTEC N-2409 (COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS 2004).

Juntamente com a avaliação dos possíveis tipos de falha, estudos estatísticos são feitos para que sejam verificados quais são os tipos de falhas mais comuns. Geralmente são estudos demorados e de alto custo, já que é necessário esperar que o componente falhe e seja substituído.

Um trabalho feito pela MCS (MCS INTERNATIONAL 2001) para a UKOOA (*United Kingdom Offshore Operators Association*) sobre 106 falhas de tubos flexíveis

revela que a maior parte das falhas (76%) se deram na instalação e não durante a operação dos mesmos (24%). Os cinco tipos mais comuns de falha encontrados foram:

1 - Camada externa danificada

A maior parte desse tipo de dano (Figura 2.5) ocorre durante a instalação, e pode fazer a armadura do *riser* ser exposta à corrosão-fadiga, reduzindo drasticamente a vida útil do *riser* de 20 para 2 anos.

Figura 2.5: Dano à camada polimérica externa (MARINHO 2006).

2 - Degradação da camada interna

Os dados estatísticos mostraram que geralmente esse tipo de falha ocorre dentro dos primeiros 4 anos, e que parece ser um problema de projeto. É sugerido que o *riser* pode estar operando fora das especificações de carga.

3 - Falha do PVDF e *End Fitting*

Comparado com outros termoplásticos, o PVDF (P*olyvinylidene Fluoride*) tem um alto coeficiente de expansão térmica. Assim, ciclos de expansão e contração da camada interna causados por ciclos de temperatura (parada da produção seguida por reinício) resultam em arrancamento da camada interna do *end fitting*. Esse problema é agravado pelo encolhimento do PVDF devido à perdas de plastificante perto da ligação do *end fitting*.

4 - Desordem dos arames da armadura ou formação de “Gaiolas de Pássaro” (*Birdcaging*)

A desordem dos arames é um modo de falha significativo e parece ocorrer quando o tubo é limitado em um raio estreito. Essa desordem tende a ser local e não em todo o comprimento do *riser*. Exemplos incluem cintas para erguer *risers* ou restrição por uma estrutura de ancoragem. Se grandes espaços ocorrerem entre os arames, a camada da armadura de pressão fica desprotegida, podendo resultar em pequenos vazamentos ou até em falhas catastróficas.

5 - Canais de ventilação bloqueados

Há um grande número de casos em que a falha do tubo ocorreu devido ao bloqueio das saídas de ventilação. Gases permeiam para dentro do tubo e a pressão sobe consideravelmente. Eventualmente as armaduras do tubo estouram a camada externa catastroficamente ou fazem a camada interna colapsar.

Trabalhos feitos pela indústria petrolífera brasileira revelam que muitas falhas tiveram origens em comum com as citadas anteriormente. As principais causas de falhas (CARNEVAL 2006) são: ruptura de arames de tração causada por fadiga na interface tubo/conector, degradação da camada interna selante, deslocamentos dentro do conector, corrosão da armadura e da carcaça e instabilidade torcional. O rompimento das armaduras por fadiga (Figura 2.6) também é citado por MARINHO (2006 e 2007), que acrescenta que esse processo pode ser acelerado por corrosão.

Figura 2.6: Arames da armadura de tração rompidos (MARINHO 2006).

2.1.5 Fadiga de *risers*

A fadiga é um fenômeno de falha bastante complexo e extenso. Nessa revisão são citados apenas alguns elementos básicos para familiarizar o leitor e permitir o seu entendimento dos trabalhos apresentados. Maiores detalhes sobre fadiga podem ser encontrados na literatura (SURESH 1998, HEARN 1997)

A fadiga é uma forma de falha catastrófica que ocorre em estruturas submetidas a esforços cíclicos. Nessas circunstâncias, é possível que a estrutura falhe em uma tensão consideravelmente menor do que a sua tensão de resistência (CALLISTER 2000). A tensão aplicada, flutuante, pode ser axial, flexural ou torcional.

Uma vez que a fadiga depende de esforços flutuantes, a faixa de carregamento será definida por uma tensão máxima (σ_{max}) e uma tensão mínima (σ_{min}). A tensão média (σ_m)é obtida somando-se a tensão máxima e a mínima e dividindo-se por dois. A razão de tensões (R) é definida por:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \qquad \text{Equação 1}$$

Componentes como tubos, *risers*, soldas e outros ligados a tubos de transporte de petróleo, devem ter a sua vida em fadiga levada em consideração, já que esta é um fator determinante para a vida útil dos mesmos (BAI 2001). A terminação superior onde o *riser* encontra a plataforma foi identificada como sendo a área onde ocorre o maior carregamento do *riser* (SAEVIK 1995). Já que essa região pode ser limitadora em relação à vida em fadiga do tubo, uma solução é a utilização de *bend stiffners*.

Carregamentos cíclicos que podem causar fadiga incluem: vibrações induzidas por vórtice (*vortex induced vibrations – VIV*), cargas hidrodinâmicas induzidas por ondas, movimentos da plataforma e cargas resultantes de pressões cíclicas e expansão térmica. A vida em fadiga do componente é definida como o tempo que ele leva para desenvolver uma trinca que atravesse sua parede (BAI 2001).

As cargas hidrodinâmicas induzidas por ondas consistem do aparecimento de tensões resultantes do choque de ondas contra os risers. Bai (BAI 200)1 sugere que se faça um mapeamento da altura, direção e distribuição das ondas, de modo a identificar qual o estado do mar que causa a maior contribuição para fadiga. Os movimentos da plataforma causam fadiga de baixo ciclo e um estudo de posição e deslocamentos da plataforma deve ser feito para a predição da vida em fadiga dos *risers*.

Vibrações induzidas por vórtice (BAI 2001) são, provavelmente, o problema de projeto mais importante para *risers* metálicos catenários, especialmente quando grandes correntes marítimas estão envolvidas. Vibrações de alta freqüência do *riser* devido à formação de vórtices resultam em carregamentos cíclicos de alta freqüência e em altas taxas de dano por fadiga.

SAEVIK (1995) fez ensaios de fadiga em dois risers de 4 polegadas de diâmetro e descreve que após um determinado número de ciclos, o riser começou a deformar e a torcer. A torção é resultado do rompimento de diversos arames da camada de tração o que acaba redistribuindo o campo de tensões. Ao abrir os corpos de prova, o autor observou desgaste de algumas regiões das camadas internas devido ao roçamento (*fretting*) dos arames. Foram encontrados também resíduos de óxido de ferro.

2.2 Emissão Acústica (EA)

A emissão acústica é um fenômeno natural que ocorre em uma grande faixa de materiais, estruturas e processos (ASM 1989). As emissões acústicas de maior escala são eventos sísmicos, enquanto que as menores são movimentos de poucas discordâncias em materiais deformados. Dentro dessa faixa, encontramos muitos outros eventos como: emissões acústicas devido à corrosão de fundo de tanques, descargas elétricas, trincas crescendo em vidros, deformação plásticas de metais, ruído de areia sendo jogada pelo vento em uma estrutura e peças soltas. O fenômeno da emissão acústica é basicamente uma transformação de energia, que pode ser química, mecânica ou elétrica, em ondas mecânicas (energia sonora). A partir desse fenômeno, surgiu a técnica não destrutiva denominada Ensaio de Emissão Acústica.

A inspeção através de EA é a análise dos sinais sonoros na faixa de ultra-som, em torno de 100 a 300kHz (PUMAREGA 2002), que são capturadas por transdutores, convertidos em sinal elétrico e armazenados. O sinal captado é processado e através da analise de alguns parâmetros relacionados a esses sinais é possível fazer uma triangulação, definir a localização da fonte e até diferenciar fontes. A triangulação é baseada na diferença de tempo de chegada do sinal sonoro em dois ou mais sensores (Figura 2.7).

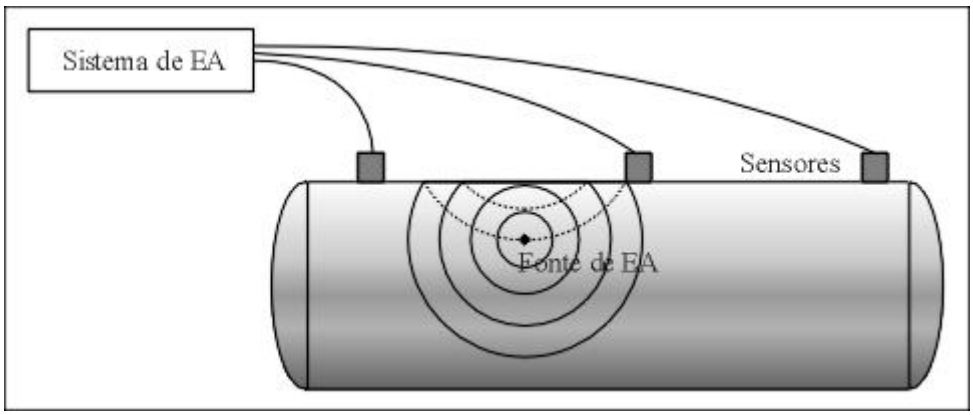

Figura 2.7: Emissão acústica em um vaso de pressão cilíndrico.

Se houver apenas um sensor, o método mais comum é localizar a fonte através da movimentação do sensor. O sinal sonoro fica mais forte à medida que o sensor se aproxima da fonte, já que a onda sofre menos efeitos de atenuação, como será visto mais adiante. No entanto, o arraste do sensor na amostra gera energia friccional e resultará em ruído. Esse método pode ser utilizado quando existe um sinal acústico contínuo, não sendo indicado para situações onde ocorrem eventos acústicos singulares.

A diferenciação de fontes é baseada no fato de que a resposta sonora de um material depende da sua microestrutura e modo de deformação, entre outros fatores, e portanto pode-se esperar uma grande variedade de resposta de EA (ASM 1989). Materiais frágeis e heterogeneidades são fatores que levam a uma alta emissividade, picos bem definidos e de alta amplitude. Mecanismos de deformação dúcteis, como

coalescimento de microcavidades em metais macios, estão associados à baixa emissividade, picos mais dispersos e de baixa amplitude.

Ao contrário de outras técnicas de inspeção, a emissão acústica requer que o material testado libere energia na forma de uma onda sonora, e isso normalmente significa que o material deve ser carregado mecanicamente. A Emissão Acústica (SOARES 2008) é um fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas pela rápida liberação de energia mecânica a partir de fontes localizadas em um material ensaiado. Isso ocorre porque qualquer material sólido que é deformado, ou que está submetido a uma força externa, possui uma energia elástica relacionada a esse efeito externo (essa energia também pode estar relacionada a outras fontes como calor, por exemplo). Quanto maior a força, ou a deformação, maior a energia armazenada no material. Se o limite elástico do material é excedido, o material pode se deformar plasticamente ou pode trincar, liberando essa energia na forma de uma onda sonora (conhecida como Evento Acústico) que irá percorrer o material. Durante a deformação plástica, discordâncias se movem através da rede cristalina do material e esses movimentos também produzem emissões acústicas que podem ser medidas em laboratório (VALLEN 2007). Conclui-se, assim, que a EA é uma técnica passiva e receptiva, diferente da técnica de ultra-som, por exemplo, onde é medida a resposta do material a uma excitação acústica artificial e repetitiva.

Apesar de grande parte dos trabalhos em EA se focarem em equipamentos industriais como vasos de pressão e reatores, a técnica de emissão acústica já foi utilizada com sucesso em diferentes aplicações. Na área de medição de aderência de revestimentos via teste de riscamento (*scratch test)*, GALLEGO (2005) utilizou *wavelets* para analisar o sinal de EA proveniente de um aço galvanizado. PIOTRKOWSKI (2005) fez um trabalho semelhante; porém, comparando a adesão de revestimentos de TiN e CrN. A avaliação de propriedades mecânicas via EA é outra área que já produziu muitos trabalhos com temas completamente distintos. Dentre eles, podemos citar um estudo de fadiga em blocos de água do mar congelada (LANGHORNE 1996), medidas de resistência a fratura de compósitos de fibra de vidro e polipropileno (BENEVOLENSKI 2003), monitoramento

de defeitos durante secagem de madeira (KAWAMOTO 2008) e avaliação de corrosão sob tensão de cabos em solução porosa de concreto simulada (RAMADAN 2008).

2.2.1 Fontes de Emissão Acústica

Pensando em uma escala mais geral, na qual o estudo da emissão acústica implica em analisar qualquer emissão sonora, então deveriam ser citadas fontes como: a passagem de ar por orifícios (voz, sons animais e "pedras que assobiam"), a geração de ondas sonoras devido à transferência de energia cinética de pedras que caem, carros que passam, arcos elétricos e até mesmo a chuva. No entanto, para a maioria dos estudiosos da técnica de emissão acústica, os fenômenos citados acima são normalmente considerados ruídos a serem evitados, já que podem dificultar o estudo do componente em questão. Isso ocorre porque o grande foco da técnica de emissão acústica é a manutenção de equipamentos, estudos de vida útil de estruturas e prevenção de desastres geológicos. Na prática, cada pesquisador acaba definindo no seu estudo quais são as fontes de emissão acústica de interesse e o que será considerado ruído.

A Emissão Acústica pode ser gerada pelo vazamento de líquidos em vasos de pressão (MOORTHY 1995). Mas no caso de pequenos vazamentos que não gerem um fluxo turbulento, pode não haver emissão acústica (MILLER 1999) ou a emissão acústica será de amplitude muito baixa (VALLEN 2007). Emissões significativas ocorrerão quando ocorrer um vazamento de grande porte, ou um fluxo turbulento, que pode ser agravado pela presença de bolhas e/ou partículas(VALLEN 2007, MILLER 1999).

Fenômenos que envolvem deformação como escoamento (MOORTHY 1995), maclagem (VALLEN 2007) e crescimento de trincas (PUMAREGA 2002, VALLEN 2007) também geram emissão acústica. Apesar de a maior parte dos trabalhos envolver o estudo de EA em componentes metálicos, emissão acústica pode ser gerada pelo crescimento de trincas em madeira (LANDIS 2000), em concreto (LANDIS 2002), na água do mar congelada (LANGHORNE 1996) e em vários outros materiais. O aparecimento de trincas em revestimentos e descolamento entre o substrato e filmes protetores (PIOTRKOWSKI 2004) também gera emissão acústica.

Pumarega (PUMAREGA 2002) afirma que possivelmente existem apenas dois mecanismos importantes como fontes de sinais de EA em metais: criação e propagação de discordâncias e criação de novas superfícies por trincas ou decoesão de inclusões.

Na área específica de materiais ferrosos, verifica-se que a emissão acústica também pode ser gerada pela súbita magnetização de materiais (RUIZ 2005). A Emissão Magneto-Acústica (SANCHEZ 2004) consiste na geração de ondas elásticas devido às rápidas e descontínuas mudanças na magnetização do material, que induzem deformações locais (magnetoestricção).

A corrosão em fundos de tanques (VALLEN 2007) também pode gerar emissão acústica. Isso ocorre tanto pelo desprendimento de bolhas de gás como pelo descolamento de filmes e partículas aderidas ao substrato.

No que se refere a materiais compósitos fontes de emissão acústica comuns são o destaque de junções coladas (VALLEN 2007), quebra de fibras (DRUMMOND 2007, VALLEN 2007), e abrasão/fricção entre elementos de cabos (CASEY 1985, DRUMMOND 2007).

RUZZANTE (1998) divide as fontes de emissão acústica em dois grupos, o primeiro envolve apenas os fenômenos microestruturais e o segundo todos os fenômenos que não estão relacionados com a microestrutura do material (Figura 2.8).

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

Figura 2.8: Classificação de fontes de EA segundo Ruzzante (RUZZANTE 1998).

2.2.2 Propagação de Ondas

Quando um átomo ou molécula é deslocado da sua posição de equilíbrio por uma força, tensões internas agem de modo a restaurar as partículas à suas posições originais. Devido às forças interatômicas entre partículas adjacentes de material, o deslocamento de um ponto induz deslocamentos nos pontos vizinhos, propagando assim uma onda elástica (ASM 1989). A amplitude, modo de vibração e velocidade das ondas diferem em sólidos, líquidos e gases justamente devido às diferenças na distância média entre as partículas em cada um desses casos. Assim, ondas terão uma maior velocidade em sólidos e menor em gases.

Existe uma relação entre a velocidade da onda em um sólido, o seu comprimento de onda e a frequência da onda. Como na maioria dos casos a velocidade da onda no material não varia, frequências maiores geram comprimentos de onda menores, e frequências menores estão associadas a comprimentos de onda maiores, de acordo com a equação seguinte:

$$V = \lambda \times f \qquad \text{Equação 2}$$

onde V é velocidade (m/s), f é a freqüência (Hz) e λ é o comprimento de onda (m).

Ondas Longitudinais

Também conhecidas como ondas de compressão, as ondas longitudinais se deslocam no material como uma série de compressões e rarefações nas quais as partículas que transmitem a onda vibram na mesma direção de deslocamento da onda (Figura 2.9).

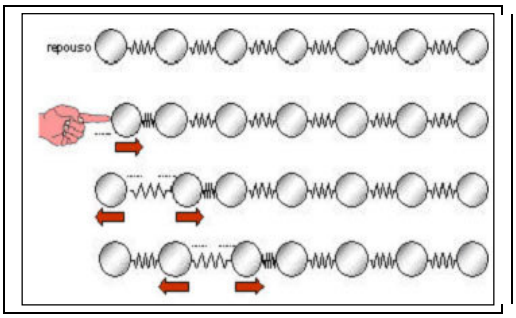

Figura 2.9: Ondas longitudinais (ANDREUCCI 2008).

Esse tipo de onda é capaz de se propagar em sólidos, líquidos e gases, o que é importante para a técnica de EA em situações em que a fonte está longe do transdutor e o sinal deve passar por um meio líquido, como é o caso de fundos de tanques. Dentre os tipos de onda, as ondas longitudinais são as mais velozes.

Ondas Transversais

Podem ser imaginadas como se fossem vibrações de uma corda que é movida ritmicamente, sendo que cada partícula vibra numa direção perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 2.10), diferentemente do que acontece nas ondas longitudinais.

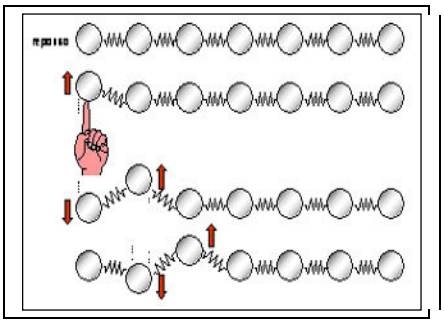

Figura 2.10: Ondas transversais (ANDREUCCI 2008).

Esse tipo de onda não se propaga em líquidos e gases, e a sua velocidade é tipicamente 50-60% da velocidade das longitudinais.

Ondas Superficiais (Ondas de Rayleigh)

São ondas que viajam em interfaces ligadas, por um lado por forças elásticas fortes de um sólido e por outro por forças elásticas negligenciáveis entre moléculas de gás, como ocorre na maioria dos casos em superfícies de sólidos maciços.

A velocidade desse tipo de onda é aproximadamente 90% da velocidade de uma onda transversal no mesmo material.

Ondas de Lamb

São ondas que percorrem chapas muito finas de material, tipicamente na ordem de alguns comprimentos de onda. Consistem de uma vibração complexa que ocorre na

espessura do material e suas características de propagação dependem de fatores como densidade, propriedades elásticas e estrutura do material, espessura da amostra teste e frequência.

2.2.3 Atenuação do Sinal de Emissão Acústica

A amplitude medida pelo sensor de emissão acústica depende da verdadeira atenuação da onda sonora que perde energia para o material e também das dispersões que a onda sonora sofre à medida que interage com inclusões e contornos de grão. Como as ondas dispersas por fenômenos como reflexão, refração e difração acabam não chegando no sensor, considera-se que a dispersão é um caso de atenuação do sinal.

Denomina-se atenuação geométrica o caso em que se considera que o material é perfeitamente homogêneo e que não há perdas de energia. A onda acústica , que possui o formato esférico (SOARES 2008), terá um aumento na sua frente de onda à medida que ela percorre o material. Para conservar a energia, é necessário diminuir a amplitude da onda. Uma analogia é feita na Figura 2.11, onde observa-se que para manter a mesma área da casca cilíndrica, à medida que se aumenta o raio, é necessário diminuir a altura da casca.

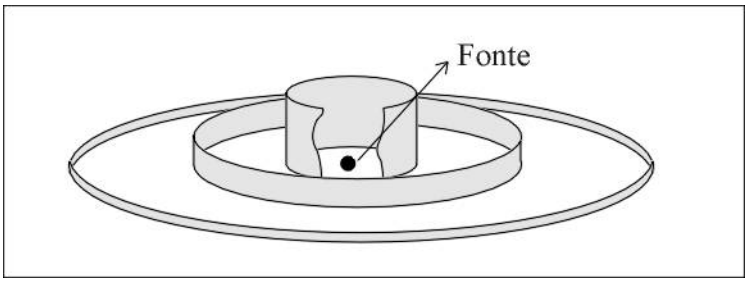

Figura 2.11: Analogia à atenuação geométrica.

A atenuação por dispersão é um dos resultados da interação da onda sonora com materiais que são policristalinos e/ou possuem defeitos como inclusões e poros. Quando uma onda sonora encontra um obstáculo de tamanho (D) muito próximo ou menor do que o seu comprimento de onda (λ), a frente de onda que se movia em determinada direção pode ser dispersa em um maior número de direções. BLITZ (1996) cita que quando $\lambda \geq$

D/10, ocorre um caso especial onde a dispersão ocorre em todas as direções, chamado de Dispersão Rayleigh. Essa dispersão é muito importante para o caso de técnicas como o ultra-som, onde a diminuição da frequência da onda (e consequente aumento do comprimento de onda) através da seleção correta do transdutor pode reduzir consideravelmente a atenuação do feixe sônico.

A dispersão também pode ocorrer por fenômenos de reflexão/refração. Uma onda sonora ao mudar de meio, por exemplo ao sair de uma inclusão e entrar em um grão, será dividida em duas, uma onda refletida e uma onda refratada. A quantidade de energia refletida e refratada dependerá basicamente da diferença de impedância acústica entre os dois meios, sendo que quando maior for a diferença, maior a quantidade de energia refletida. No caso da onda refratada, o novo ângulo da onda dependerá das diferenças de velocidade entre os meios, de acordo com a Lei de Snell (CHEEKE 2002). Em alguns casos ainda, uma onda longitudinal pode atingir uma superfície e se dividir em uma onda transversal e uma longitudinal.

BLITZ (1996) menciona também, três casos de atenuação onde existem perdas energéticas para o material. O primeiro caso é a absorção em metais policristalinos devido à fricção entre os contornos de grão, fazendo com que a energia sonora seja convertida em calor. Essa atenuação aumenta em proporção direta com a frequência. O segundo caso é quando ocorre a presença de defeitos como discordâncias ou vacâncias de átomos, onde o material captura a energia sonora para eliminar os defeitos. O terceiro caso ocorre em metais ferromagnéticos e em algumas substâncias ferrimagnéticas. A energia sonora que passa por esses materiais pode ser parcialmente convertida em energia magnética durante o meio ciclo positivo e de volta para energia sonora durante o meio ciclo negativo.

GRAYELI (1979) em seu trabalho utiliza a atenuação acústica para diferenciar um aço martensítico de um perlítico, ambos com a mesma composição química. Ele argumenta que a atenuação é dependente da microestrutura do material e da frequência, já que a onda sonora é afetada pela dispersão nos contornos de grão e nas partículas de segunda fase, e através do levantamento de curvas de atenuação acústica por frequência, é possível se fazer essa diferenciação.

O efeito da atenuação na intensidade das ondas sonoras pode ser visto na Equação 3, onde se observa que a atenuação tem a forma de uma exponencial negativa (GOMEZ 2005):

$$A = A_0 e^{(-\alpha x)} \qquad \text{Equação 3}$$

onde: A_0(dB) é a amplitude na origem, α é a atenuação por unidade de comprimento (dB/cm) e x é o comprimento (cm).

GOMEZ (2005) fez medições de atenuação em Zircaloy-4 e verificou diferenças nas curvas de atenuação por frequência em diferentes microestruturas do material estudado, de maneira similar ao trabalho de GRAYELI (1979).

2.2.4 Detecção e Equipamento de Emissão Acústica

A detecção e aquisição do sinal de emissão acústica envolvem uma série de componentes e procedimentos. Tipicamente, sensores piezoelétricos são presos ao componente que vai ser monitorado, utilizado-se um acoplante entre o sensor e o componente. Os sensores, por sua vez, são ligados a pré-amplificadores, que são ligados a um sistema conversor analógico digital de aquisição de dados. É estabelecido um limiar de aquisição, que basicamente irá definir o que é ruído e quais são os sinais acústicos de interesse. São descartados os sinais que possuam uma amplitude menor do que a amplitude selecionada como limiar, enquanto que sinais com amplitude maior são adquiridos e armazenados na forma de banco de dados.

Acoplante

O uso de um agente acoplante é crucial para a qualidade do acoplamento entre o sensor e a amostra, porque normalmente existe uma fina camada de ar entre as duas superfícies devido à rugosidade dos componentes analisados. A impedância acústica do ar é 5 ordens de magnitude menor do que a impedância da superfície de medição e do sensor de EA, permitindo uma pequena transferência de energia acústica nas frequências típicas de emissão acústica (THEOBALD 2008). O uso de um acoplante produz uma melhora na transmissão das ondas acústicas da ordem de 2 vezes para 100kHz e mais de

10 vezes para 500kHz. Um acoplante típico na forma de gel tem uma impedância acústica 4 vezes maior do que a do ar.

Normalmente são usadas graxas com base em silicone, óleo ou cola, e a camada de acoplante deve ser a mais fina possível. Isso se faz colocando um pouco de acoplante no sensor e pressionando ele firmemente contra a amostra.

O acoplante não deve reagir de qualquer maneira com a amostra (corrosão) e deve ser adequado para a temperatura do teste, já que alguns acoplantes se tornam frágeis a temperaturas relativamente baixas e podem trincar se o sensor se mover, gerando um falso sinal de emissão acústica.

Sensores para Emissão Acústica

Os sensores para o monitoramento de vida útil de estruturas devem ser de fácil instalação e de detecção sensível da degradação da estrutura. Esses sensores normalmente trabalham em uma faixa de 100kHz até 1MHz (OZEVIN 2006). A maior parte das aplicações envolve o monitoramento de frequências de 100 a 300kHz, sendo que é comum a utilização de sensores capazes de trabalhar com 25kHz para o monitoramento de corrosão em fundo de tanques (VALLEN 2007).

Para satisfazer essas exigências, existem no mercado diferentes modelos de sensores (sensores de contato e não contato), com tamanhos variados e baseados em uma grande gama de fenômenos diferentes. Abaixo são citados alguns deles.

Um modelo de sensor eletromagnético é descrito por HUTCHINS (1986) e consiste de uma bobina montada em um magneto permanente. Um campo magnético é aplicado na superfície da amostra e o movimento do material devido à passagem de uma onda sonora gera uma corrente parasita dentro da amostra. Uma segunda corrente é então induzida na bobina do sensor posicionado próximo a superfície.

Sensores capacitivos (ALLIN 2003, OZEVIN 2006) são sensores que possuem duas placas metálicas paralelas com um pequeno espaço cheio de ar entre elas que se comporta como um capacitor. A placa traseira é fixa, mas a dianteira se desloca devido a

variações de pressão. As duas placas (eletrodos) são ligadas a uma voltagem de referência (*bias voltage*) e o movimento dessas placas gera uma corrente variante com o tempo. Esses sensores são usados quando a aplicação demanda que não ocorra contato entre a peça e o sensor.

Alguns sensores óticos são baseados em interferômetros laser (KLINE 1978). Nesse caso, um laser é divido por uma série de espelhos e divisores e colimado mais tarde no ponto de medição. À medida que a superfície onde o laser está incidindo se move, ocorrem mudanças no padrão de franjas geradas pelo laser. A vantagem desse método é a capacidade de medir deslocamentos pontuais. No entanto, existem dificuldades já que é necessário fazer compensações quando há vibrações indesejadas ou deslocamentos superficiais muito grandes.

Os sensores mais frequentemente utilizados em emissão acústica são os piezoelétricos (THEOBALD 2005, OZEVIN 2006, RUZZANTE 1998). A Figura 2.12 apresenta o esquema de um sensor piezoelétrico típico.

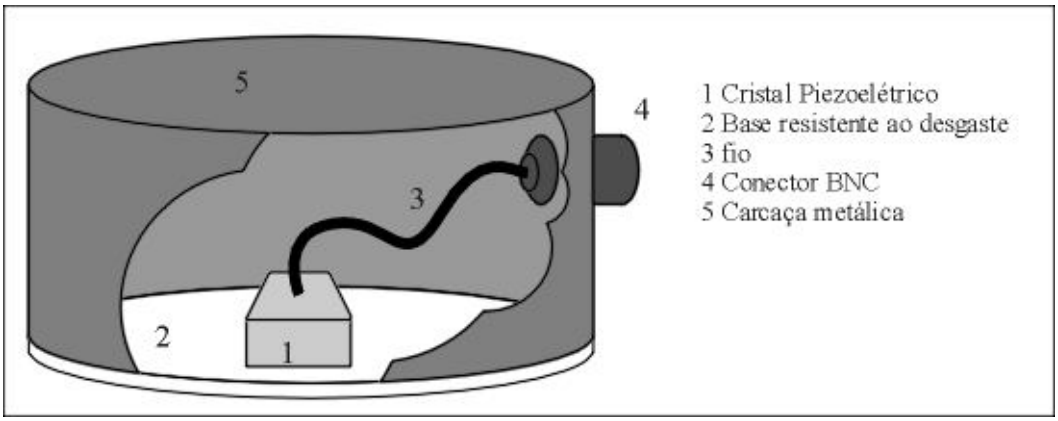

Figura 2.12: Esquema de um sensor piezoelétrico típico

O material piezoelétrico é montado entre duas placas metálicas que suportam a tensão e atuam como eletrodos. Se nenhuma tensão é aplicada, então as cargas positivas e negativas têm o mesmo centro de gravidade (CHEEKE 2002) e não existe nenhum momento de dipolo molecular (polarização zero). No momento em que uma tensão é aplicada, ocorre uma distribuição não simétrica das cargas, o que faz com que os centros de gravidade não coincidam e seja gerado um momento de dipolo. Isso causa um

acúmulo de carga nos eletrodos e a uma diferença de potencial entre eles. Assim, a passagem de uma onda sonora na superfície do material, gera uma diferença de potencial no sensor piezoelétrico que é transferida para um sistema de aquisição.

Os sensores piezoelétricos podem ser encontrados na forma de transdutores ressonantes ou de banda larga. Os sensores de banda larga respondem a uma faixa larga de frequências, mas em geral possuem uma menor sensibilidade do que os ressonantes. Os ressonantes possuem uma maior sensibilidade, mas detectam apenas uma faixa bem restrita de frequências geralmente no entorno da máxima reposta nominal do sensor. Sensores de banda larga típicos respondem a uma faixa de frequência de 100kHz a 500kHz. Um dos sensores ressonantes mais utilizados é o que tem a maior resposta em amplitude na frequência de 150kHz. Em geral, os fabricantes dos sensores fornecem junto com o sensor uma curva de calibração do sensor.

Muitas vezes esses sensores possuem pré-amplificadores embutidos. Isso é feito porque há uma distância máxima aceitável entre o pré-amplificador e o sensor de EA, de modo que se tenha uma boa relação sinal/ruído e também por questões de praticidade.

A fixação dos sensores é um fator importante porque na maioria dos casos o sensor não deve tremer e nem se deslocar. Métodos comuns de fixação de sensores incluem o uso de prendedores magnéticos, fitas elásticas, fixadores com parafusos e molas, abraçadeiras ou até mesmo cola, de modo a garantir que uma força constante está prendendo o sensor na amostra. Em algumas aplicações é utilizada uma guia de onda, que é presa através de colagem ou soldagem no corpo de prova, para conduzir as ondas sonoras do componente estudado até o sensor. Esse tipo de situação pode ocorrer quando o componente está em uma área perigosa, quando há temperatura elevada envolvida no processo ou dificuldade de acesso.

Pré-amplificadores e filtros de frequência

Os pré-amplificadores são utilizados para amplificar o sinal fornecendo um ganho típico de 100x (40dB) e deixando assim o sinal menos suscetível a ruído dos cabos. É necessário ligar um pré-amplificador (ordem de 40dB) a uma distância de no máximo até 40cm do sensor a fim de evitar atenuações decorrentes do cabo de transmissão, uma vez

que os cabos que ligam os sensores ao equipamento podem ter mais de 100m. A energia $28V_{DC}$ para o pré-amplificador é alimentada através do cabo do sinal (VALLEN 2007). Algumas vezes, os pré-amplificadores são montados dentro dos sensores para eliminar interferência magnética (ASM 1989). Esse é o caso dos dois sensores que foram utilizados neste trabalho, os sensores da empresa *Physical Acoustics Corporation* - PAC com os nomes R15I–AST e WDI–AST, onde o código I significa que existe um pré-amplificador embutido no sensor.

Um pré-amplificador normalmente inclui filtros passa-alta ou passa-faixa para eliminar ruídos de baixa frequência A faixa de passagem mais comum é de 100 a 300kHz, incluindo 150kHz que é a frequência ressonante mais comum para sensores. Para frequências menores, existem problemas devido ao ruído de fundo de origem mecânica. Para frequências maiores, a onda se atenua rapidamente e a faixa de detecção do sensor é menor.

Os pré-amplificadores inevitavelmente geram ruído eletrônico e é esse ruído que ajusta o limite do menor movimento detectável do equipamento de EA. O menor sinal que pode ser detectado é de aproximadamente 10μV na saída do sensor, correspondendo a um deslocamento de superfície de 25pm para sensores de alta sensibilidade (ASM 1989). Isso é mais do que o necessário para a maior parte das aplicações da técnica.

Detecção do sinal e parametrização

Após ter sido percebido pelo sensor e amplificado, o sinal chega ao instrumento principal onde é novamente amplificado e filtrado. Isso é feito através de circuitos comparadores que geram uma saída digital cada vez que o sinal de EA excede uma voltagem selecionada como limiar.

Uma das maneiras mais antigas e simples de quantificar a atividade de EA é contar a quantidade de cruzamentos de limiar para cada sinal gerado pelo comparador. Esse parâmetro é denominado de Contagens. As contagens de EA são colocadas em gráficos em função do tempo ou da carga e até o início da década de 1970, este era um dos principais parâmetros analisados (ASM 1989)

O desenvolvimento da tecnologia de EA coincidiu com um aprimoramento dos sistemas de *hardware* (placas de aquisição) e o surgimento de computadores com melhor capacidade de processamento. Nessa época, surgiu o interesse na localização de fontes e na medição de outros parâmetros de EA relacionados aos sinais adquiridos (ver seção 2.2.2). Surgiu assim um novo princípio na instrumentação de EA que envolve a medição de parâmetros chave de cada sinal que passe o limiar. Uma descrição digital é gerada pelo *hardware* e é passada, em seqüência com outras definições do sinal, para o sistema do computador, onde é feito o armazenamento na forma de bancos de dados.

Sistema DiSP da PAC

O sistema DiSP é o nome dado ao equipamento da PAC devido ao uso de placas PCI-DSP (*Peripheral Component Interconnect - Digital Signal Processing*). A placa PCI-DSP é um sistema de 4 canais de aquisição de dados de EA, baseada no processamento digital de sinais montado em uma placa PCI (Figura 2.13).

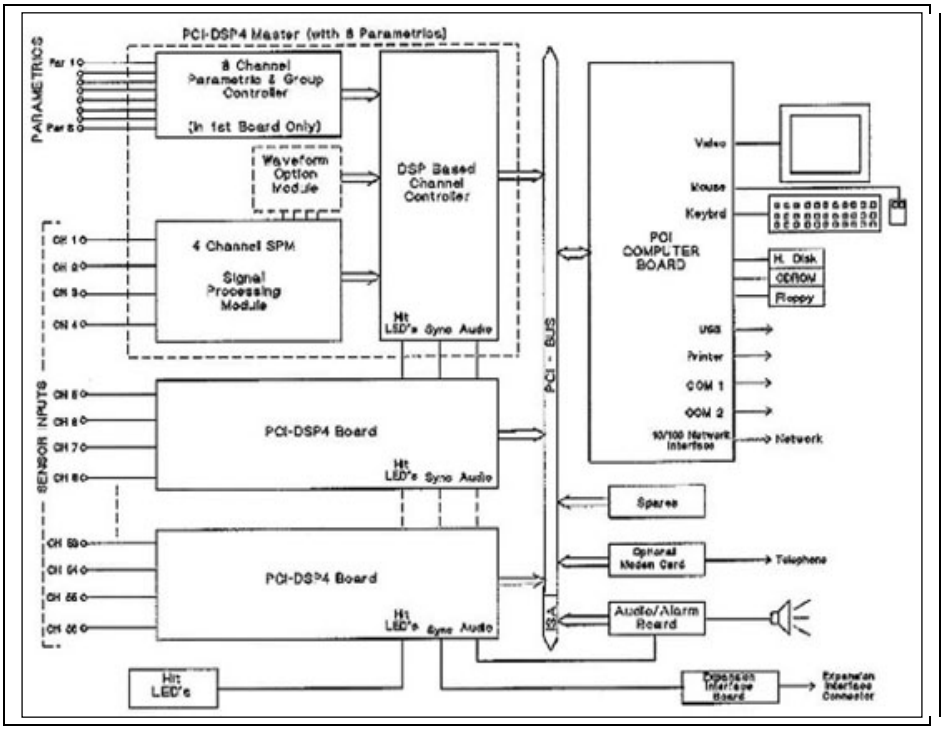

Figura 2.13: Diagrama de Blocos de um sistema DiSP (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005).

Todos os sistemas DiSP possuem a mesma arquitetura básica sendo que o modelo mais simples é o modelo que contém apenas uma placa PCI-DSP de 4 canais, que controla todo o grupo processando até 8 parâmetros, 1 contador de ciclos e entradas e saídas de controle (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005). À medida que vão sendo necessários mais canais, outras placas de quatro canais são adicionadas. Normalmente as placas são montadas no mesmo chassi de um computador, não sendo necessário um computador externo ao sistema para fazer a aquisição dos dados. Comercialmente, pode-se encontrar equipamentos de 8, 16, 24 e 56 canais.

O sinal de entrada entra diretamente a partir dos amplificadores e é direcionado para as entradas das placas PCI-DSP-4. O evento acústico é então condicionado e passado para os circuitos de filtros escolhidos pelo usuário. O sinal filtrado é passado para um módulo conversor de 16 bits A/D, onde o sinal é digitalizado a taxas de até 10MHz. A saída de 16 bits é então passada para o circuito de extração de características do sinal (que converte o sinal em eventos e outros parâmetros) e é também passada para o módulo específico de gravação de forma de onda. Cada módulo é um circuito independente do outro que faz aquisição digital baseada em critérios que o usuário escolhe.

O módulo de paramétricos é utilizado para extrair os parâmetros de EA do sinal captado. O sinal é elevado ao quadrado, para que apenas o ciclo positivo seja considerado, e a parametrização é feita baseada em três tempos de decisão (Figura 2.14) descritos no manual do equipamento (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005). O *Peak Definition Time (PDT)*, é uma função baseada em tempo que permite a determinação do tempo do pico verdadeiro da forma de onda acústica. O PDT é ativado quando o primeiro sinal cruza o limiar e começa a contagem regressiva até zero, a menos que um valor maior de amplitude ocorra. Nesse caso, o *PDT* recomeça a contagem. O *Hit Definition Time (HDT)* também é uma função baseada em tempo que permite ao sistema determinar o fim do sinal, finalizar os processos de medição e armazenar os atributos do sinal. A contagem de *HDT* termina quando o último cruzamento do limiar acontece. Finalmente o *Hit Lockout Time* é uma função que inibe a medição de reflexos e chegadas tardias de partes do sinal de EA. O circuito de *HLT* é ativado pelo término do *HDT*. Essas

funções podem assumir valores dentro de uma faixa de 30μs até 130ms. Os valores padrões que o equipamento possui são: 200μs para o *PDT*, 800μs para o *HDT* e 1000μs para o *HLT*. O manual sugere valores mínimos de 300μs para o *HLT* e de duas vezes o valor de *PDT* para o *HDT*.

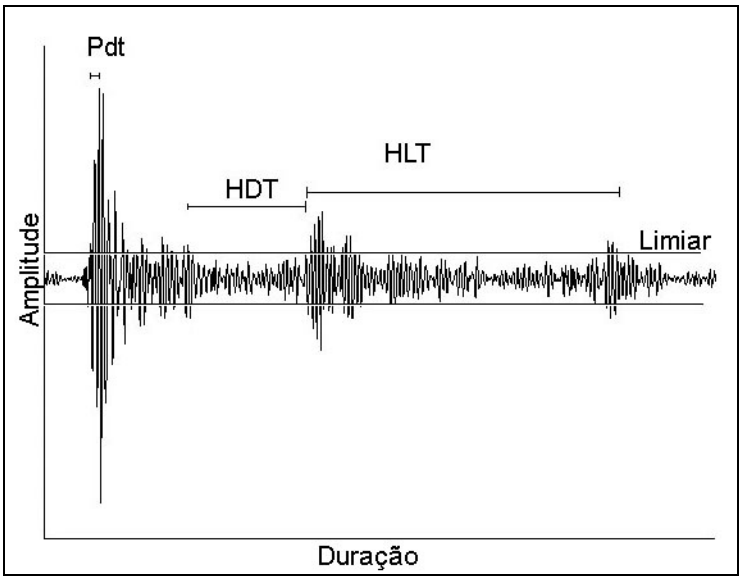

Figura 2.14: Parâmetros temporais de aquisição: PDT, HDT e HLT.

O módulo de forma de onda é utilizado para digitalizar a forma de onda e possibilitar a sua extração em arquivos tipo banco de dados. Para fazer a aquisição, o usuário deve escolher a taxa de aquisição, o *pre-trigger* e o comprimento do sinal. A taxa de aquisição é medida em *Mega Samples Per Second* (MSPS) e é escolhida de uma faixa que vai de 1 até 10MSPS. A escolha de 1MSPS significa que o aparelho irá fazer uma medição a cada 1μs. O *pre-trigger* é medido em μs e representa quanto tempo o aparelho irá gravar dados antes do limiar ter sido cruzado. O valor mínimo é 0 e o valor máximo é calculado dividindo-se o comprimento do sinal pela taxa de aquisição. O comprimento do sinal é medido em μs escolhido a partir de uma faixa de 1k até 15k. Ao utilizar-se uma taxa de 4MSPS e um comprimento de sinal de 1k, obtém-se 256μs de dados.

2.2.5 Parâmetros de Medição do Sinal de EA

Os cinco parâmetros (ASM 1989) mais utilizados em EA podem ser vistos na Figura 2.15 e são: Contagens, Amplitude, Duração, Tempo de Subida e a área medida

abaixo da envoltória do sinal retificado (Energia MARSE). Outros parâmetros utilizados são: Energia Verdadeira e Contagens por Pico (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005), Freqüência Média (DRUMMOND 2007) e Momentos Estatísticos dos sinais (LOKAJÍČEK 2008). De todos os parâmetros, a Amplitude Máxima é a menos dependente do limiar, mas mesmo ela depende desse limite de detecção, já que um limiar muito alto impossibilitaria a medição de qualquer sinal.

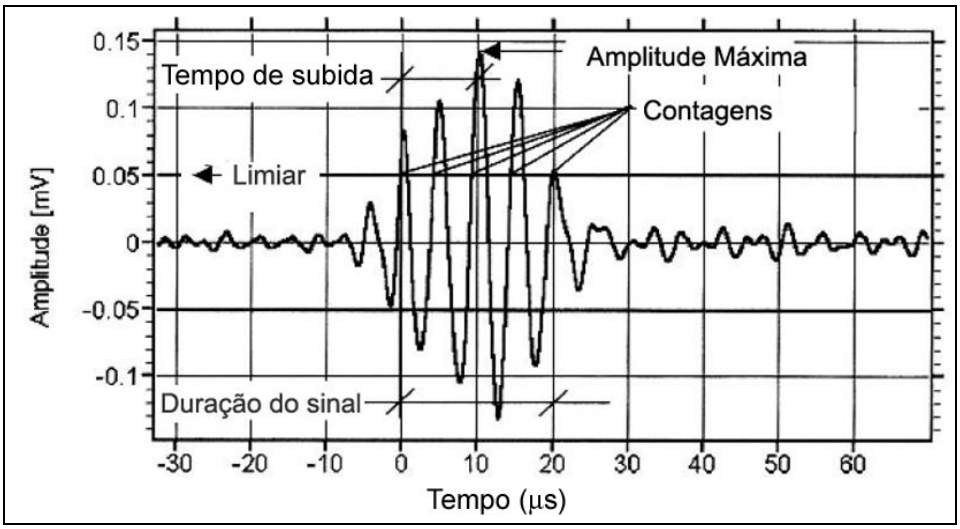

Figura 2.15: Parâmetros de medição do sinal de EA (adaptado de MIX 2005)

Amplitude (*Amplitude*): é o maior pico de voltagem atingido por um sinal de EA. Esse é um parâmetro importante pois é ele que determina a detectabilidade de um evento, já que o limiar também é baseado nesse parâmetro. Amplitudes de emissão acústica estão relacionadas à magnitude da fonte do evento, e elas podem variar de microvolts a volts. As amplitudes de emissão acústica são comumente expressas em decibéis, tem resolução de 1dB e variam numa faixa de 0 a 100dB no sistema PAC Disp 16C.

$$A[\text{dB}] = 20\log\left(\frac{V_{max}}{1\mu\,\text{volt}}\right) - (\text{Ganho do pré - amplificador}) \qquad \text{Equação 4}$$

onde: A é a amplitude em decibéis; V_{max} é a voltagem máxima recebida para aquela onda; Ganho do pré-amplificador é o ganho informado ao aparelho.

Contagens (*Counts*): é o número de vezes que o sinal de EA cruzou o limiar. Esse parâmetro depende da magnitude da fonte do evento mas também depende das

propriedades acústicas e natureza reverberante da amostra e do sensor. Contagens é um dos parâmetros mais velhos e mais simples de associar a eventos acústicos. O problema é que esse parâmetro tende a enfatizar fatores acústicos e do instrumento de medição às custas de fatores de fonte, uma vez que são dependentes da ressonância do elemento transdutor (DRUMMOND 2007). Contagens é expressa em número de contagens, tem resolução de 1 contagem e varia numa faixa de 0 a 65.535 contagens no sistema PAC Disp 16C.

Energia MARSE (*MARSE* ou *MARSE Energy*): é a área medida abaixo da envoltória do sinal retificado. É dito (ASM 1989) que esse parâmetro é preferido em relação a contagens por ser sensível a amplitude e duração, e ser menos dependente da escolha de limiar e da frequência de operação.

Energia, Energia PAC (*PAC Energy*): é supostamente o mesmo parâmetro que a energia MARSE (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005). No entanto, a dificuldade em encontrar a maneira de como a energia PAC é medida gerou uma discussão que é abrangida no Capítulo 7 (Resultados do terceiro grupo de ensaios). A unidade da energia PAC é 10μvolt-segundo/contagens, sendo que o parâmetro tem resolução de 1 contagem e varia numa faixa de 0 a 65.535 contagens no sistema PAC Disp 16C. Em muitas tabelas e no texto a unidade dessa energia será mencionada como "unidades (un)" e não como 10μvolt-segundo/contagens por uma questão de praticidade.

Duração (*Duration*): é o intervalo de tempo limitado pelo primeiro e último cruzamento do limiar. Esse parâmetro é medido em microssegundos e depende da magnitude da fonte, acústica estrutural e reverberação da mesma maneira que contagens. Duração é expressa em microssegundos, possui uma resolução de 1μs e varia numa faixa de 0 a 65.535ms no sistema PAC Disp 16C.

Tempo de Subida (*Rise Time*): é o tempo passado desde o primeiro cruzamento do limiar até o tempo onde ocorreu o pico de máxima amplitude. Este parâmetro é governado por processos de propagação da onda e é medido em microssegundos. A sua resolução é de 1μs e ele varia numa faixa de 0 a 65.535ms no sistema PAC Disp 16C.

ASL (*Average Signal Level* – Nível de Sinal Médio): é a média da amplitude do sinal. O ASL é medido em decibéis, possuindo uma resolução de 1dB e variando numa faixa de 0 a 100dB no sistema PAC Disp 16C.

RMS (*Root Mean Square* – Valor Eficaz): para essa aplicação, é o valor de voltagem eficaz. O RMS é medido em milivolts, possuindo uma resolução de 0,15mV e variando numa faixa de 0 a 6V no sistema PAC Disp 16C.

Freqüência Média (*Average Frequency*): é o resultado da divisão do parâmetro Contagens pelo parâmetro Duração. Ele é medido em kHz, possui uma resolução de 1kHz e varia numa faixa de 0 a 65.535 kHz no sistema PAC Disp 16C.

2.2.6 Localização das fontes

Localização Linear:

A localização linear é a mais simples de todas. Uma vez que se tenha colocado dois sensores (A e B) em posições conhecidas, e sabendo-se a velocidade de propagação da onda no componente, pode-se calcular a posição da fonte de EA pela diferença de tempo de chegada das frentes de ondas (Figura 2.16).

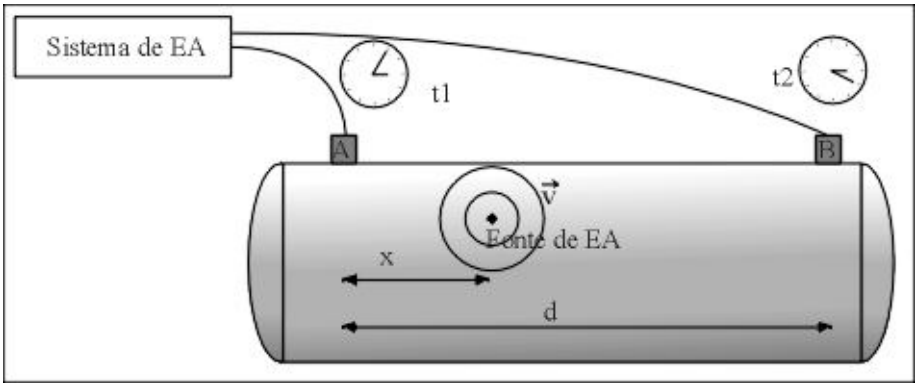

Figura 2.16: Localização linear através da técnica de EA.

As equações 5–8 mostram como calcular a distância da fonte a partir do sensor "A".

$$d - x = vt_2 \qquad \text{Equação 5}$$

$$x = vt_1 \qquad \text{Equação 6}$$

$$d - 2x = v(t_2 - t_1) \qquad \text{Equação 7}$$

$$x = (d - \Delta t)/2 \qquad \text{Equação 8}$$

onde: d é a distância entre os sensores a e b, x é a distância da fonte ao sensor a, v é a velocidade de propagação da onda, t1 e t2 são os tempos que o sinal demora para chegar nos sensores a e b respectivamente.

Localização Superficial

Quando se deseja localizar o defeito em um plano, é necessário o uso de pelo menos três sensores. Isso ocorre porque todos os pontos que têm uma diferença constante entre as suas distâncias a dois pontos fixos formam uma hipérbole (VALLEN 2007). A Figura 2.17 mostra três hipérboles que se encontram e definem um ponto, onde as três diferenças de distâncias são equivalentes às diferenças de tempo medidas. Se apenas dois sensores são usados, então existe apenas uma hipérbole, o que não é suficiente para localizar a fonte de EA no plano.

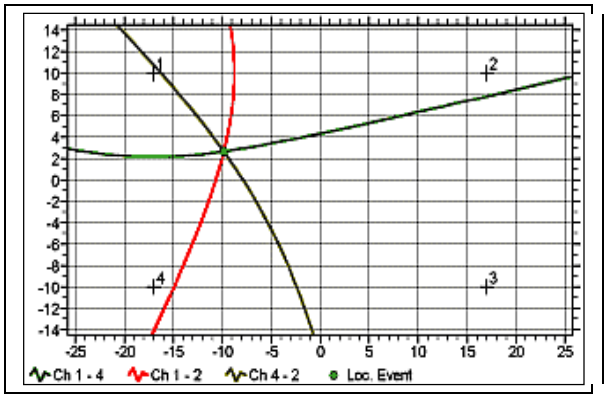

Figura 2.17: Localização planar através da técnica de EA (VALLEN 2007).

Localização Zonal

Esse é um tipo de localização mais grosseira que é utilizada para o caso de grandes estruturas. Normalmente serve para direcionar outras técnicas de ensaios não destrutivos diminuindo efetivamente a área que deve ser inspecionada. São necessários

no mínimo três sensores, como mostrado na Figura 2.18. De acordo com o posicionamento dos sensores, a estrutura é dividida em zonas e localiza-se a fonte de emissão de acordo com a ordem em que a onda sonora chega nos sensores. Assim sendo, um evento gerado na região BAC atingiu primeiramente o sensor B, depois o sensor A e finalmente o sensor C.

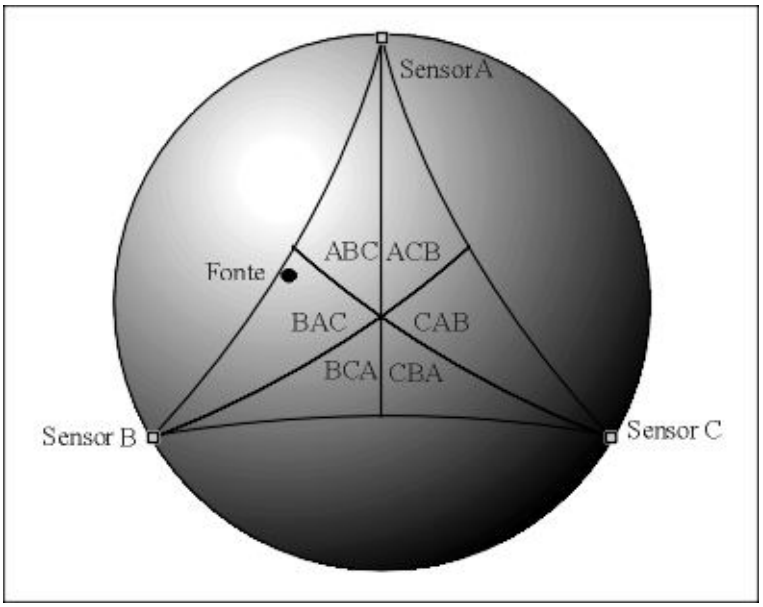

Figura 2.18: Localização zonal através da técnica de EA.

2.2.7 Ruído

Uma das principais dificuldades de um teste de emissão acústica é filtrar o ruído dos sinais efetivos relacionados ao material. Isso acontece porque existem diversas fontes que podem gerar ondas sonoras, desde fontes mecânicas até fontes elétricas. A escolha de uma faixa de frequência apropriada para o teste é de suma importância. Historicamente se tem trabalhado principalmente na faixa que vai de 100 a 300kHz, já que ela se mostrou adequada para 90% dos testes de EA (ASM 1989). Variações nessa faixa, no entanto, são comuns. Para analisar fundos de tanques, corrosão ou vazamentos, às vezes se utilizam sensores que trabalham em 25kHz.

O ruído de fundo normalmente é um ruído de baixa frequência e corresponde a fontes mecânicas, como fluxo de fluidos em bombas e válvulas, processos de fricção como o movimento de estruturas nos seus suportes (no caso desse trabalho, arames das

armaduras do *riser*), e processos de impacto como chuva e cabos movimentados pelo vento que atinjam a estrutura.

O ruído elétrico e eletromagnético é produzido por falta de aterramento, por transmissores de rádio e navegação e tempestades elétricas (ASM 1989). Outras fontes podem incluir um ocasional soldador trabalhando perto da estrutura e variações de campos magnéticos fortes. A movimentação dos domínios magnéticos devido à variações do campo magnético induz um ruído acústico na estrutura que já foi utilizado como instrumento de análise (RUIZ 2005, SANCHEZ 2004). Não é o caso do presente trabalho.

Como a emissão acústica dificilmente é empregada sozinha, é necessário um cuidado já que a maioria das outras técnicas irá introduzir algum tipo de ruído. Esse ruído pode aparecer na forma de ondas de ultra-som (inspeção por ultra-som e *Time of Flight Diffraction* - TOFD), ruído mecânico devido ao arraste de sensores na estrutura, ruído eletromagnético (inspeção por métodos magnéticos) e até curto circuito de outros aparelhos. Um exemplo desse último caso é o seguinte: durante a pressurização de um vaso de pressão monitorado com EA e acelerômetros no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física), um pouco de água vazou e entrou em contato com a junção de um dos cabos do acelerômetro, causando curto-circuito e ruído.

Problemas com ruído podem ser vencidos de diferentes maneiras. Para os casos em que o ruído tenha uma faixa de frequência característica, pode-se fazer o uso de filtros do tipo passa alta ou passa faixa. No entanto, existem ruídos que se distribuem sobre uma larga faixa de frequência, o que acaba dificultando esse tipo de solução. O Ruído branco é um ruído no qual não existe correlação entre dois pontos pertencentes ao sinal (PAPOULIS 1991), e que (assim como luz branca) tipicamente apresenta componentes em todo o espectro de frequência. Ruído Browniano, ou ruído marrom (assim chamado pelo seu espectro avermelhado assim como sua ligação aos movimentos Brownianos) é uma mistura com influências principais de componentes de baixa frequência (HALLEY 1999). Ambos ruídos pertencem a família de ruídos 1/f (ou ruído $1/f^{\gamma}$), cujo espectro de potência para cada freqüência é proporcional a $1/f^{\gamma}$, sendo o expoente γ zero em ruído

branco e 2 no marrom. Entre esses dois extremos existe uma grande faixa de possibilidades de cores de ruído, incluindo o ruído rosa ($\gamma = 1$).

Em certos casos será possível eliminar o ruído na própria fonte. Isso inclui proteger a estrutura da chuva e vento usando-se aparadores, colocando-se amortecedores para o caso de estruturas que vibram, retirando-se peças soltas que estejam batendo na estrutura e impedindo a utilização de empilhadeiras e máquinas de solda perto do local de análise. Para os casos em que não se pode eliminar a fonte, pode-se utilizar um sensor guarda, que é basicamente um sensor colocado muito próximo da fonte do ruído (RUZZANTE 1998) de modo que se possa avaliar e retirar dos dados coletados os sinais relacionados ao ruído.

O ruído elétrico pode ser vencido através do uso de aterramento, isolamento de cabos, e utilização de sensores diferenciais ou sensores com pré-amplificadores integrados.

Finalmente, pode-se utilizar o próprio equipamento de EA para tentar filtrar alguns dos ruídos. Alguns dos métodos são citados abaixo:

- Medição de diferença máxima e mínima de tempos, de modo que a distribuição de sensores delimitem a área de interesse, determinando-se o tempo máximo ou mínimo que um sensor demoraria para detectar um evento.

- Determinação de uma sequência de chegada, de modo que se o sensor número 1 está mais próximo da fonte, não existe sentido em o sensor número 2 acusar a chegada de um evento antes do sensor número 1.

- Medição do ruído com o aparelho de EA e utilização de filtros digitais que só aceitem sinais cujos parâmetros estejam dentro de uma faixa, por exemplo, apenas sinais com duração menor do que 2ms ou que possua um tempo de subida maior do que 10μs.

A utilização de um limiar mais alto é uma outra possibilidade, mas deve-se fazer uma avaliação de quantos dados não serão adquiridos e se o aumento do limiar não causa excessiva perda de informação.

2.2.8 “Efeito Kaiser”, “Corolário Dunegan” e “Razão Felicity”

De acordo com PAPARGYRIS (2001), dois efeitos têm sido observados em cerâmicos e compósitos quando eles são tensionados. O efeito Kaiser é o fenômeno observado quando um material é carregado até um nível de tensão e descarregado, e nenhuma emissão acústica é observada no carregamento subsequente até a tensão prévia ter sido excedida.

A razão entre a tensão máxima do primeiro carregamento e a tensão mais baixa de recarregamento na qual se observa emissão acústica se chama Felicity R_{EA} e pode ser usada como um “índice do dano” do material compósito. Essa razão é definida por:

$$R_{EA} = \frac{L_{EAini}}{L_{\max}} \qquad \text{Equação 9}$$

onde: L_{EAini} é a carga na qual a atividade acústica recomeça durante o recarregamento; L_{max} é a máxima carga aplicada durante o primeiro carregamento.

Quanto maior a taxa, maior o dano ($R_{EA} \leq 1$). Evidentemente, quando $R_{EA} = 1$, nenhum dano a mais ocorre durante o recarregamento e o material apresenta o efeito Kaiser. Taxas Felicity são usadas na aceitação de testes de EA para qualificar o dano.

De acordo com DRUMMOND (1997), o efeito Kaiser pode ser visto como uma desvantagem, uma vez que cada evento acústico pode ser só medido uma vez. Assim, Harris e Dunegan propuseram uma estratégia para o uso de emissão acústica para testes de prova periódicos. O “Corolário Dunegan” diz que a emissão acústica experimentada durante testes de prova revela dano ocorrido durante o período operacional precedente (DRUMMOND 1997). Caso uma estrutura não sofra dano durante um período particular, então nenhuma emissão será observada no teste de prova subsequente.

2.2.9 Emissão Acústica em cabos e tubos de multicamadas

Mais e mais poços de petróleo estão sendo perfurados em águas profundas (HANZAWA 1982). Essas estruturas são ancoradas através do uso de cabos e podem

receber energia através de cabos de multicamadas. Existe uma grande preocupação em estudar o comportamento em fadiga desses cabos e desenvolver meios de detectar a ruptura dos mesmos. Apesar de existirem diferenças entre cabos multicamadas e tubos de multicamadas, estruturalmente ambos possuem elementos semelhantes e as técnicas de inspeção utilizadas em um são as mesmas utilizadas no outro. HANZAWA (1982) afirma ser possível fazer a detecção de rupturas de cabos através do uso de acelerômetros e emissão acústica. Para CASEY (1987), a emissão acústica, com a exceção da inspeção magnética e da visual, representa possivelmente a única forma alternativa de inspeção de cabos de aço. Finalmente GAILLET (2004) menciona que a detecção do dano (rupturas de arames, corrosão) é complicada pela proteção específica do arame (duto, etc...) ou pela configuração dentro da estrutura (cabos embebidos em concreto ou abraçadeiras massivas, elementos de cabos sendo segurados por presilhas, etc...). Ele sugere que dentro das possíveis opções para serem exploradas, a EA parece ter um potencial muito grande.

Em 1982 HANZAWA apresentou os resultados de um trabalho onde foram testados cabos com diâmetros nominais de 50mm através de EA e uso de acelerômetro, sendo ambos presos nas terminações. O ponto de quebra foi localizado através da determinação da diferença de tempo de subida da forma de onda recebida pelos sensores. Segundo o autor, quando o som de uma ruptura viaja uma grande distância ou por uma rota complexa antes de chegar no sensor, a forma de onda frequentemente deforma devido a reflexões e atenuação. Eles também descobriram que o ponto de ruptura podia ser determinado pelo logaritmo da razão entre as taxas de contagens dos sensores de EA colocados na extremidade de cima e na de baixo.

O número de rupturas na seção testada algumas vezes foi maior do que o número de arames porque um arame sofreu mais de uma ruptura. Isso ocorre porque um arame que rompe em um ponto ainda pode suportar a carga aplicada em um outro não muito distante e que pode quebrar mais tarde. A maior parte das rupturas da seção de teste foi causada pelo desgaste de arames mantidos em contato entre si e repetidamente sujeitos a carga. Todos os rompimentos na terminação (*socket)* foram causados pela tensão de dobramento aplicada onde os arames foram dobrados perto da abertura da terminação.

HANZAWA (1982) obteve uma taxa baixa de detecção ao usar apenas um sensor de EA e um acelerômetro. A detecção melhorou quando foram usados dois sensores e dois acelerômetros. Um dado curioso é que eles descobriram que quando σ_{min} e R eram pequenos e quando o teste seguiu até a ruptura do segundo e terceiro arames, a taxa de detecção tendeu a diminuir devido à baixa energia das quebras. Devido à necessidade de se eliminar ruídos, nem sempre a taxa de detecção é de 100%. O autor conclui que os arames rompem devido à fadiga que se desenvolve a partir da abrasão entre eles. A quebra de arames induzida por fadiga ocorre nos arames externos quando R é baixo e nos arames internos quando R é alto.

Três anos mais tarde, LAURA (1985) apresentou uma revisão de alguns trabalhos feitos sobre EA em cabos. Ele diz que ondas sonoras audíveis são emitidas a 95% da carga máxima, o que seria tempo suficiente para parar o teste e que os arames individuais rompem com amplitude de 15 a 20db acima do ruído de fundo. LAURA (1985) cita que Harris e Dunegan encontraram uma correlação de 1:1 entre arames rompidos e sinais detectados.

No mesmo ano, CASEY (1985) publicou um trabalho onde foi analisado um cabo com 12mm de diâmetro feito com fios individuais galvanizados de diâmetro diferente (de 1,25 a 1,60mm). Foi feita uma terminação metálica no cabo e o espaço vazio foi preenchido com metal branco. Primeiramente foi feita EA nos fios individuais que haviam sido entalhados, prendendo o sensor banda larga perto do entalhe. Na análise dos dados, foram encontradas durações de sinais de 1ms. Em relação à amplitude, não houve diferenças marcantes e atribuiu-se isso à pequena diferença de diâmetros e à grande variação nos resultados de amplitude. A frequência dos sinais de ruptura ficou entre 0 e 100 kHz.

Posteriormente os arames externos do cabo foram entalhados e carregados até algum arame romper. Nesse caso, os sensores foram montados na terminação do cabo. Comparando com o experimento anterior, o autor encontrou amplitudes de quebra menores e explicou esse fato como sendo processos de atenuação que atuam nos sinais enquanto eles propagam até o sensor. A duração desses sinais aumentou, indo para a escala de 5ms. Esse aumento seria função da transferência de energia aos outros fios e de

um espalhamento em tempo de trânsito devido à complexidade do caminho até o transdutor. As frequências de ruptura nem sempre são as mesmas devido à diferença de caminho até o sensor e eventuais desigualdades no tamanho dos entalhes.

Finalmente foi realizado um ensaio de fadiga a 1,2Hz com a carga máxima correspondendo a 80% do limite de ruptura e alguns rompimentos de arames foram adquiridos pelo sistema de EA. Houve uma diminuição ainda maior da amplitude e CASEY (1985) argumenta que pode ocorrer um aumento da duração do sinal.

Mais tarde, CASEY (1987) fez um novo experimento, onde cabos foram terminados e presos em uma máquina de tração, sendo montada uma camisa que foi preenchida com água ao redor do cabo. Um transdutor banda larga foi preso na terminação. Foram observadas quebras nos arames com e sem adição de água e não foram notadas diferenças significativas nem em amplitudes nem nas frequências, que ocuparam a faixa de 0 a 30kHz com algumas frequências em 100kHz.

Após esse experimento, eles repetiram o teste com o sensor preso na camisa. Não houve detecção das quebras pelo sensor da camisa sem a presença de água. Comparando com os resultados obtidos anteriormente, houve uma grande redução na duração do sinal e_desaparecimento de frequências abaixo de 25kHz. CASEY (1987) atribuiu esses resultados ao fato de que ondas transversais não propagam na água. Surpreendentemente a amplitude dos sinais não diminuiu.

Dois anos mais tarde, HARROP (1989) utilizou sensores ressonantes de 175kHz (limiar de 74mV) e 375kHz (limiar de 79mV) para monitorar cabos elétricos revestidos com material polimérico isolante durante um ensaio de tração com controle por deslocamento. Depois, mudaram para controle de carga, o que gerou a necessidade de aumentar do limiar de aquisição para 99mV. Grandes aumentos na quantidade de contagens foram simultâneos a sons audíveis de quebra.

HARROP (1989) encontrou um fenômeno curioso: ao carregar o cabo, obteve resultados de emissão acústica iguais para cada carregamento e descarregamento, descartando assim efeitos Felicity e Kaiser. Ele conclui que eventos de AE de alta amplitude foram bons indicadores de falhas por deformação e que a emissão acústica tem

grande potencial para monitoramento de tais cabos, mas são necessárias investigações mais aprofundadas antes que o sistema seja implementado.

CASEY (1997) apresentou uma revisão de emissão acústica feita em cabos de aço, na qual afirma que o método de inspeção EA tem o potencial de satisfazer os requerimentos de um teste não destrutivo para avaliação de integridade de cabos. Idealmente, o cabo precisa ser monitorado continuamente já que ondas sonoras são geradas pela rápida emissão de energia dentro do material devido a tensões elásticas. Esse método depende da aplicação de uma tensão a fim de que defeitos possam emitir ondas à medida que eles crescem. Dentro de um cabo as principais fontes de emissão são ruptura de arames, roçamento entre arames e corrosão. Emissão acústica também resulta do material (resina, zinco ou metal branco) que é usado para terminar o cabo nas terminações.

Harris e Dunegan são também citados. De acordo com CASEY (1997) eles achavam que técnicas de emissão acústica podem ser usadas para medir o numero de arames que quebram durante o carregamento do cabo; que cabos defeituosos podem ser facilmente distinguidos pelo método de EA e que o monitoramento contínuo de ciclos de fadiga de cabos pode ser feito de uma maneira direta e que fornece amplos avisos de falha por fadiga.

Alguns dos resultados de das teses de doutorado de Casey e Holford são:

- ruído de fundo é gerado nas terminações. O uso de resina gerou o dobro de ruído que o uso de metal branco;
- maior número de sinais de emissão perto do conector dinâmico;
- existe relação energia de ruptura e energia EA;
- é mais difícil de detectar rupturas do meio pro final do teste;
- sinais de ruptura de arames foram encontrados na ordem de 20ms e frequências de 0 a 20kHz.

Sete anos mais tarde, GAILLET (2004) apresenta um trabalho sobre a vibração de cabos multicamadas e detecção de falha por emissão acústica. Ele comparou cabos intactos com não intactos e utilizou sensores ressonantes em 300kHz. O autor afirma que em termos práticos, o limiar de detecção é selecionado em 35dB para evitar saturação do sistema de EA com ruídos parasitas e reflexões múltiplas em 30dB. Esse procedimento permite a aquisição de eventos acústicos altamente correlacionados com o fenômeno em estudo (fricção dos arames entre si) e permite tratamento estatístico dos eventos. A atividade acústica detectada no cabo intacto diminuiu após vários testes e foi atribuída a fenômenos de degradação da resina. Esse trincamento gradual da resina induz características de EA diferentes dos sinais gerados pelos defeitos. GAILLET (2004) também descobriu que a maior parte do ruído de fundo se origina nas terminações. No cabo com defeitos o alto nível de EA se originou dos defeitos dos arames, sendo uma pequena parte atribuída à degradação da resina.

A comparação entre os dois cabos foi feita com os seguintes parâmetros acumulados de EA: número de sinais, número de contagens e amplitude. GAILLET (2004) diz que esses são parâmetros globais; sendo usados porque o processamento de dados deve ser simplificado de modo a permitir que essa técnica seja empregada em campo.

Os resultados indicaram que a distribuição de amplitudes é diferente no cabo intacto e no cabo entalhado. O espectro de frequência é mais disperso no cabo danificado quando comparado com o cabo intacto, que possui frequência centrada em 350kHz (atribuída à degradação da resina). No cabo danificado, surgiram agrupamentos de alta energia e alto número de contagens que caracterizam a fricção entre os arames rompidos. A fricção entre arames é muito dependente do grau de dano. Assim, a EA geral é proporcional ao número de arames danificados e o parâmetro mais pertinente é o numero de sinais segundo o autor.

DRUMMOND (2007) apresentou um trabalho sobre EA em cabos durante prova de teste e testes de fadiga. Segundo ele, o número de passagens pelo limiar, contagens, era um parâmetro muito usado na medição com equipamento analógico. O problema é que este parâmetro tende a enfatizar fatores acústicos e do instrumento no lugar de fatores

de fonte, já que eles são dependentes da ressonância do elemento transdutor. O autor fez uma pré-filtragem de modo que os sinais só foram aceitos se contivessem mais do que cinco contagens.

Os resultados apresentados mostram que em um teste de tração, quando a carga excedeu a máxima carga aplicada anteriormente, o instrumento registrou sinal de EA e houve ruído sonoro audível. Coincidente com o ruído, o equipamento registrou amplitudes elevadas de 95dB e 100dB em um outro cabo, o que é considerado mais alto do que qualquer outro sinal que tivesse sido gerados até aquele momento. Esses sinais de alta amplitude foram considerados como sendo originados pela fratura dos arames do cabo e o autor encontrou uma relação linear entre energia acústica (pJ) e porcentagem de redução do diâmetro da corda.

Partindo para um ensaio de fadiga, foi estabelecido um critério de filtro de 80dB e 300 unidades de Energia. O efeito desse filtro é reduzir o volume de dados em aproximadamente 1/100 dos dados originais. Drummond não conseguiu discriminar ruídos de quebras do ruído de fundo utilizando freqüência (parâmetro *Average Frequency*).

ELMAN (2008) fez um estudo de detecção de rupturas de arames em risers de 6pol utilizando acelerômetros e microfone. No teste feito em laboratório, os arames foram entalhados com uma retífica manual e o riser foi submetido a testes de tração estáticos e cíclicos, com amplitudes de carregamento variando entre 40 e 80ton. O microfone foi montado em cima da camada polimérica assim como os acelerômetros. Ambos sensores tiveram sucesso em captar o momento de ruptura dos arames. Entretanto, não foi possível se estabelecer uma relação entre a amplitude do sinal e a carga de ruptura.

2.3 Técnicas Estatísticas e de Reconhecimento de Padrões de Emissão Acústica

Diversas técnicas estatísticas e de análise de sinal foram utilizadas para se tentar descrever e predizer determinado fenômeno através dos resultados do ensaio de Emissão acústica. Algumas dessas técnicas envolvem a parametrização dos sinais, caracterizando

cada sinal em torno de sua Amplitude, Duração, Contagens e outros parâmetros, enquanto que outras técnicas trabalham diretamente com a forma de onda dos sinais coletados. Acredita-se que, através das relações encontradas e dos padrões que surgem, seja possível automatizar métodos de inspeção baseados na resposta de EA.

Autores como JOHNSON (2002) e LOUTAS (2006) tomaram diretamente a forma de onda e fizeram transformações para fazer análises de freqüência. Johnson normalizou todas as formas de onda que obteve nos seus ensaios em compósitos e utilizou métodos de agrupamento (*Clustering*) e Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis – PCA*) para diferenciar mecanismos de dano. Loutas, também trabalhando com compósitos, utilizou Transformada Ondinha (*Wavelets*) para decompor os sinais de EA em faixas de freqüências e assim monitorar a evolução do dano.

GODIN (2004) preferiu trabalhar com sinais parametrizados, utilizando métodos de agrupamento do tipo K-vizinho mais próximo (*K-nearest Neighbour – KNN*) e K-médio (*K-means clustering*) para identificar os mecanismos de falha. Como dados de entrada ele utilizou parâmetros como Amplitude, Duração, Tempo de Subida, Contagens, Contagens até o pico e Energia.

DE OLIVEIRA (2008) utilizou análise de sinais de EA através de redes neurais para identificar e discriminar mecanismos de dano em compósitos. Os parâmetros de entrada para as redes foram Amplitude, Duração, Energia e Contagens entre outros. Ele conclui que o seu procedimento tem o potencial para fazer o monitoramento contínuo e automático dos compósitos. Segundo DE OLIVEIRA, um tratamento da informação fornecida pelos sensores independente da decisão humana é desejável a fim de se ter um monitoramento eficiente da estrutura.

DA SILVA (2006) utilizou um classificador não linear baseado em redes neurais para diferenciar estados de propagação e não propagação em vasos de pressão. Para tanto, ele parametrizou os sinais de EA e utilizou os seguintes parâmetros como entrada para a rede neural: Tempo de Subida, Contagens, Amplitude, Energia, Duração e ASL.

BIANCOLINI (2006) utilizou fractais para tentar predizer a vida em fadiga de uma liga de aço. Ele relacionou a dimensão fractal com o número de contagens de Emissão Acústica à medida que uma trinca crescia nos corpos de prova. Ele conclui que é possível utilizar seu método para diagnosticar nucleação e propagação de trincas de fadiga em aços.

Nos casos em que os analistas trabalham com sinais de EA parametrizados, é necessário que se tenha confiança que os dados de entrada possuem pouca contribuição de ruído e que realmente estejam medindo o fenômeno estudado. Isso se faz através da seleção de parâmetros de aquisição e de quantificação dos sinais.

3.0 OBJETIVOS E DIVISÃO DO TRABALHO

3.1 Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Fazer testes em tiras da armadura de tração de *risers* flexíveis monitorados por EA para servirem de guia a testes posteriores em *risers* na escala real;
- Fazer testes de tração e fadiga em *risers* flexíveis de 6pol (152mm) de diâmetro acompanhando os testes com Emissão Acústica
- Verificar parâmetros de aquisição de sinal, confiabilidade de parâmetros relacionados ao sinal acústico e estudar o melhor emprego de procedimentos de aquisição dos sinais de EA;
- Analisar os resultados de EA de modo a apresentar uma sugestão de método viável para o monitoramento contínuo de *risers* flexíveis de 6pol através de técnicas de reconhecimento de padrões;

3.2 Divisão do Trabalho

O procedimento adotado para esse trabalho foi de dividir o trabalho em vários grupos de ensaios, começando com ensaios de tração em arames retirados de um *riser* até o ensaio de fadiga de um *riser* em escala real. Apesar dessa forma não ser a clássica para apresentação de uma tese, acordou-se que esta era a forma mais clara, já que o segundo grupo de ensaio teve seus procedimentos e objetivos dependentes dos resultados do primeiro grupo de ensaios.

Na seção de Procedimento Experimental são citados os procedimentos gerais para os ensaios, maiores detalhes são dados nos capítulos correspondentes a cada um dos ensaios já que alguns procedimentos mudaram entre os grupos. Começou-se com ensaios

relativamente simples e foi se aumentando o grau de complexidade à medida que os resultados eram obtidos. A motivação e objetivos de cada grupo de ensaios são discutidos nos seus capítulos correspondentes.

A seção de Resultados na realidade não existe propriamente, já que ela foi dividida em cinco grupos. Cada grupo de ensaios possui as seguintes seções: objetivos, procedimento experimental, resultados e conclusões parciais baseadas naqueles resultados.

No primeiro grupo de ensaios, arames que haviam sido retirados de um *riser* foram submetidos a um ensaio de tração até a ruptura com monitoramento via EA para dar uma primeira idéia do tipo de resultado que estava se procurando.

No segundo grupo de ensaios, a emissão acústica foi usada para monitorar o rompimento de tiras entalhadas durante o ensaio de tração até ruptura de um *riser* em escala real.

O terceiro grupo de ensaios consistiu de acompanhamento por EA do rompimento de arames que possuíam pré trincas de fadiga. Esses arames foram montados em uma caixa metálica e o espaço vazio foi preenchido com resina.

O quarto grupo de ensaios consistiu de acompanhamento por EA de fadiga de um *riser* em escala real. Assim como anteriormente, alguns arames foram entalhados.

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Caracterização dos corpos de prova

Uma grande quantidade de *risers* utilizados pela Petrobras possui o diâmetro de 6 polegadas, e por isso decidiu-se que os ensaios seriam feitos nesse tipo de tubo. É importante salientar que os *risers* de 6pol não possuem sempre os mesmos tamanhos de arames da armadura de tração. Assim, a caracterização abaixo reflete apenas o *riser* que foi efetivamente ensaiado e não pode ser generalizada.

4.1.1 *Riser* de 6 polegadas correspondente ao Grupo de Ensaios No.2

As Figuras 4.1a e 4.1b mostram a seção transversal de um segmento cortado do riser.

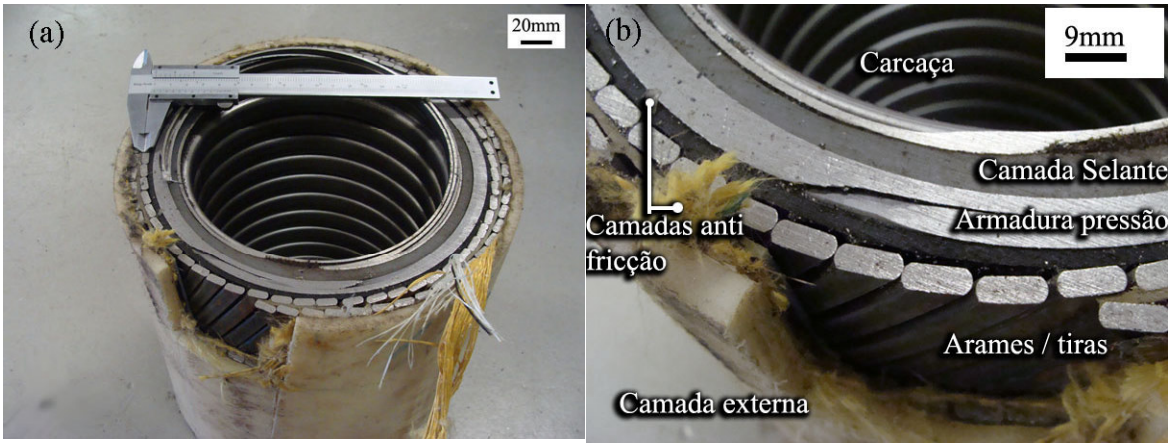

Figura 4.1: Camadas do *riser*, (a) vista geral e (b) vista detalhada.

O *riser* estudado é um tubo flexível do tipo camadas não aderidas e Rough Bore, possuindo a camada mais externa feita de Nylon 6-6. Abaixo dessa camada existe uma malha de Kevlar que impede que a camada de Nylon atrite com a camada da armadura de tração logo abaixo. Os arames da armadura de tração estão dispostos em duas camadas, a mais externa contendo 74 arames e a mais interna contendo 70 arames. Abaixo da

camada das armaduras de tração existe uma outra camada de Nylon 6-6 que funciona como camada estanque, e abaixo dessa existe uma camada de aço AISI 306.

Este *riser*, quando chegou ao LAMEF, já apresentava indícios de corrosão e vários arames haviam sido cortados/rompidos previamente.

4.1.2 Tiras da armadura de tração do riser do Primeiro e Terceiro Grupos de Ensaios

Para o caso deste *riser* de 6 pol, as tiras das armaduras de tração possuem seção retangular de 4mm de espessura por 12mm de largura e são feitas de aço ABNT 1060, conforme pode ser visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição Química das tiras.

Composição química (% massa)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Medida	0,61	0,24	0,84	0,018	0,011	0,04	<0,005
ABNT 1060	0,55 – 0,65	-	0,6 – 0,9	0,03 Max.	0,05 Max.	-	-

A Figura 4.2 mostra a microestrutura de uma das tiras da armadura de tração. Nota-se perlita e ferrita alinhadas na direção da laminação.

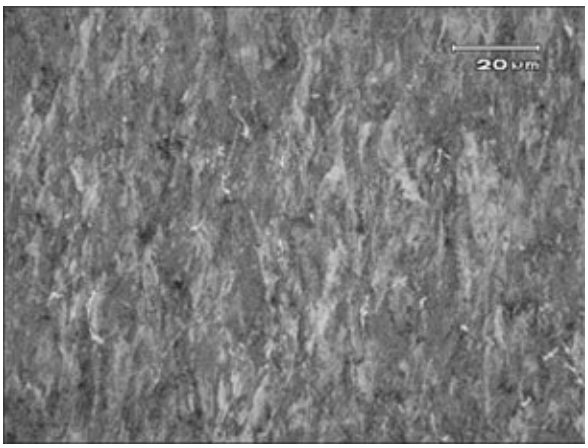

Figura 4.2: Metalografia de um arame da armadura de tração mostrando ferrita e perlita alinhadas preferencialmente de cima pra baixo.

A Tabela 4.2 apresenta as propriedades mecânicas das tiras, que apresentam um grau de encruamento bastante elevado (60%) oriundo da laminação a frio.

Tabela 4.2: Propriedades Mecânicas da tira da armadura de tração.

	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	Dureza (HRC)
Arame do riser	892,4	1430,9	44

4.2 Equipamento e Análise de Emissão Acústica

O sistema de aquisição de sinais e sensores utilizados foram fabricados pela empresa PAC (*Physical Acoustics Corporation*), cujo representante no Brasil é a PASA (*Physical Acoustics South America*).

4.2.1 Equipamento de EA para aquisição de dados

O equipamento PAC Disp 16C foi utilizado em todas medições nos diferentes grupos de ensaio. O Disp 16C é um equipamento de emissão acústica de 16 canais, com uma placa básica de 4 canais na qual são adicionadas outras 3 placas com 4 canais cada uma. Em cada placa foi adicionado também um circuito para aquisição das formas de onda. Como em alguns casos foi feita análise com forma de onda e algumas vezes apenas com os parâmetros de EA, os procedimentos respectivos a cada grupo de ensaio são citados junto aos resultados.

A PAC disponibiliza um programa chamado AEWin para fazer a aquisição dos sinais e tratamento dos dados. Os dados de EA foram analisados nesse *software*, ou foram exportados na forma de arquivos .dat para serem trabalhados nos aplicativos Origin, SPSS e MATLAB.

4.2.2 Sensores de EA utilizados

Foram utilizados dois tipos de sensores:

- R15I-AST: é um sensor ressonante com resposta máxima perto da freqüência de 150kHz (Figura 4.3a). Possui um pré-amplificador embutido ao sensor que dá um ganho de 40dB ao sinal captado;

- WDI-AST: é um sensor de banda larga com resposta máxima numa faixa de freqüência de aproximadamente 20 até 400kHz (Figura 4.3b). Possui um pré-amplificador embutido ao sensor que dá um ganho de 40dB ao sinal captado.

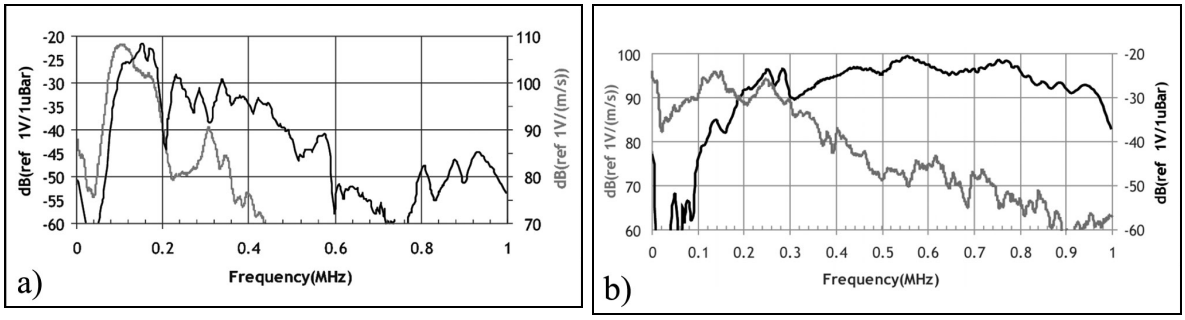

Figura 4.3: Curvas de calibração fornecidas pela PAC para o sensor (a) R15I-AST; (b) WDI-AST.

4.2.3 Acoplamento dos sensores

Foram utilizados prendedores magnéticos fornecidos pela PAC e fitas adesivas para prender os sensores aos corpos de prova. O acoplante utilizado na maioria dos casos foi vaselina sólida. O acoplamento e montagem dos sensores de emissão acústica foi feito com base nas normas ABNT NBR 15242 e ABNT NBR 15269 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICASa,b 2005.) A calibração dos sensores com grafite se deu baseada na ABNT NBR 15269.

Maiores detalhes são dados junto com os resultados de cada grupo de ensaios.

4.3 Sistemas e procedimentos de carregamentos

Foram utilizadas: uma máquina de ensaios universal MTS para os ensaios do primeiro grupo de ensaios, uma máquina de ensaios de tração Instron para os ensaios do terceiro grupo de ensaios e uma treliça criada no LAMEF com um atuador que comporta até 200ton para os ensaios em *risers* em escala real (segundo e quarto grupo de ensaios). Os procedimentos de carregamento são descritos junto com os resultados.

5.0 PRIMEIRO GRUPO DE ENSAIOS

O objetivo do primeiro grupo de ensaios foi levantar os primeiros dados de emissão acústica relativos a um ensaio de tração de tiras retirados da armadura de um *riser* de 6 polegadas de diâmetro. Essas tiras foram entalhados e tentou-se fazer uma comparação entre os tiras para verificar se haveria a possibilidade de estabelecer uma relação entre parâmetros de EA e a área da seção remanescente.

Os resultados do primeiro grupo de ensaios serviram como base de comparação para o segundo grupo, que foi feito em um *riser* na escala real.

5.1 Procedimento Experimental do Primeiro Grupo de Ensaios

Entalhes foram feitos com uma retífica manual Dremmel em tiras (300mm de comprimento, 12mm de largura e 4mm de espessura) retiradas da armadura de tração de um *riser* de 6 polegadas de diâmetro. Foi utilizado um disco de SiC com aproximadamente 1mm de espessura. A Figura 5.1 mostra as tiras entalhadas.

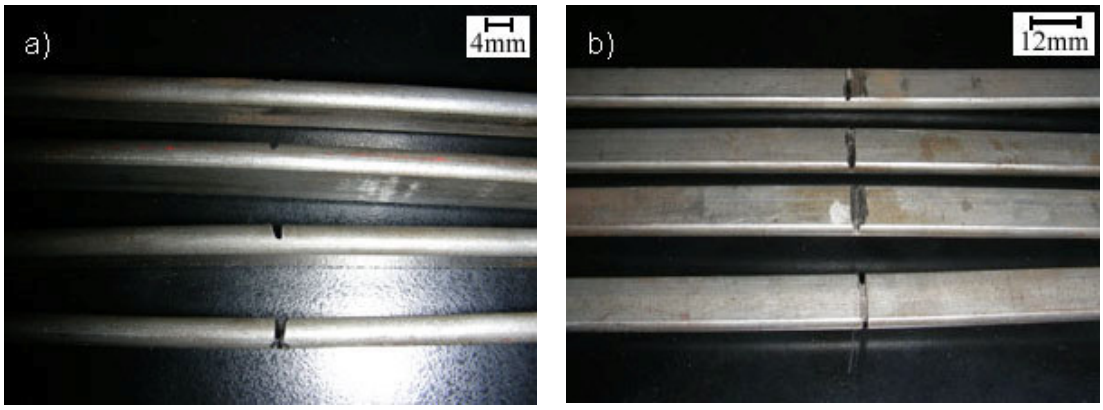

Figura 5.1: Visão geral das amostras entalhadas (a) lateral e (b) superior.

Cada tira foi presa às garras de uma máquina de tração MTS e submetida ao carregamento até a ruptura. A taxa de carregamento foi de aproximadamente 10kN por minuto.

Três sensores ressonantes R15I-AST da PAC foram usados em cada teste, sendo um preso diretamente à tira (canal 1), um preso à garra superior (canal 2) e o último preso à garra inferior da máquina (canal 3), conforme mostram a Figura 5.2a e a Figura 5.2b .

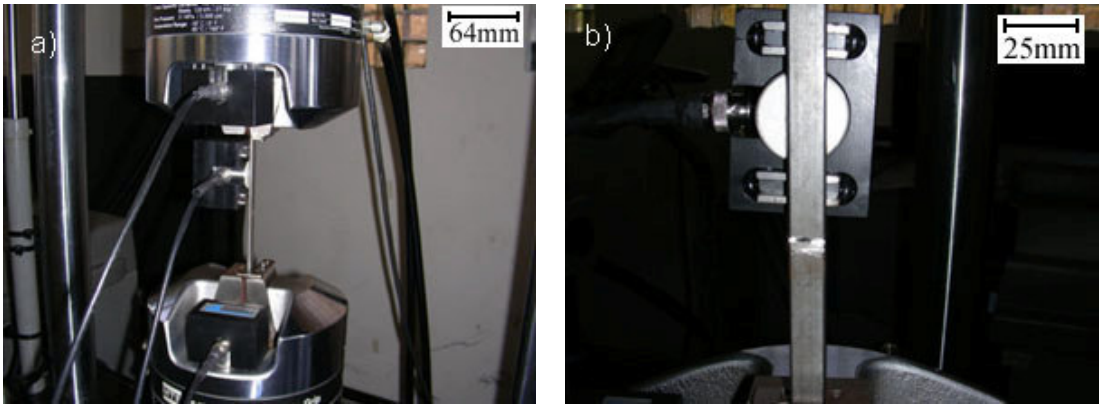

Figura 5.2: Visão geral do sistema de medição (a) Montagem dos sensores de EA e tira na máquina de tração; (b) detalhe mostrando o entalhe (seta).

O limiar de aquisição de EA foi de 40dB e foram adquiridas formas de onda com uma freqüência de aquisição de 1MSPS. Os parâmetros de tempo de aquisição foram mantidos no padrão do equipamento (PDT = 200μs, HDT = 800μs e HLT = 1000μs).

Para se calcular a área reduzida pelos cortes com a retífica, as tiras rompidas foram levadas a uma lupa de baixo aumento e a área foi medida usando-se o *software Image Tools*. UTHSCSA (*developed at the University of Texas Health Science Center at San Antonio, Texas and available from the Internet by anonymous FTP from maxrad6.uthscsa.edu*) Primeiramente selecionou-se uma área correspondente à toda a seção da tira e contou-se a quantidade de *pixels* correspondente àquela área. Depois, selecionou-se a área correspondente à área não entalhada pela retífica e contou-se a quantidade de pixels correspondente à nova área. Dividindo-se o número de *pixels* correspondente à segunda área pelos da primeira, obteve-se a redução de seção da tira.

As tiras rompidas foram levadas a uma lupa de baixo aumento e a um MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) da Philips para análise das fraturas.

5.2 Resultados do Primeiro Grupo de Ensaios

Os entalhes feitos nas tiras resultaram em quatro reduções de seção diferentes. As áreas das seções remanescentes foram medidas digitalmente e resultaram em 12%, 37%, 60% e 82% da área original, como pode ser visto nas Figuras 5.3a – 5.3d.

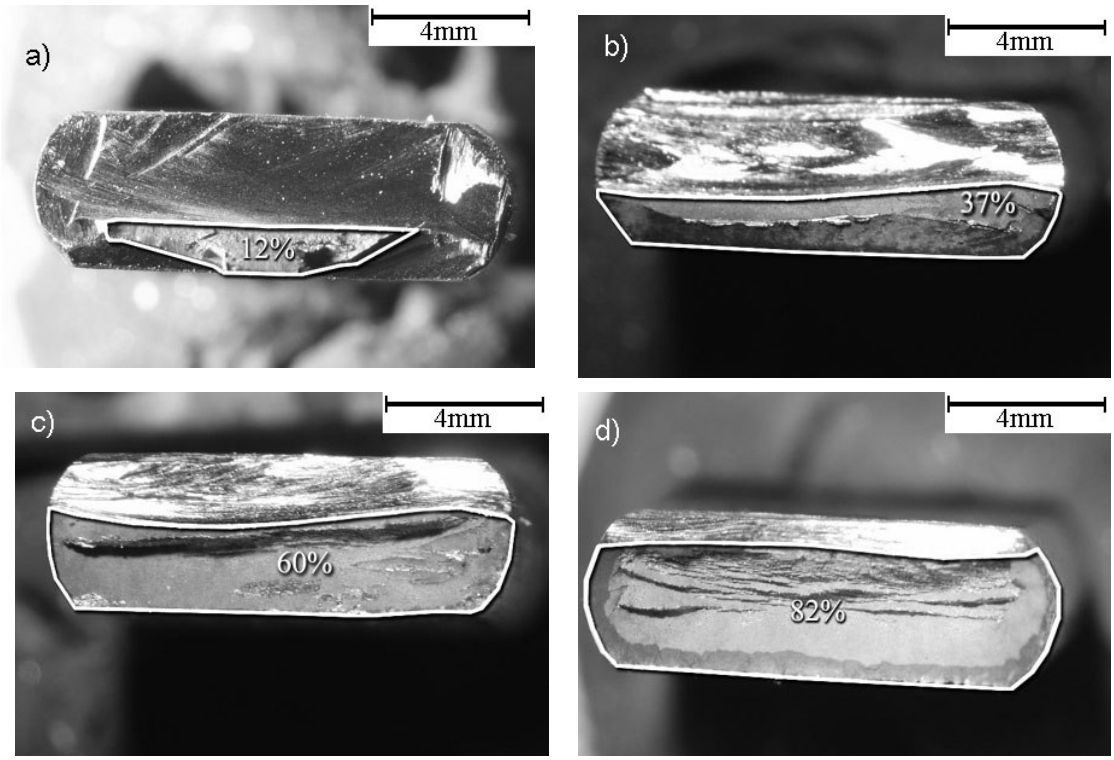

Figura 5.3: Áreas remanescentes das seções resistentes após o entalhe (a) a menor área, (b) a segunda menor área, (c) a segunda maior área e (d) a maior área.

Os sensores colocados nas garras da máquina de tração detectaram os sinais acústicos associados à ruptura (que ocorreu perto de 10s). No entanto houve clara diferença na quantidade de sinais que cada sensor captou, como mostrados nas Figuras 5.4 a 5.7. Enquanto ocorreu um aumento exponencial da quantidade de sinas por tempo perto do momento da ruptura para alguns casos (na Figura 5.4 para os canais 1 e 2), em outros casos o momento da ruptura não mostra um aumento considerável na quantidade de sinais (como é o caso do canal 2 da Figura 5.7).

Os gráficos de Amplitude x Tempo mostram, para todos os sensores em todos os casos, sinais de alta amplitude (99dB) no momento da ruptura da tira. Observa-se também que o sensor do canal 1, que estava preso diretamente à tira, mostra diversos sinais de média amplitude durante o ensaio, associados à deformação da tira. Acredita-se que os sensores dos canais 2 e 3 tiveram esses sinais atenuados e misturados aos ruídos da garra.

Os gráficos de Energia x Tempo são os que mais claramente mostram o evento de ruptura, já que os sinais possuem altos valores de energia que destoam do resto do ensaio.

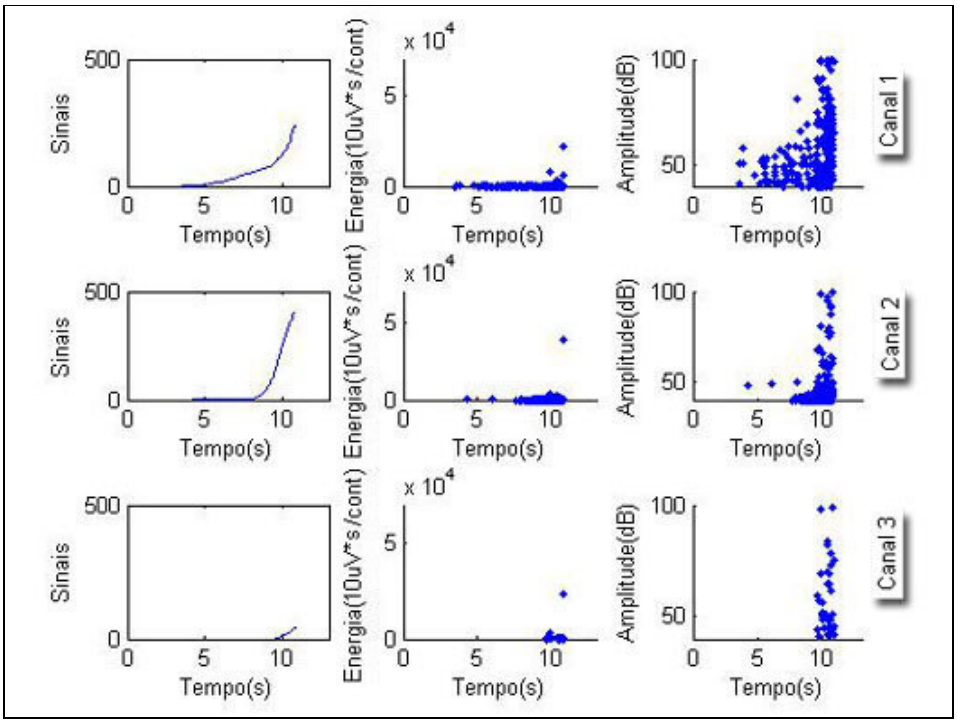

Figura 5.4: Emissão acústica da tira com área de 12% da seção original (ruptura perto de 10s)

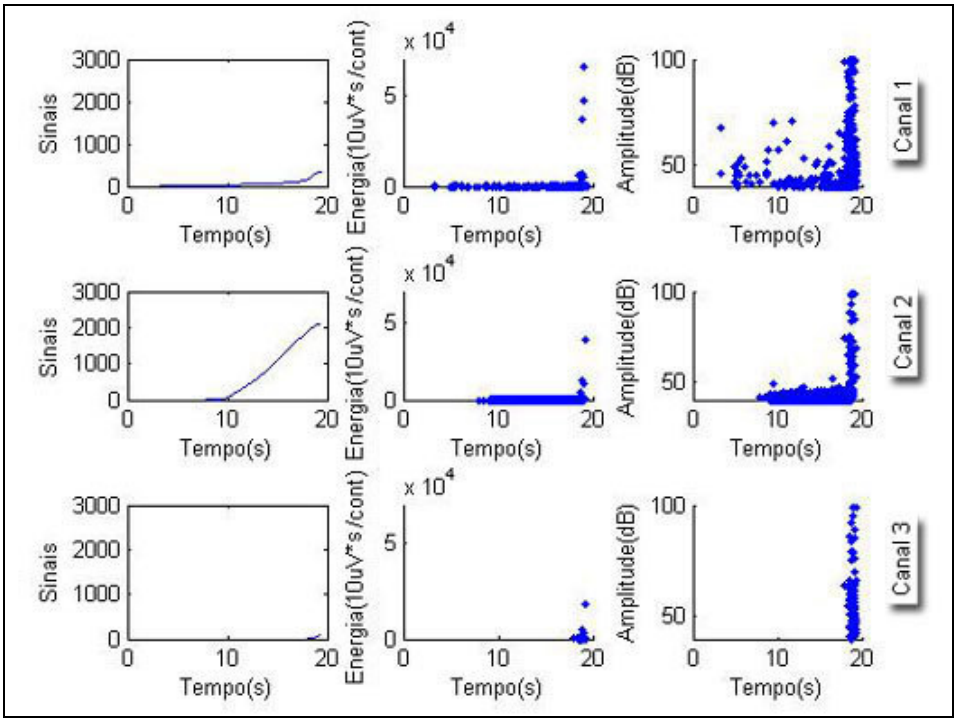

Figura 5.5: EA da tira com área de 37% da seção original (ruptura perto de 20s).

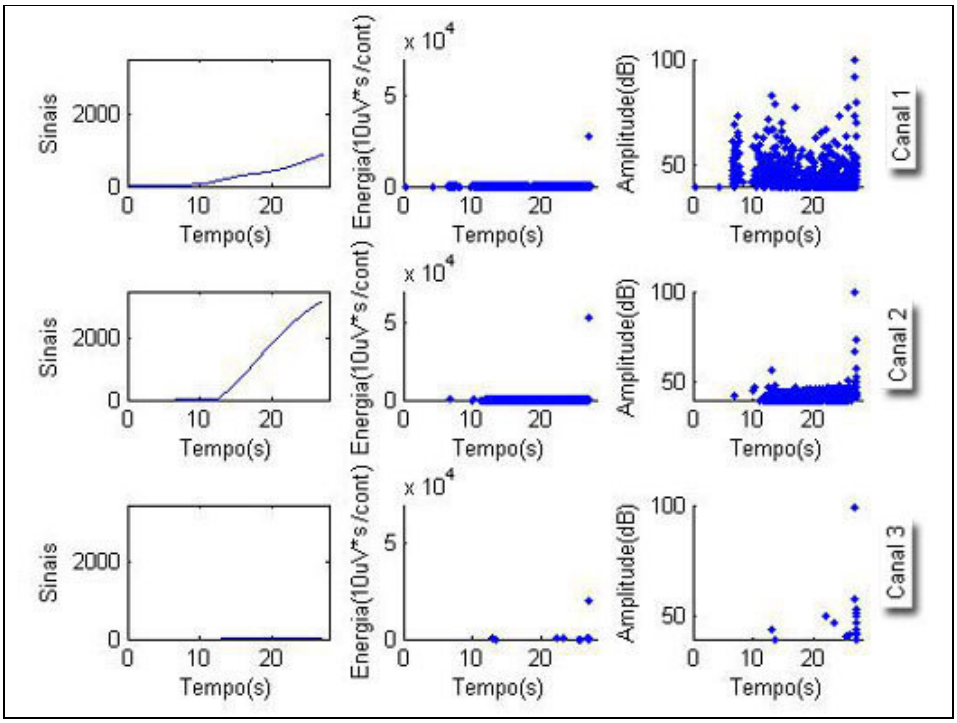

Figura 5.6: EA da tira com área de 60% da seção original (ruptura perto de 28s).

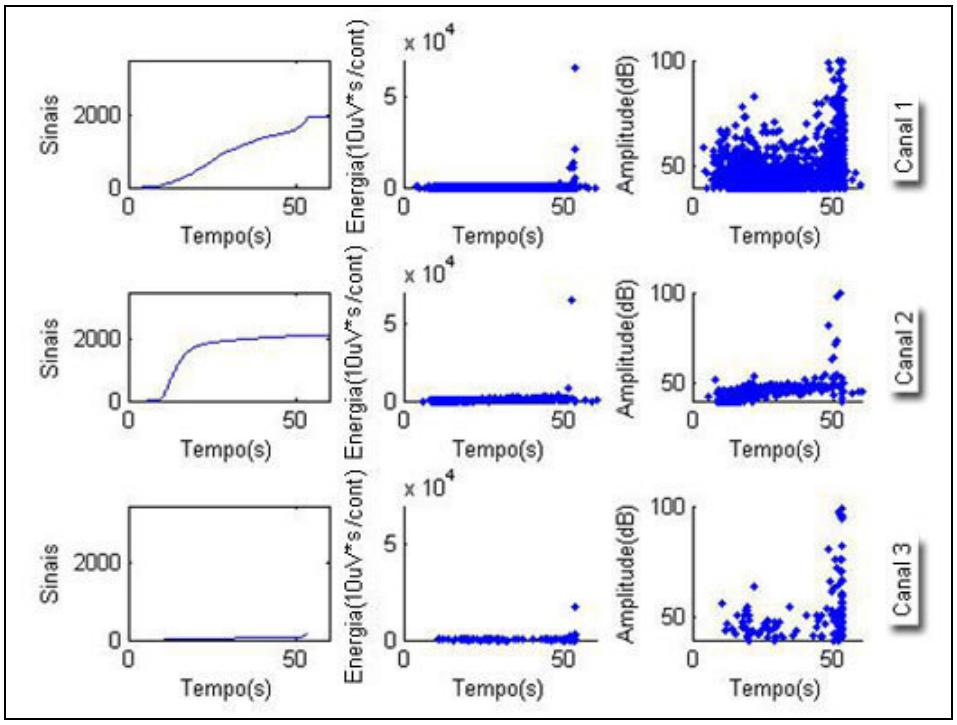

Figura 5.7: EA da tira com área de 82% da seção original (ruptura perto de 50s).

Escolheu-se dar maior atenção apenas ao canal 1 e não aos demais, pois foi considerado que o canal 1 teria a resposta acústica mais livre de ruídos. Isso se deve ao fato

de ele estar mais próximo do entalhe, o que faz com que a atenuação seja menor e também dificulta a chegada de sinais mecânicos das garras.

As curvas de carregamento para as tiras com seção reduzida são apresentados nas Figuras 5.8 a 5.11 juntamente com os sinais acústicos adquiridos pelo sensor do canal 1.

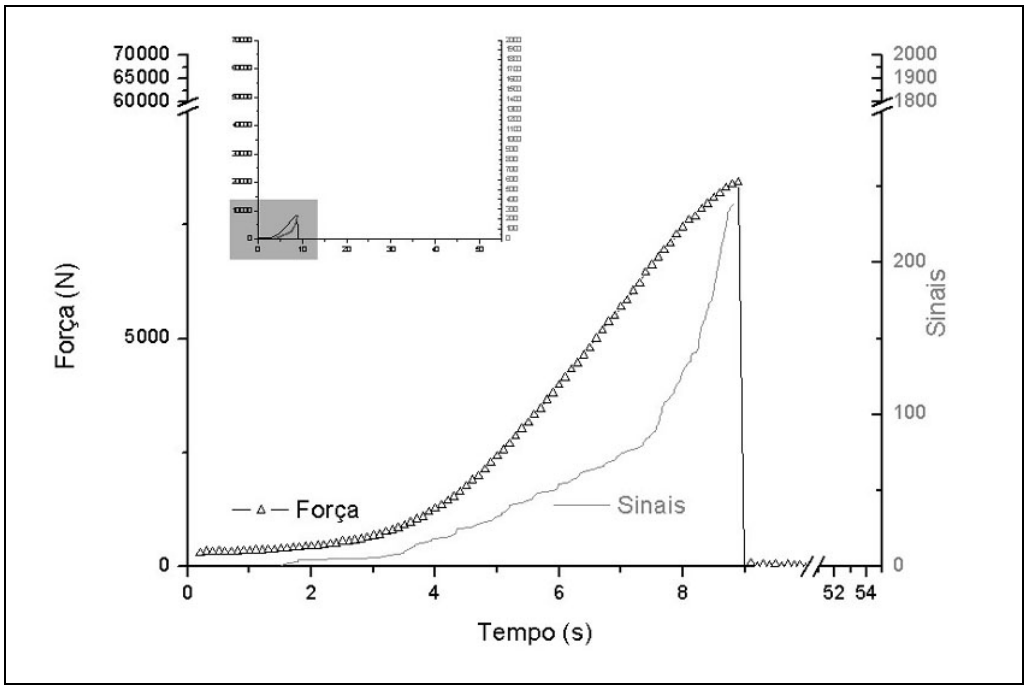

Figura 5.8: Carregamento da tira com seção de 12% da área original.

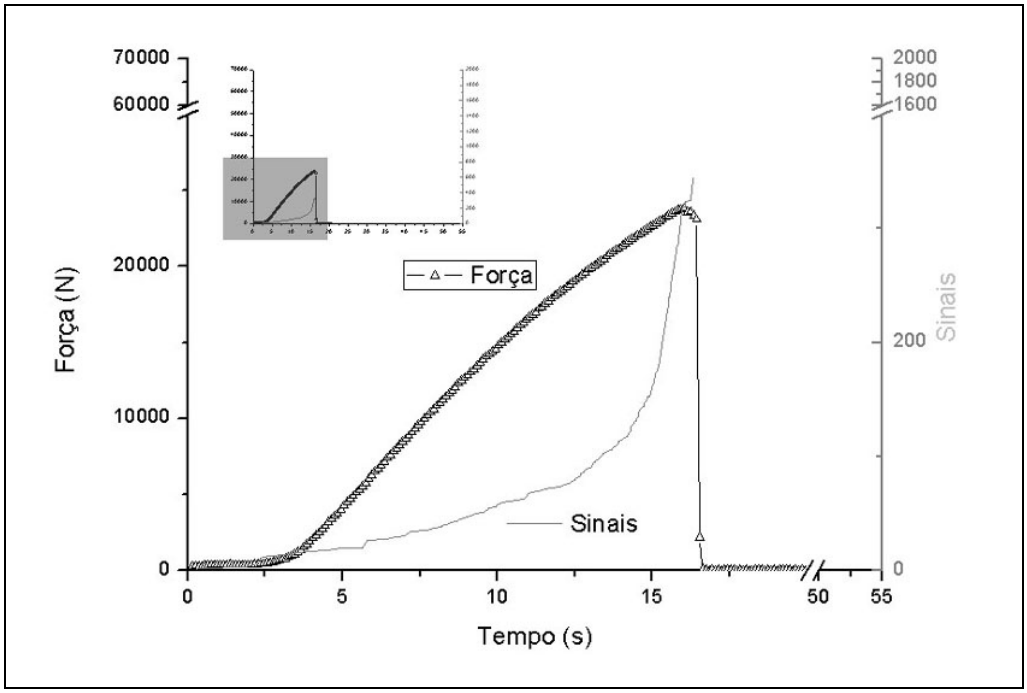

Figura 5.9: Carregamento da tira com seção de 37% da área original.

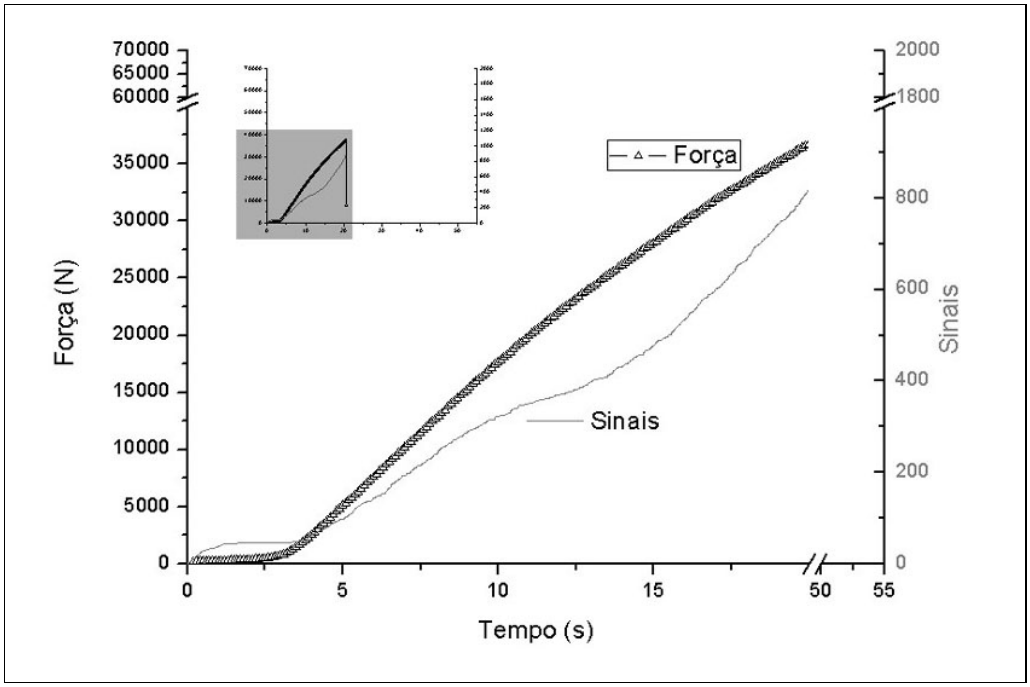

Figura 5.10: Carregamento da tira com seção de 60% da área original.

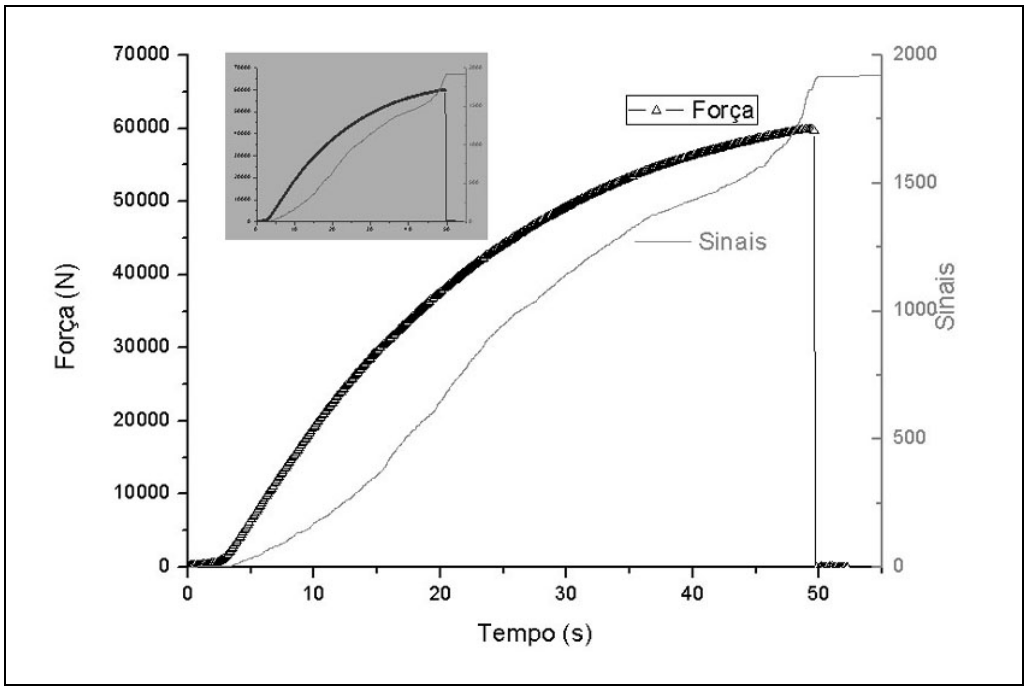

Figura 5.11: Carregamento da tira com seção de 82% da área original.

A tira com 82% de seção remanescente foi a que resultou na maior área abaixo da curva (energia elástica armazenada), e a tira com 12% da seção original foi a que resultou na menor área abaixo da curva, assim como esperado.

Nota-se que nas Figuras 5.8 e 5.9 ocorre um aumento acentuado na taxa de sinais de emissão acústica logo antes da ruptura. Isso não é observado nas Figuras 5.10 e 5.11. Uma possível explicação é que nas tiras com seção maior ocorre maior quantidade de rasgamento do material, o que acabaria gerando maior número de sinais de baixa energia e de uma forma mais contínua durante o teste. Verifica-se isso na Tabela 5.1, que mostra que, mesmo que as seções maiores tenham uma maior quantidade de sinais, nota-se que percentualmente existe uma tendência de mais sinais com baixas energias.

Tabela 5.1: Distribuição das Energias PAC em blocos para cada tira entalhada.

Seção Remanescente 12%		
Energia(un)	Freqüência	% do Total
0 - 1	123	51.46
2 - 10	49	20.50
11 - 100	45	18.83
101 - 1000	15	6.28
1001-10000	6	2.51
10.001 +	1	0.42
Total	239	100.00

Seção Remanescente 37%		
Energia(un)	Freqüência	% do Total
0 - 1	202	58.55
2 - 10	68	19.71
11 - 100	43	12.46
101 - 1000	21	6.09
1001-10000	8	2.32
10.001 +	3	0.87
Total	345	100.00

Seção Remanescente 60%		
Energia(un)	Freqüência	% do Total
0 - 1	717	81.20
2 - 10	131	14.84
11 - 100	30	3.40
101 - 1000	4	0.45
1001-10000	0	0.00
10.001 +	1	0.11
Total	883	100.00

Seção Remanescente 82%		
Energia(um)	Freqüência	% do Total
0 - 1	1438	74.86
2 - 10	341	17.75
11 - 100	106	5.52
101 - 1000	25	1.30
1001-10000	6	0.31
10.001 +	5	0.26
Total	1921	100

A Tabela 5.2 mostra um resumo dos sinais de ruptura para os ensaios. Os números marcados em negrito representam valores que atingiram o fundo de escala do aparelho.

Tabela 5.2: Resumo dos resultados de EA dos ensaios.

	Canal 1 (sensor na tira)			Canal 2(sensor na garra)			Canal 3 (na garra)		
Seção	Contagem	Amplitude (dB)	Energia (un)	Cont.	Amp. (dB)	Ener. (un)	Cont.	Amp (dB)	Ener. (un)
12%	250	**99**	22000	400	**99**	39000	40	**99**	24000
37%	350	**99**	**65535**	2000	**99**	37000	90	**99**	18000
60%	900	**99**	27000	3000	**99**	55000	20	**99**	20000
82%	2000	**99**	**65535**	2000	**99**	**65535**	150	**99**	17000

Analisando-se a Tabela 5.2 não é possível se verificar nenhuma relação da energia e/ou amplitude com o aumento da área da seção resistente. Supostamente, quanto maior a

área resistente, maior a energia que deveria ser liberada na ruptura. Isso ocasionaria um sinal sonoro de maior amplitude e maior energia. Infelizmente a amplitude sempre atingiu o fundo de escala, e a energia também atingiu fundo de escala em alguns casos.

A próxima análise realizada para estabelecer uma relação entre seção e energia foi feita da seguinte maneira. A energia de todos os sinais que chegaram no sensor do canal 1 no momento da ruptura foi somada para cada um dos ensaios, mas novamente não se encontrou nenhuma relação. Isso também foi feito para os parâmetros amplitude e contagens, com o mesmo resultado.

Nessa época, ainda não se tinha a idéia de que a energia podia estar sendo medida de uma maneira errônea, como será visto no Grupo de Ensaios 3 (Capítulo 7), então se considerou que a falta de relação poderia ser devida ao fato dos entalhes não terem a mesma forma geométrica. Baseado nisso, foi decidido que, mais tarde, seriam feitos novos ensaios com indentações na forma de trincas de fadiga.

As Figuras 5.12 - 5.15 apresentam as superfícies de fratura assim como observadas na lupa e no MEV. O entalhe está sempre à esquerda das figuras, sendo seguido por uma zona onde houve fratura mista de coalescimento de microcavidades e clivagem. A região mais a direita das fraturas é a região de rasgamento final.

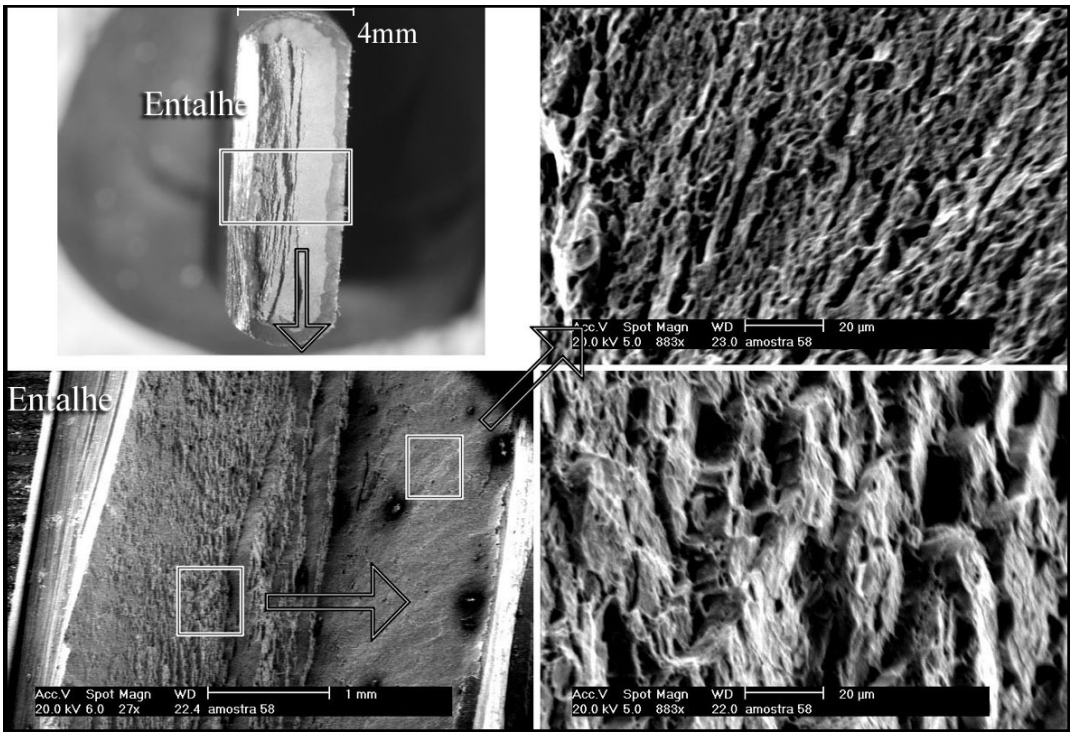

Figura 5.12: Menor dos entalhes, 82% de seção restante.

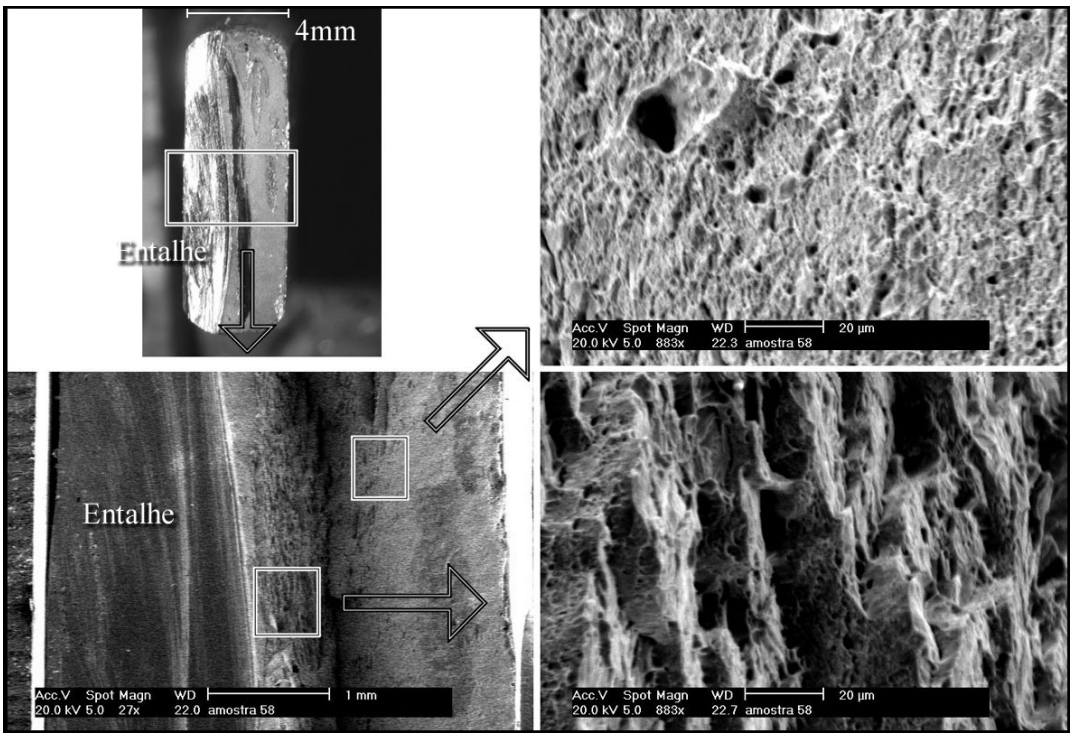

Figura 5.13: Entalhe médio, 60% de área de seção restante.

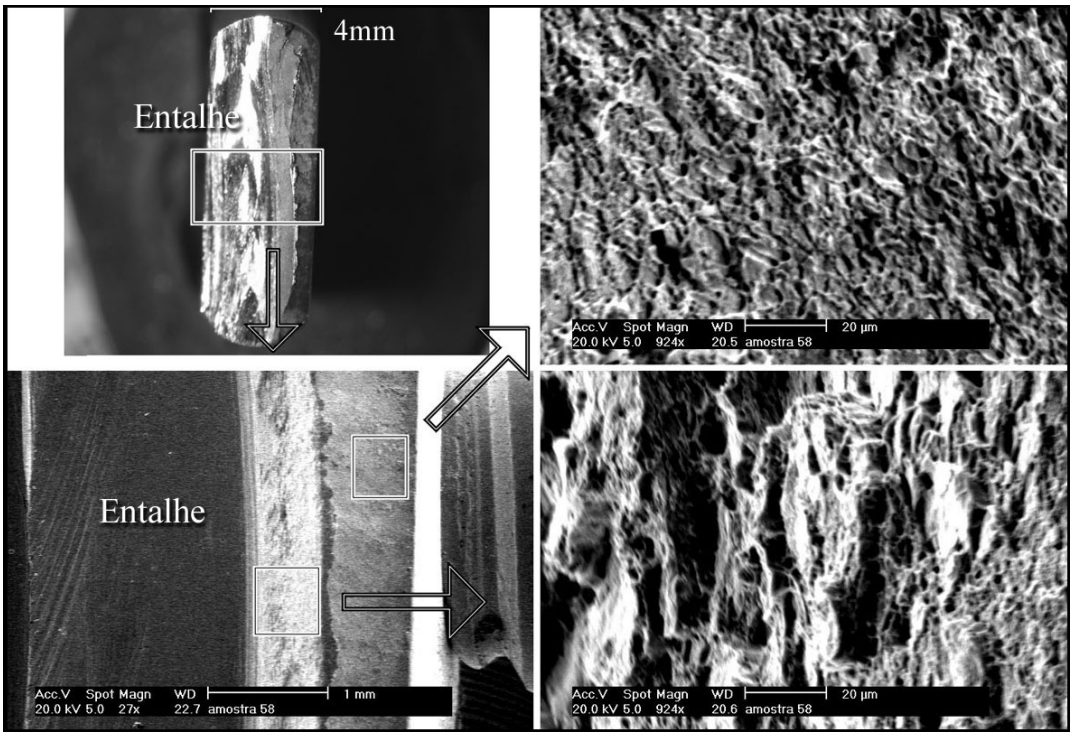

Figura 5.14: entalhe grande, 37% de seção restante.

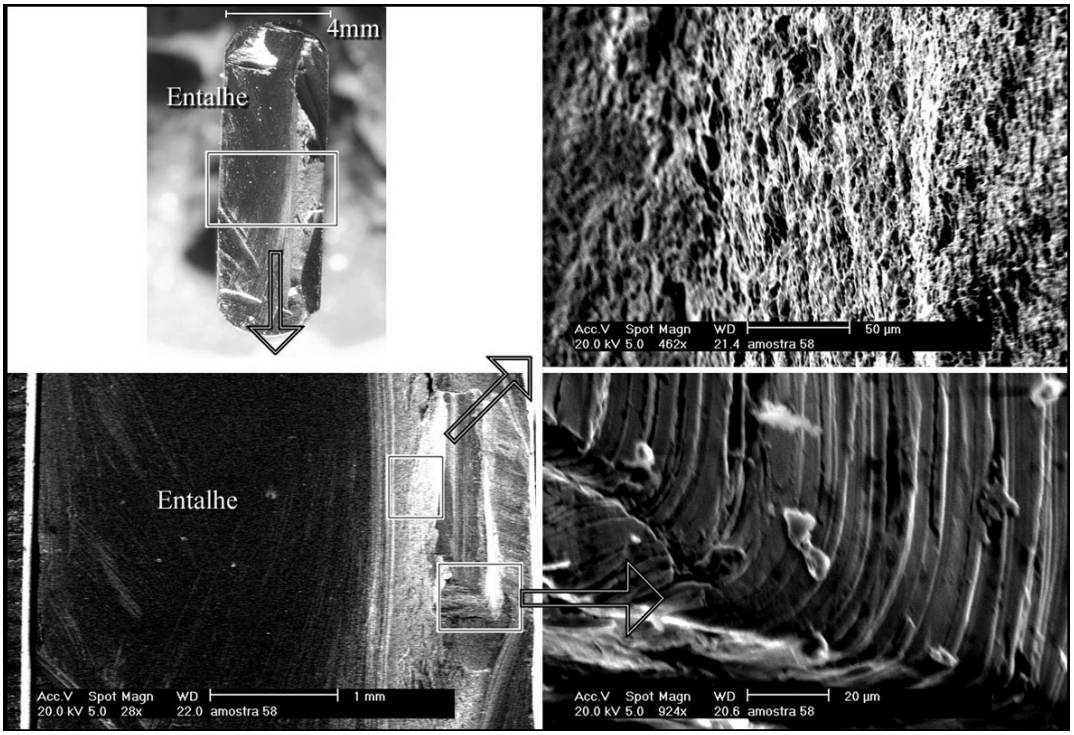

Figura 5.15: Maior dos entalhes, 12% de seção restante.

Nota-se que os entalhes não foram controlados e portanto não é razoável se tentar obter relações de amplitude e/ou energia de emissão acústica com parâmetros como K_I da mecânica da fratura, já que a geometria dos entalhes apresentou grandes variações. Esse tipo de comparação exigiria que os entalhes todos tivessem a forma de unhas.

A Figura 5.15 apresenta uma fratura bastante diferenciada das outras, já que três entalhes foram feitos, o primeiro começando da esquerda para a direita, o segundo começando do canto superior direito e o último começando no canto inferior direito da amostra. O encontro das frentes de propagação gerou uma fratura que parece ter a forma de um retângulo, mas que efetivamente não representa nenhuma mudança nos mecanismos da falha.

5.3 Conclusões parciais

Assim como desejado, foram obtidas quatro tiras com diferentes seções resistentes. No entanto, a geometria do entalhe não foi sempre constante e não se teve o cuidado de garantir que a ponta do entalhe sempre tivesse o mesmo raio de curvatura. Isso pode ter ocasionado a falta de relação entre os parâmetros medidos de EA e a seção resistente.

Os sensores montados nas garras adquiriram os sinais relacionados à ruptura da tira, mas eles mostraram maior nível de ruído quando comparados com o sensor montado diretamente sobre a tira. É necessário algum tipo de modificação para que alguns parâmetros dos sensores utilizados não atinjam os seus fundos de escala. Possíveis soluções incluem: a diminuição do ganho do equipamento (o que não é possível fazer via *software* AEWin da PAC como se observou no Capítulo 7.0 – Terceiro Grupo de Ensaios), uso de pré-amplificadores que tenham um seletor de ganho e sejam externos ao sensor ou a colocação de materiais amortecedores entre o sensor e a tira.

Obteve-se sucesso em levantar dados de emissão acústica para a comparação com o ensaio do *riser* na escala real e era esperado que os sinais do próximo ensaio tivessem menor amplitude e energia, já que os sensores seriam montados na terminação e não diretamente na tira.

É necessária a implementação de filtros, por exemplo de energia, para diminuir a grande quantidade de sinais de EA para serem analisados.

6.0 SEGUNDO GRUPO DE ENSAIOS

O objetivo do segundo grupo de ensaios foi monitorar, através da EA, um *riser* em escala real sob tração. As tiras da armadura de tração foram entalhadas de modo a facilitar a sua quebra. Desejava-se montar sensores em posições diferentes no *riser* e verificar se todos os sensores eram capazes de detectar a ruptura, dando maior enfoque aos sensores colocados nas terminações.

6.1 Procedimento Experimental do Segundo Grupo de Ensaios

Um *riser* com 6 polegadas de diâmetro e aproximadamente 6m de comprimento foi montado em uma treliça (Figura 6.1) para ser carregado em tração. O *riser* possuía duas terminações, uma original do fabricante TECHNIP e uma terminação feita na COPPE.

Figura 6.1: *Riser* de 6 polegadas de diâmetro montado na treliça.

A Figura 6.2 mostra as tiras da armadura de tração desse *riser* sendo entalhadas com um disco de SiC, de aproximadamente 1mm de espessura, montado em uma retifica manual Dremmel. As profundidades das indentações não foram controladas.

Figura 6.2: Entalhes feitos nas tiras com uma retífica manual Dremmel.

Foram distribuídos 15 sensores ressonantes R15I-AST da PAC ao longo do corpo de prova. Destes, 3 sensores (canais 1, 2 e 3) foram colocados no conector da COPPE, 3 sensores (canais 13, 15 e 16) foram colocados na capa polimérica do *riser*, 2 sensores (canais 11 e 12) foram colocados diretamente nas tiras nos locais onde foram abertas janelas na capa polimérica, 5 sensores (canais 5, 6, 7, 8 e 9) foram colocados no conector original, 1 sensor foi colocado no atuador (canal 10) e 1 sensor (canal 4) foi colocado na treliça, conforme esquema na Figura 6.3. As Figuras 6.4 e 6.5 mostram alguns dos sensores de emissão acústica e sensores de outras técnicas montados no *riser*.

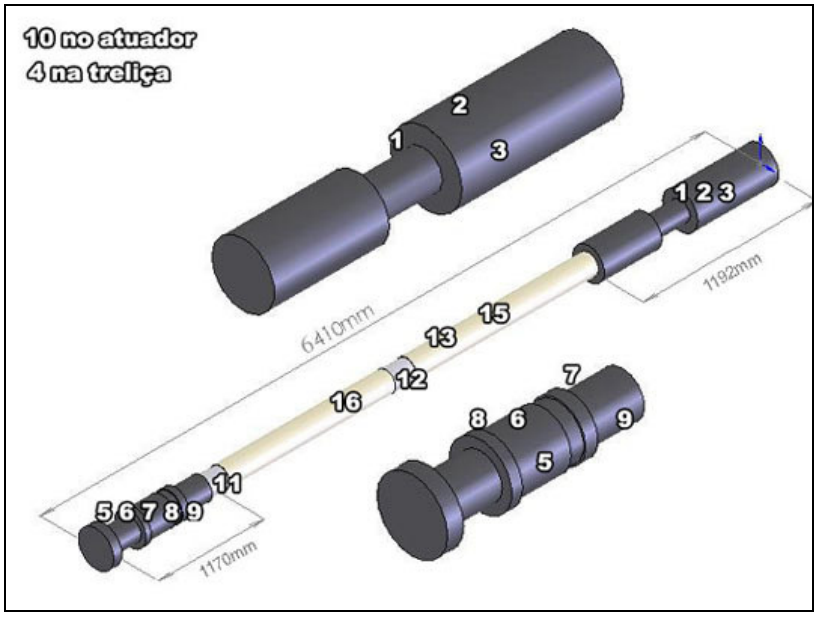

Figura 6.3: Desenho esquemático mostrando a disposição dos sensores no *riser*.

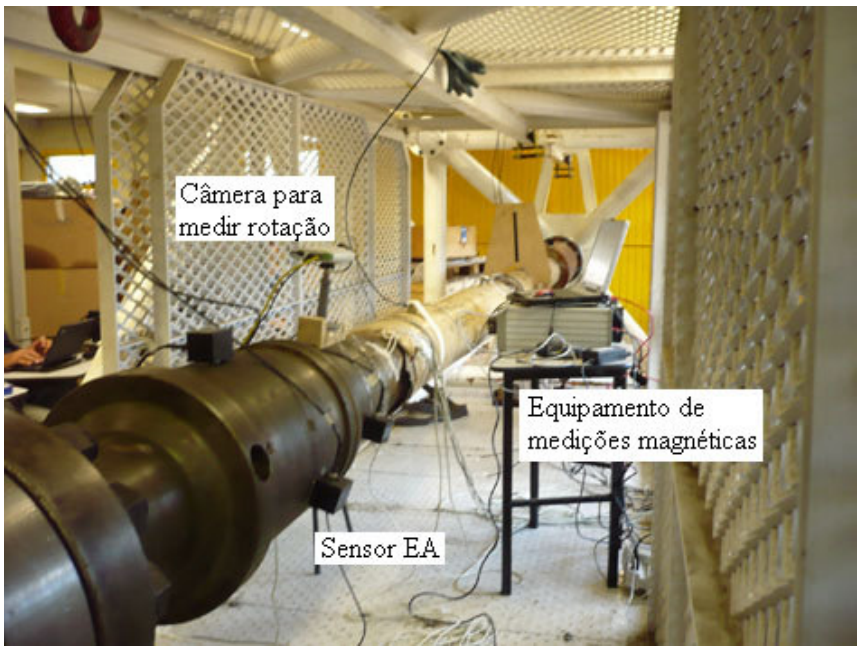

Figura 6.4: Sensores de EA montados no conector do *riser*, câmera montada no *riser* para medir rotação e aparelho 3MA para medições magnéticas de tensão nas tiras.

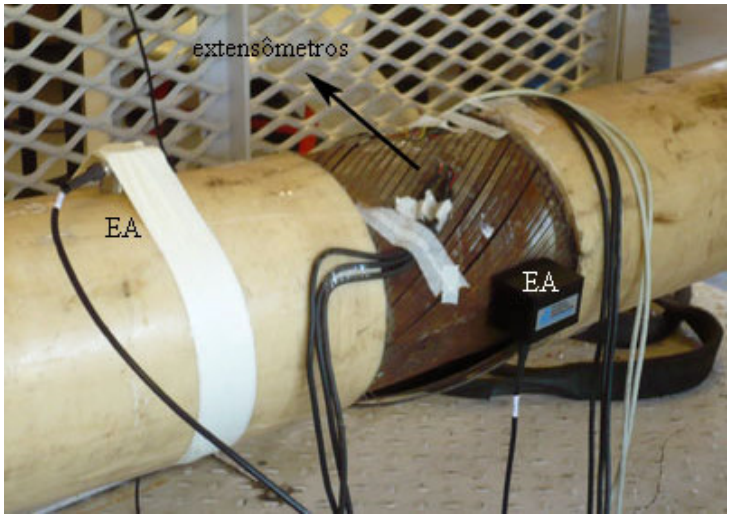

Figura 6.5: Sensores de emissão acústica montados diretamente nas tiras do riser e sobre a capa polimérica do riser.

A calibração dos sensores de EA foi feita de acordo com norma ABNT NBR 15242. A Tabela 6.1 indica a resposta de todos os sensores à calibração. Os sensores dos canais 2 e 8 precisaram ser recolocados pois apresentaram uma média menor do que 90dB de resposta, e uma nova calibração foi feita. No caso do sensor do canal 15 o grafite foi quebrado na tira mais próxima do sensor, já que o sensor estava em cima da camada polimérica. Pretendia-se ter uma idéia de quanto a camada polimérica atenuava a medição.

Tabela 6.1: Calibração dos sensores do ensaio de EA no primeiro *riser*.

Canal	Medição1	Medição2	Medição3	Média1	Medição4	Medição5	Medição6	Média2
2	88	90	90	89	91	92	93	92
1	95	93	94	94	-	-	-	-
3	90	91	91	91	-	-	-	-
4	90	90	91	90	-	-	-	-
12	93	93	92	93	-	-	-	-
15	97	98	99	98	-	-	-	-
7	91	99	90	93	-	-	-	-
16	99	99	99	99	-	-	-	-
11	94	91	92	92	-	-	-	-
9	92	88	90	90	-	-	-	-
6	91	91	97	93	-	-	-	-
5	95	95	96	95	-	-	-	-
10	94	93	91	92	-	-	-	-
8	87	84	82	84	90	92	92	91
15*	46	47	48	47	-	-	-	-

* Sensor em cima da camada polimérica

O limiar utilizado para adquirir os sinais de EA foi de 45dB, e os parâmetros temporais de aquisição foram: PDT 200, HDT 800 e HLT 1000μs. As formas de onda foram adquiridas com uma taxa de amostragem de 1MSPS durante 4ms.

Os resultados de emissão acústica foram filtrados em 500 unidades de Energia PAC, devido ao grande número de sinais com essa energia. A filtragem é necessária para diminuir a quantidade de dados, de modo que seja mais rápido carregar os arquivos. Em casos de fadiga, alguns arquivos com tamanhos de 400Mb demoram até 1-2 horas para serem totalmente carregados.

6.2 Resultados do Segundo Grupo de Ensaios

As Figuras de 6.6 - 6.15 mostram as curvas de carregamento e a atividade acústica para o ensaio do *riser* em escala real, com base nos diferentes parâmetros de EA. Cada ponto do gráfico representa um sinal de EA que chegou em algum dos sensores. Todos os sinais coletados (previamente filtrados) de todos os sensores aparecem nas figuras. Os círculos cinzas indicam horários em que ocorreram sinais sonoros audíveis de alta amplitude, que pareciam ser rupturas de tiras. Na maioria dos casos, foi verificada a ruptura da tira. A exceção foi o segundo ponto da curva do dia 7/5/2008, que se refere a um som na treliça e que só foi pego pelo canal 10. O único sinal de alta amplitude do dia 6/5/2008 foi perdido porque se teve problemas na aquisição do sinal com interrupção do programa. Não se sabe se foi um som da treliça ou se foi uma ruptura de tira.

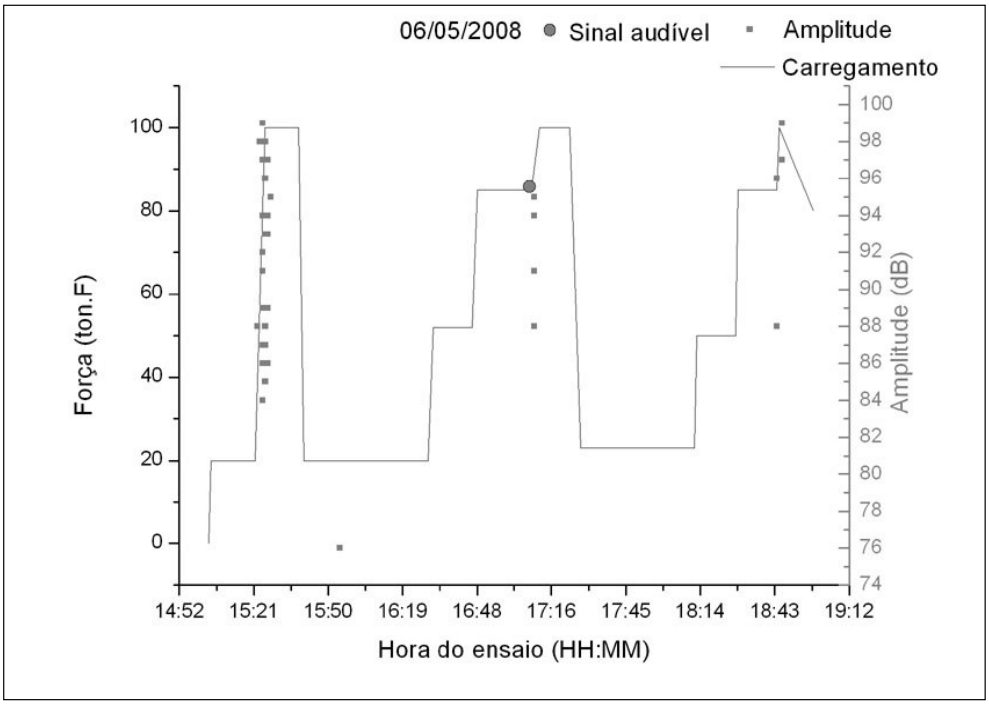

Figura 6.6: Carregamento e resposta em Amplitude de EA para o dia 6 / 5 / 2008.

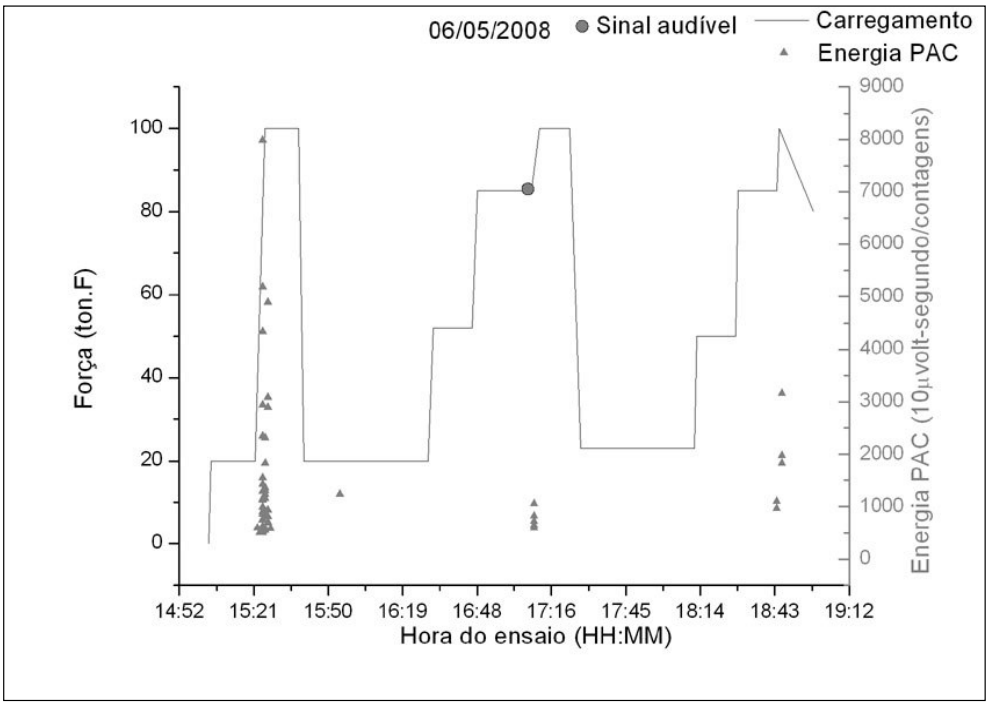

Figura 6.7: Carregamento e resposta em Energia PAC de EA para o dia 6 / 5 / 2008.

A Figura 6.6 mostra uma grande incidência de sinais acústicos de amplitudes variadas aproximadamente às 15:21. Esses sinais podem estar relacionados à acomodação das tiras, camadas internas e das próprias terminações, já que foi a primeira vez que se

carregou o *riser* até 100ton. Nota-se claramente que, no segundo carregamento, a quantidade de sinais já diminuiu bastante, devido à acomodação dos materiais.

No carregamento final do dia 6/5/2008, horário de 18:43 (Figura 6.7), aparecem alguns sinais de alta amplitude que correspondem a uma energia que se definiria como média, mais alta do que as 500 unidades usadas no filtro, mas não tão alta quando comparadas com os resultados obtidos para as rupturas do dia 7 (Figura 6.12), que mostram sinais com mais de 5000 unidades de energia.

O parâmetro ASL (Figura 6.8) mostra um comportamento semelhante ao encontrado para Amplitude e Energia: muitos sinais de valores altos no primeiro carregamento (70dB), e alguns sinais de médio valor (50dB) nos carregamentos subsequentes.

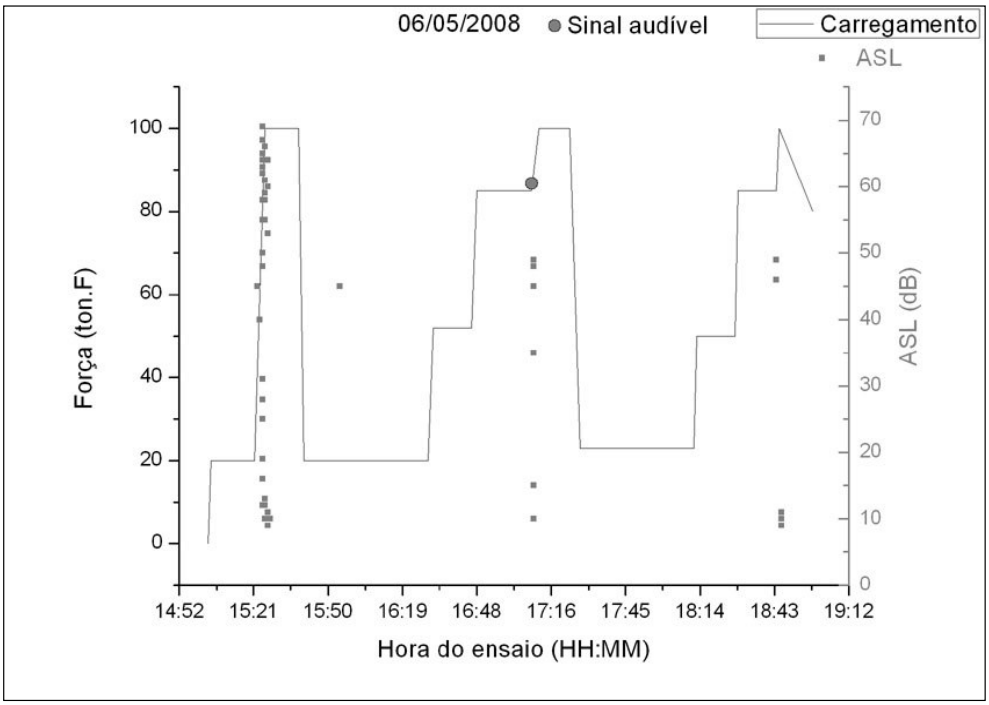

Figura 6.8: Carregamento e resposta em ASL de EA para o dia 6 / 5 / 2008.

O parâmetro Duração (Figura 6.9) apresenta valores altos no primeiro carregamento e valores mais baixos nos carregamentos posteriores, assim como ocorreu com o ASL.

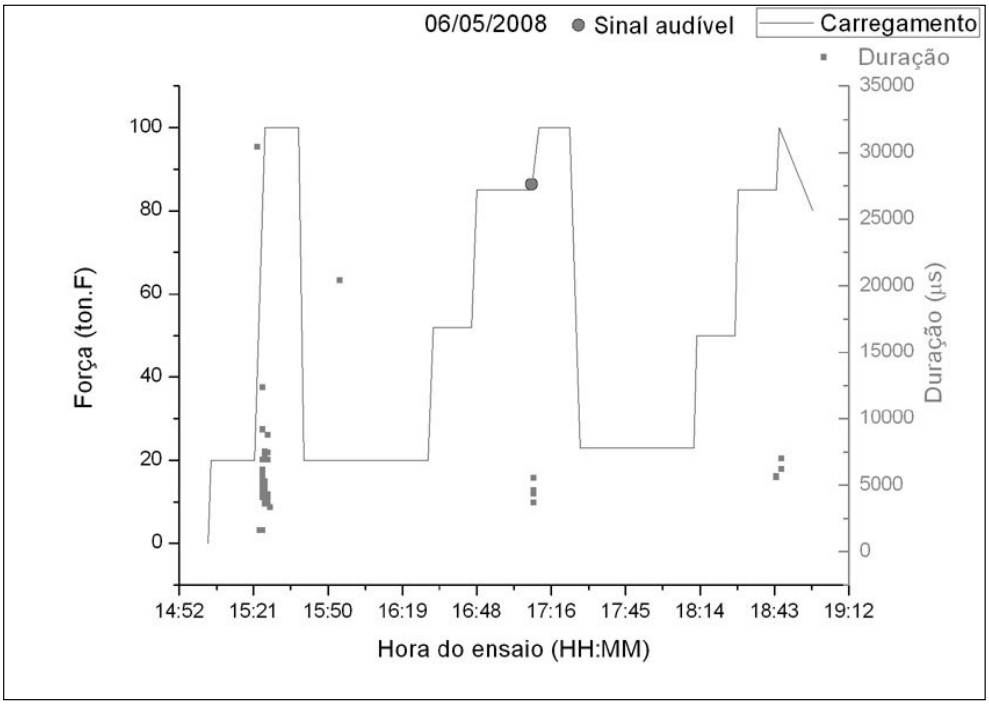

Figura 6.9: Carregamento e resposta em Duração de EA para o dia 6 / 5 / 2008.

A Figura 6.10 apresenta Tempos de Subida extremamente altos durante o primeiro carregamento, cogitando-se que pode ter ocorrido erro na medição desse parâmetro, já que sinais de fratura apresentam baixos Tempos de Subida (menores que 200µs).

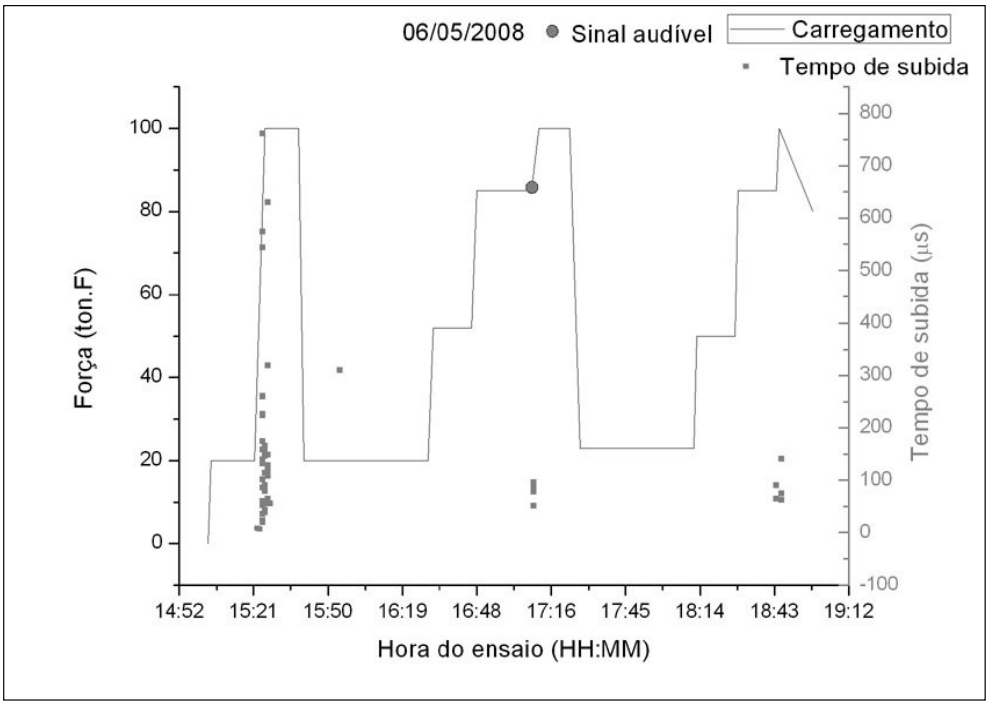

Figura 6.10: Carregamento e resposta em Tempo de Subida de EA para o dia 6 / 5 / 2008.

A Figura 6.11 apresenta os resultados de amplitude para o segundo dia de ensaio, mostrando cinco rupturas de tiras (dois sinais sonoros perto de 12:30 mas correspondem a apenas 1 ruptura). Observa-se sinais de alta amplitude (99dB) para todas as ocasiões em que houve ruptura de tira e para a primeira vez em que se chegou ao carregamento máximo, 100 toneladas. Um fato interessante é que apesar das últimas 3 tiras terem rompido em cargas diferentes, provavelmente devido à diferenças no tamanho dos entalhes e redistribuição de cargas, os resultados são bastante similares. Todas as três apresentaram sinais perto de 90dB e sinais mais fracos que correspondem aos sensores que estavam mais longe da janela onde foram feitos os entalhes (canais 1,2 e 3).

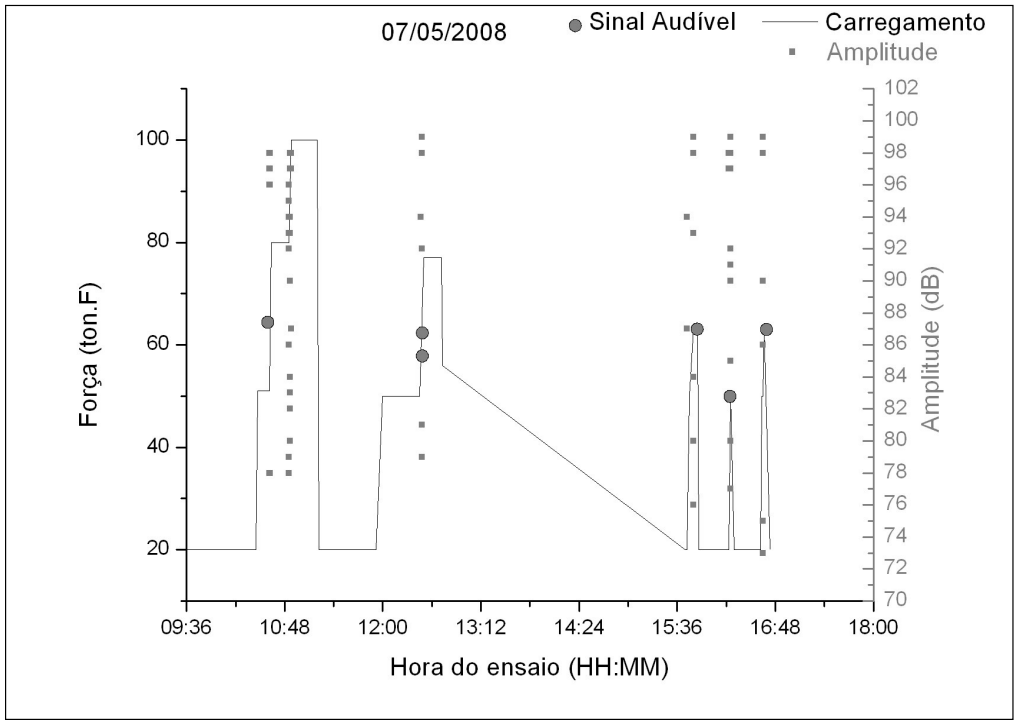

Figura 6.11: Carregamento e resposta em Amplitude de EA para o dia 7 / 5 / 2008.

A energia correspondente aos sinais de ruptura (Figura 6.12) apresentou em geral valores mais altos do que os obtidos nos ensaios do dia 6/5/2008. O primeiro evento resultou em sinais de energia máxima em torno de 5000 unidades, enquanto que os últimos eventos que correspondem a rupturas verificadas resultaram em energias máximas próximas a 12000 unidades.

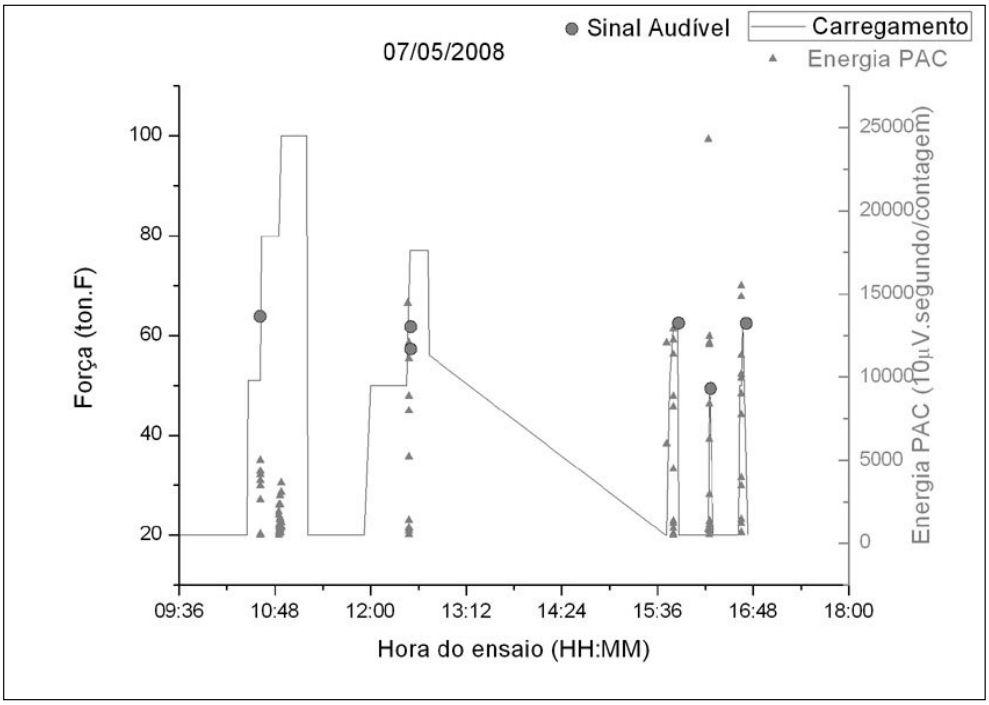

Figura 6.12: Carregamento e resposta em Energia de EA para o dia 7 / 5 / 2008.

A Figura 6.13 mostra que o ASL apresenta valores elevados (70dB) nos momentos em que houve rupturas e sons na treliça, assim como ocorreu com a Duração (Figura 6.14). Aparentemente esses parâmetros podem ser utilizados para detectar rupturas de tiras.

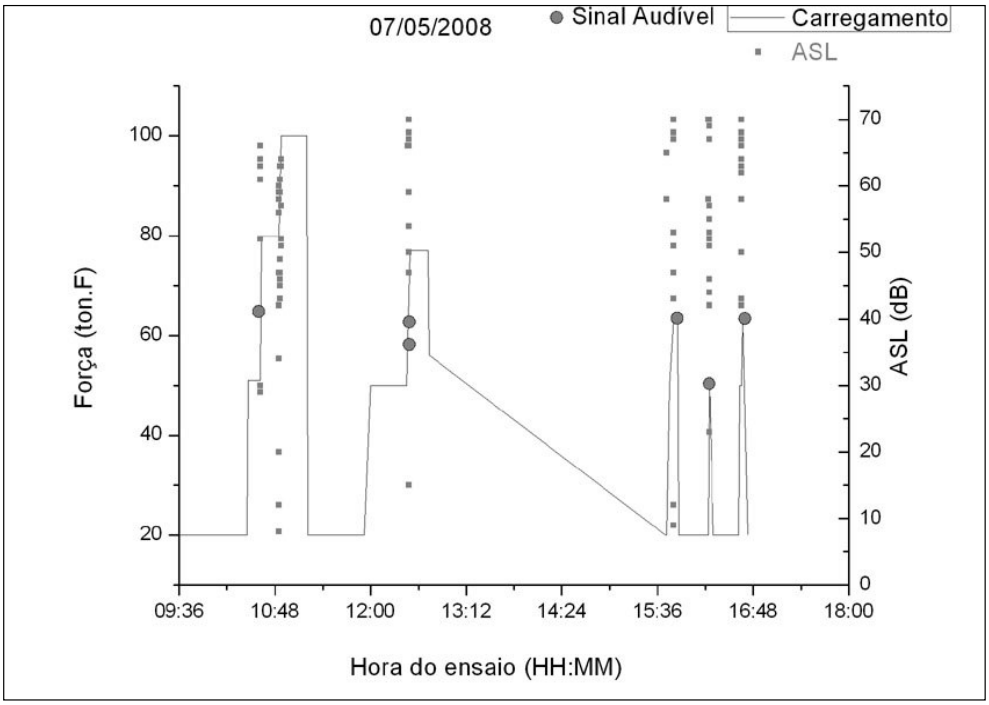

Figura 6.13: Carregamento e resposta em ASL de EA para o dia 7 / 5 / 2008.

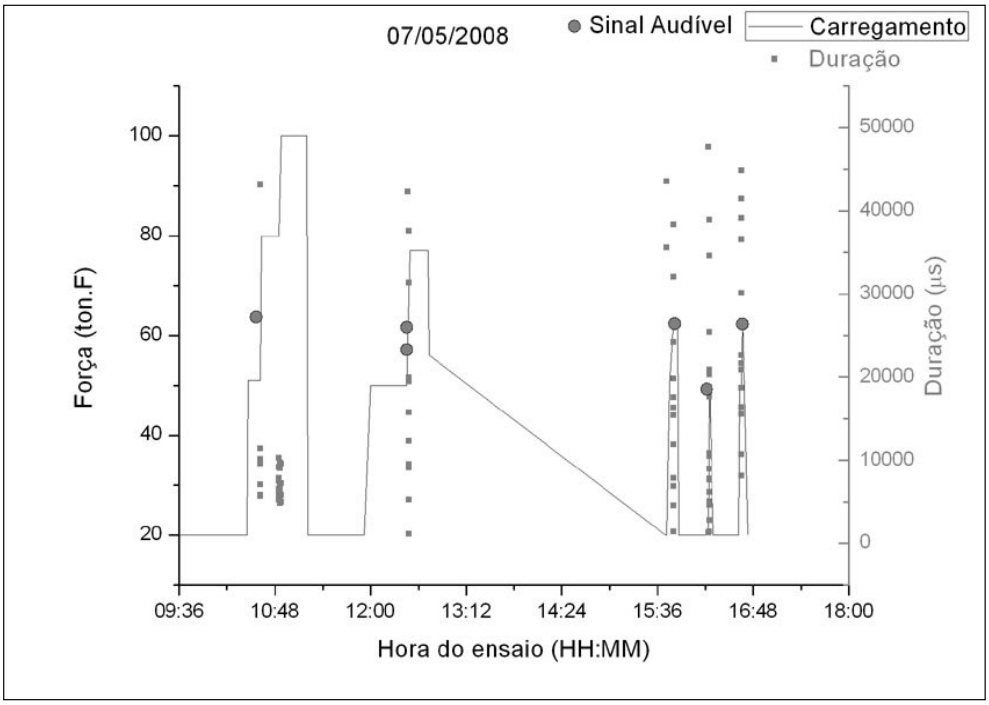

Figura 6.14: Carregamento e resposta em Duração de EA para o dia 7 / 5 / 2008.

Novamente o parâmetro Tempo de Subida (Figura 6.15) apresentou valores elevados durante os estalos e rupturas, sendo mais elevados do que os observados nos ensaios feitos do dia 6/5/2008.

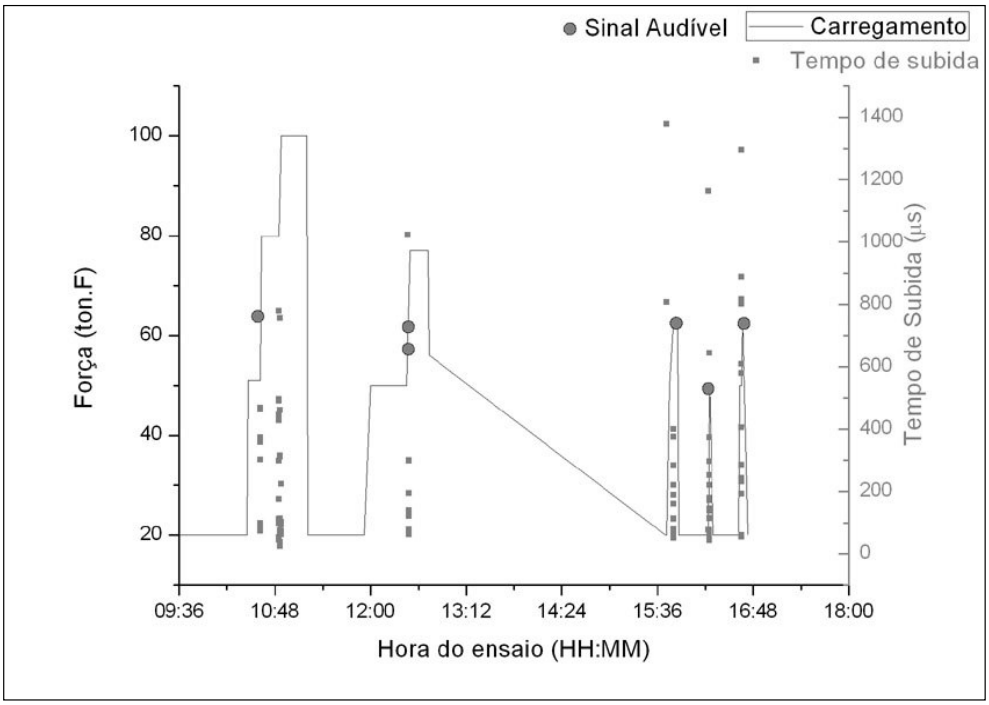

Figura 6.15: Carregamento e resposta em Tempo de Subida de EA para o dia 7 / 5 / 2008.

Como regra geral, pode-se dizer que as rupturas geram sinais acústicos com pelo menos 5000 unidades de energia e 98dB de amplitude. Analisando os gráficos dos outros parâmetros, chega-se à conclusão de que boas indicações de ruptura são: ASL com valores acima de 65dB e Durações entre 10ms e 50ms.

Algumas formas de onda foram coletadas e são apresentadas a seguir. A Figura 6.16 apresenta uma forma de onda assim como seria esperado, ou seja, uma forma de onda clássica de literatura. Observa-se que após cruzar o limiar, a onda rapidamente atinge o seu ponto máximo e depois decai na forma de uma exponencial negativa.

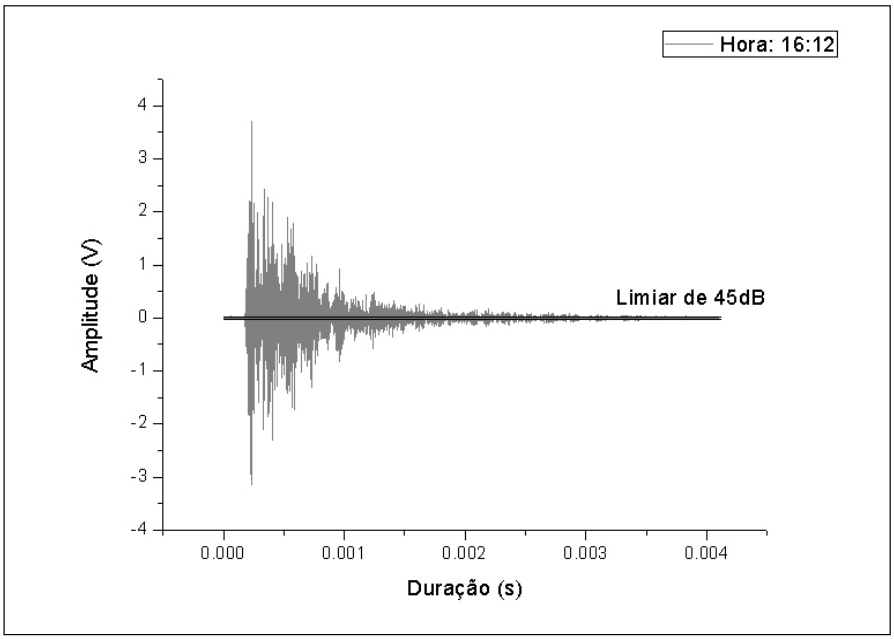

Figura 6.16: Forma de onda observada clássica de literatura.

No entanto, nem todas as formas de onda coletadas tiveram esse comportamento. Dois tipos de problema foram encontrados: no primeiro o ruído de fundo está muito alto e a aquisição começa antes da onda (Figura 6.17), e no segundo se encontrou um problema de aparente saturação do sensor ou do equipamento (Figura 6.18).

O primeiro problema pode explicar por que o Tempo de Subida apresentou alguns valores bastante elevados. Estima-se que problemas semelhantes podem ocorrer e também resultar em erros de medição de Duração.

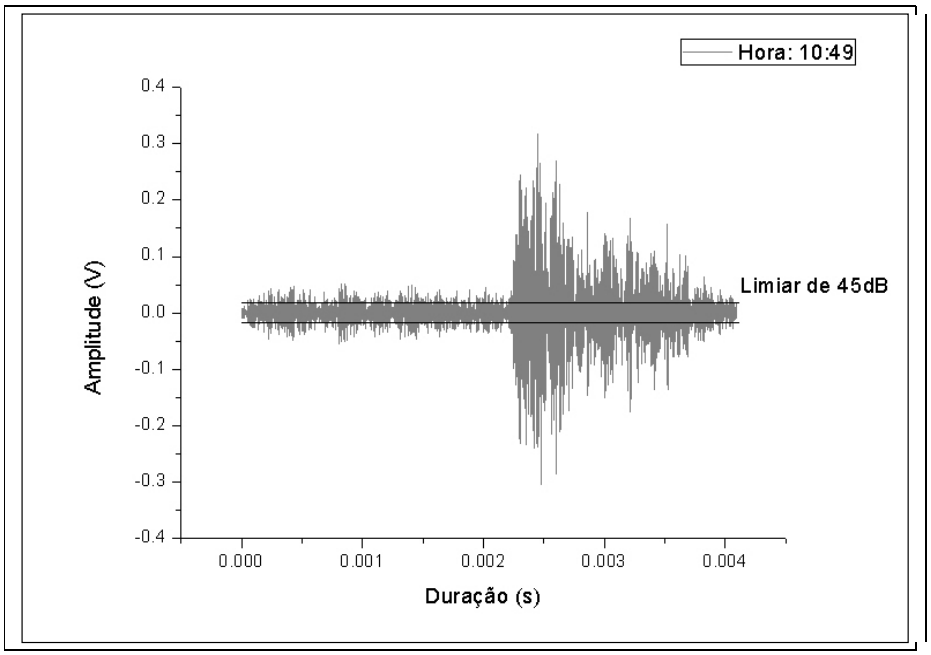

Figura 6.17: Problema de ruído de fundo na aquisição da forma de onda.

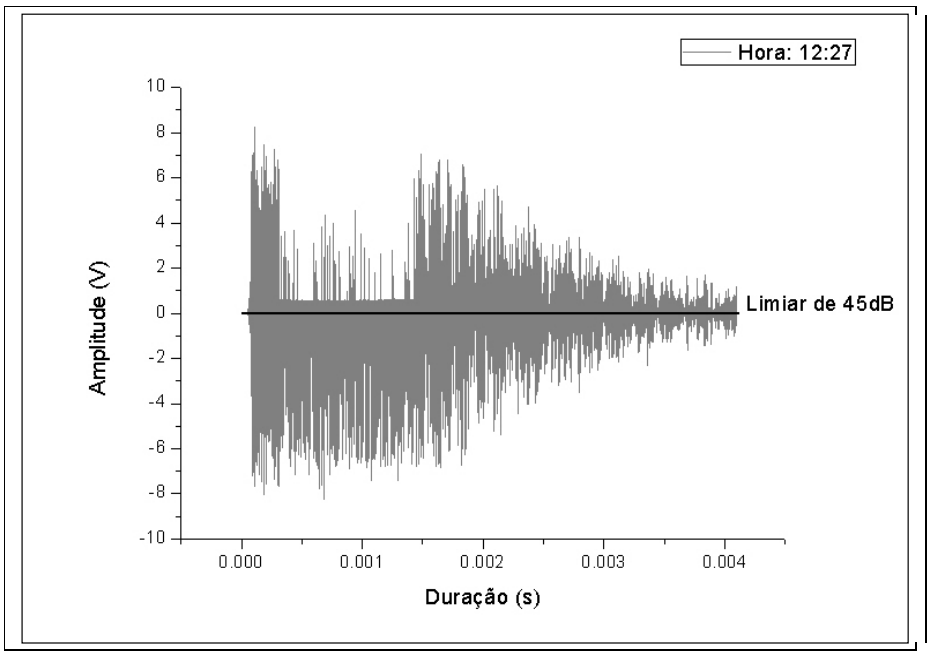

Figura 6.18: Problema de saturação na aquisição da forma de onda.

Mesmo que a aquisição de formas de onda forneça alguns dados importantes, ficou claro neste ensaio que sua aquisição e posterior análise vai ser impraticável no monitoramento contínuo de *risers* flexíveis. Esse tipo de análise é possível em ensaios de

tração simples em *risers*, mas quando se realizam ensaios de fadiga, a grande quantidade de sinais oriundos de ruídos na fadiga (camadas se atritando) acaba gerando arquivos muito grandes. Deve-se citar aqui que durante um dos carregamentos do dia 6, o equipamento de EA "travou" quando se tentou adquirir formas em 5 sensores ao mesmo tempo. E não existe apenas a limitação do equipamento. A demanda de tempo para análise de cada um dos sinais de EA para casos de fadiga alcança valores indesejáveis, pois teoricamente para cada evento haverá pelo menos um número de formas de onda igual ao número de canais.

6.3 Conclusões do Segundo Grupo de Ensaios

Teve-se sucesso em detectar rupturas de tiras com quase todos os sensores através de emissão acústica em um ensaio de tração de um *riser* em escala real. A detecção depende da distância que o sensor está da ruptura, sendo que é mais difícil distinguir a ruptura nos sensores colocados na terminação longe da tira que rompeu (6m de distância).

A primeira análise revelou que os parâmetros Amplitude e Energia forneceram resultados perto do que era esperado, mas os parâmetros Duração e Tempo de Subida mostraram resultados intrigantes, o que leva a questionar se eles estão sendo medidos corretamente.

A análise das formas de onda revelou que a Energia também pode estar sendo medida de forma equivocada e infelizmente, devido à capacidade de processamento de dados, acredita-se que a utilização de formas de onda deveria ser considerada uma das últimas opções de análise.

A necessidade de não utilizar a análise de formas de onda para o monitoramento de *risers* em fadiga acabou levando às perguntas:

- podemos confiar nos resultados apresentados pelo módulo de *parametrics*?
- Quais são os parâmetros de tempo na aquisição (PDT, HDT e HLT) que seriam adequados para serem utilizados?

Para responder a essas duas perguntas, partiu-se para o Grupo de Ensaios 3, onde se retomou o ensaio de tração simples em tiras retiradas da armadura de tração.

7.0 TERCEIRO GRUPO DE ENSAIOS

O objetivo do terceiro grupo de ensaios foi monitorar via EA a fratura de corpos de prova feitos a partir de uma combinação de tira, resina e uma caixa metálica. As tiras foram fadigadas de modo a terem diferentes seções resistentes, e desejava-se verificar se havia diferenças de sinais obtidos ao usar-se dois tipos de sensores (um ressonante e um banda larga) com dois ganhos diferentes.

7.1 Procedimento Experimental do Terceiro Grupo de Ensaios

Quatro tiras retiradas da armadura de tração de um *riser* de 6 polegadas de diâmetro foram fadigadas até terem trincas de fadiga com diferentes profundidades. Infelizmente, as trincas não ficaram com formato de unhas para cálculo de K_I da mecânica da fratura. Após trincadas, as tiras foram montadas dentro de uma caixa metálica (Figura 7.1a) e o espaço vazio foi preenchido com resina Rengel SW 404 BR. As amostras foram deixadas em uma bancada por 24h para que a resina curasse.

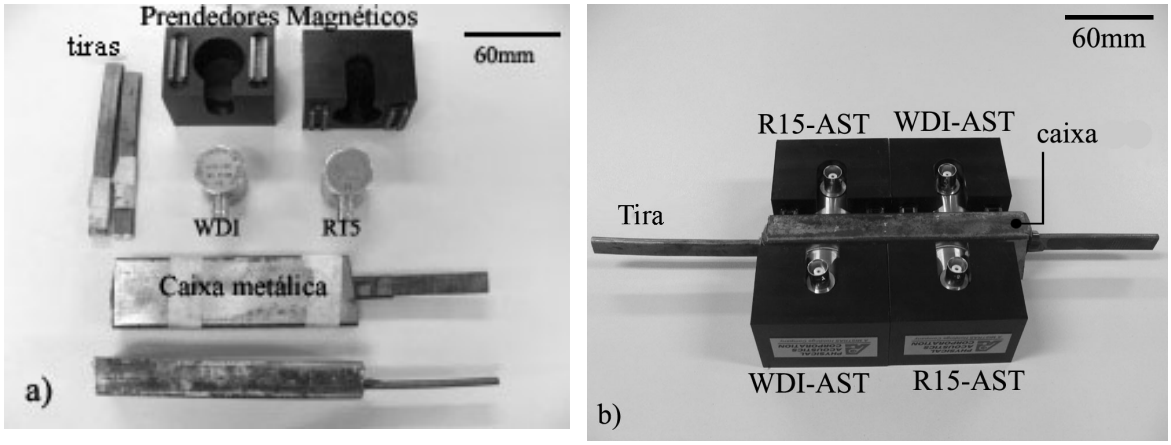

Figura 7.1: (a) Amostra que consiste de uma tira fadigada e montada numa caixa metálica, sensores e prendedores magnéticos; (b) montagem dos sensores na amostra.

Quatro sensores de EA (canais 1, 2, 5 e 6) foram montados na parte metálica das caixas através de prendedores magnéticos de maneira similar ao mostrado na Figura 7.1b. Desses, dois eram R15I-AST (ressonantes em 150kHz) e dois eram WDI-AST (banda

larga) da PAC. Outros dois sensores ressonantes R15I-AST da PAC (canais 15 e 16) foram montados nas garras de uma máquina de tração Instron.

O ensaio de tração foi feito até a ruptura dos corpos de prova, sendo utilizada uma taxa de carregamento de aproximadamente 0,016mm/s. A Tabela 7.1 apresenta as configurações para os sensores:

Tabela 7.1: Configuração dos sensores

	Tipo do sensor	Canal Correspondente	Pré – amplificação*
Sensor 1	WDI	1	40dB
Sensor 2	WDI	2	30dB
Sensor 5	R15I	5	40dB
Sensor 6	R15I	6	30dB
Sensor 15	R15I	15	40dB
Sensor 16	R15I	16	40dB

* Selecionada na janela de aquisição do AEWin

O limiar foi ajustado para 45dB e foram filtradas as freqüências fora da faixa 50kHz – 400kHz. A freqüência de amostragem da forma de onda foi 1MHz. As funções temporais de aquisição foram definidas como sendo: PDT 200μs, HDT 800μs, HLT 1000μs e a forma de onda foi adquirida por 4ms.

O equipamento utilizado foi o Disp 16C da PAC e os dados foram analisados através do programa da PAC AEWin e através de MATLAB.

O cálculo da energia dos sinais foi feito através da integral da área na forma de trapézios, função *trapz* do MATLAB.

7.2 Resultados do Terceiro Grupo de Ensaios

Os resultados da medição das áreas da seção remanescente para as tiras que receberam as trincas de fadiga podem ser vistos na Figura 7.2. A geometria dos entalhes não foi uniforme e não possui a forma de uma unha, o que acaba invalidando uma tentativa de correlacionar a energia acústica liberada com a utilização de parâmetro K_I da mecânica da fratura. Obteve-se áreas de seção resistente do arame de 30, 49, 67 e 85% da área original. As amostras foram numeradas de 1 a 4 com base no tamanho do entalhe, sendo a amostra 1 a de 85% e a amostra 4 a de 30% de seção remanescente.

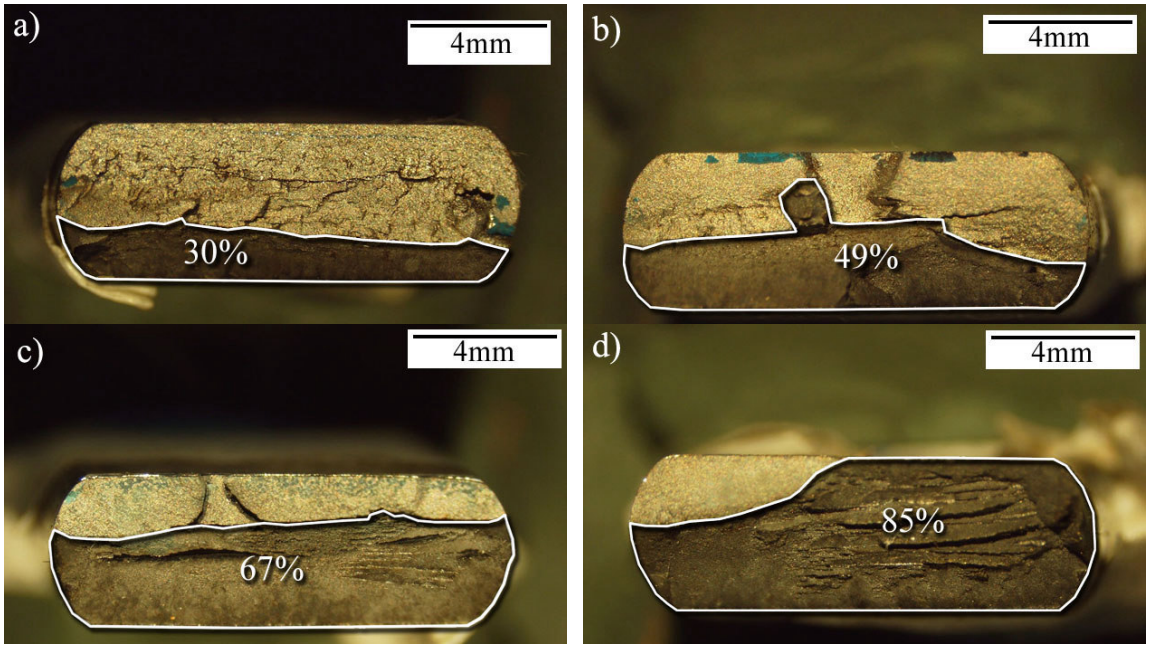

Figura 7.2: (a) Menor seção resistente, 30% da área original; (b) segunda menor seção resistente, 49% da área original; (c) segunda maior seção resistente, 67% da área original; (d) maior seção resistente, 85% da área original.

As Figuras 7.3 – 7.6 mostram as curvas de carregamento para os ensaios e a resposta em amplitude de EA para um dos sensores R15I e um dos sensores WDI (ambos sensores presos nas caixas).

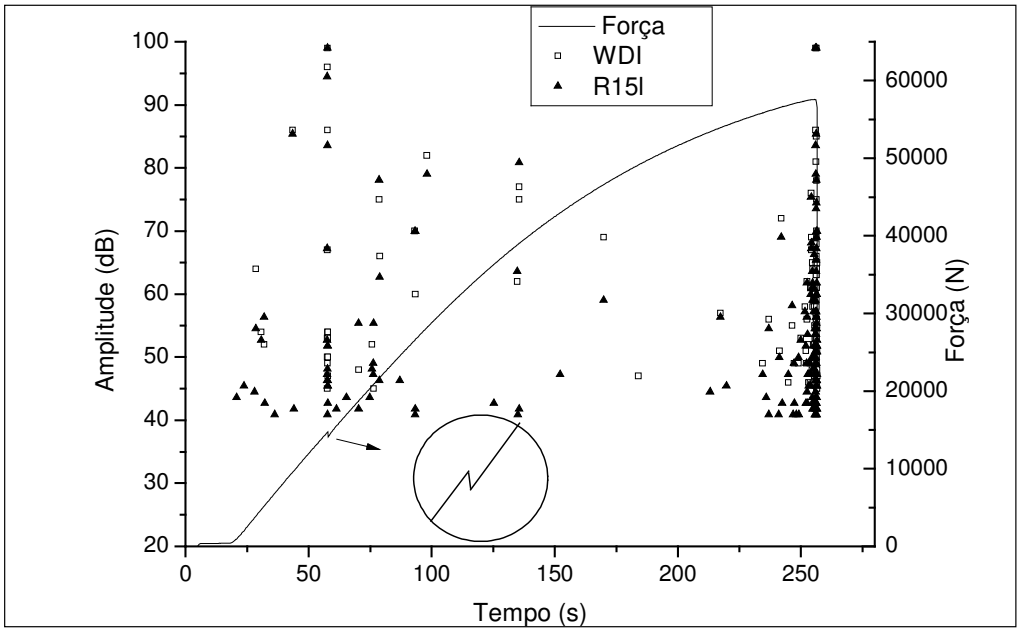

Figura 7.3: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 85% da seção original.

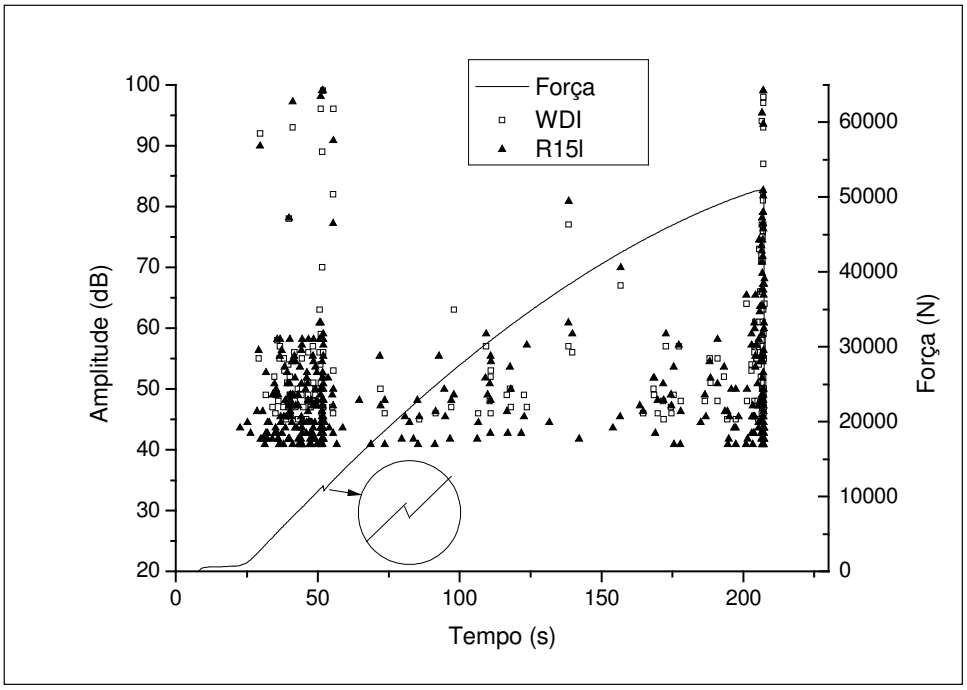

Figura 7.4: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 67% de seção remanescente.

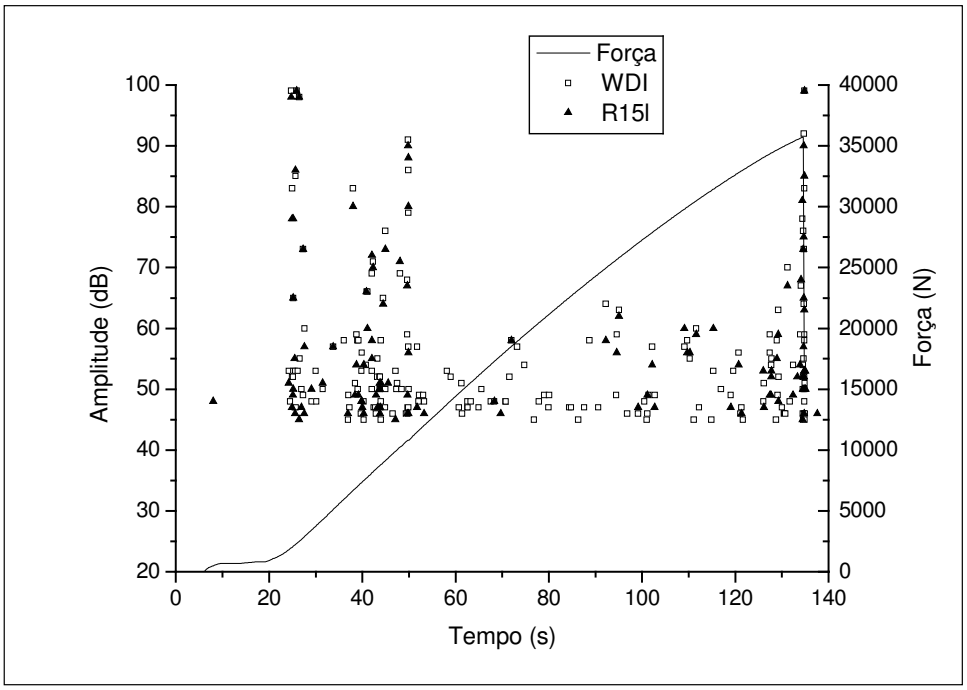

Figura 7.5: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 49% de seção remanescente.

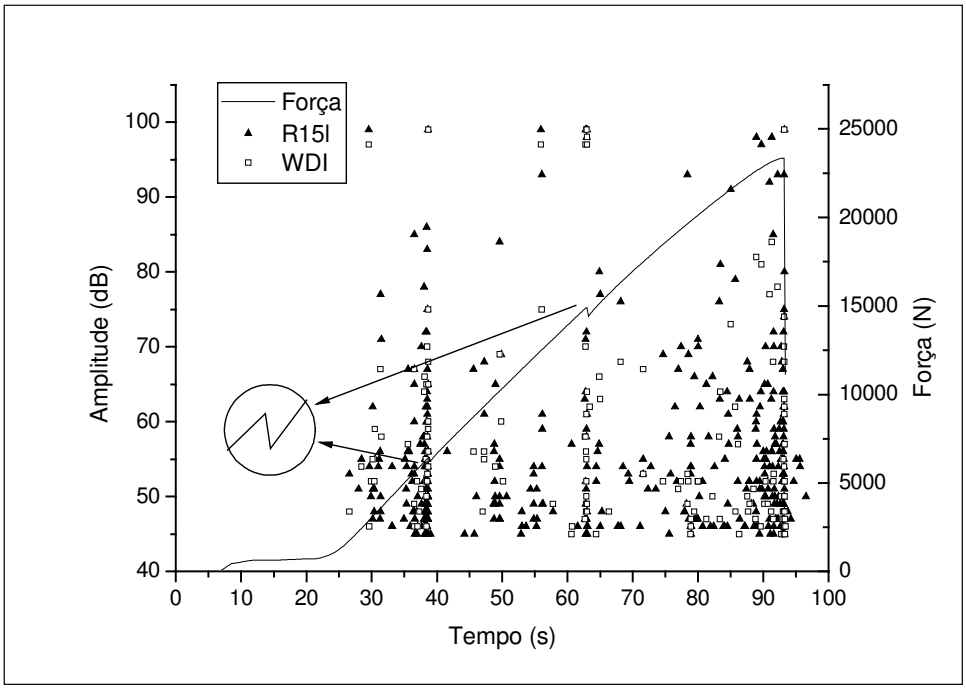

Figura 7.6: Curva de carregamento e resposta acústica para a amostra de área 37% de seção remanescente.

Nota-se, nas Figuras 7.3, 7.4 e 7.6, que houve quedas de tensão em determinados momentos, coincidentes com um aumento no número de sinais e aparecimento de sinais de alta amplitude (>90dB). Essas quedas de tensão foram atribuídas a um descolamento que ocorreu na interface resina/tira. A perda de adesão local e geração de microtrincas na resina acarreta um aumento da quantidade de sinais e o descolamento final gera sinais de alta amplitude. No entanto, o fenômeno de queda de carga não foi observado para a amostra que corresponde a uma seção de 49% (Figura 7.5).

Em termos gerais, os sinais de maior amplitude (próximos de 99dB) foram adquiridos tanto no descolamento (conversão de energia relacionada à adesão para energia sonora) como na ruptura final (conversão de energia mecânica elástica para energia sonora). Considerando que a faixa de aquisição do Disp 16C é de 0-100db, é possível que esses sinais tenham amplitudes até maiores do que 100dB.

As Figuras 7.7 a 7.9 apresentam outros resultados obtidos no ensaio de EA, sendo que a ruptura se deu perto de 260s. Após terem rompido, as tiras foram puxadas até uma delas ser retirada da caixa metálica, ou seja, os sinais perto de 300s são ruído de fricção entre a resina e a tira do *riser*. Esse ruído foi filtrado mais tarde, mas resolveu-se adquiri-lo para posterior análise, caso se mostrasse necessário.

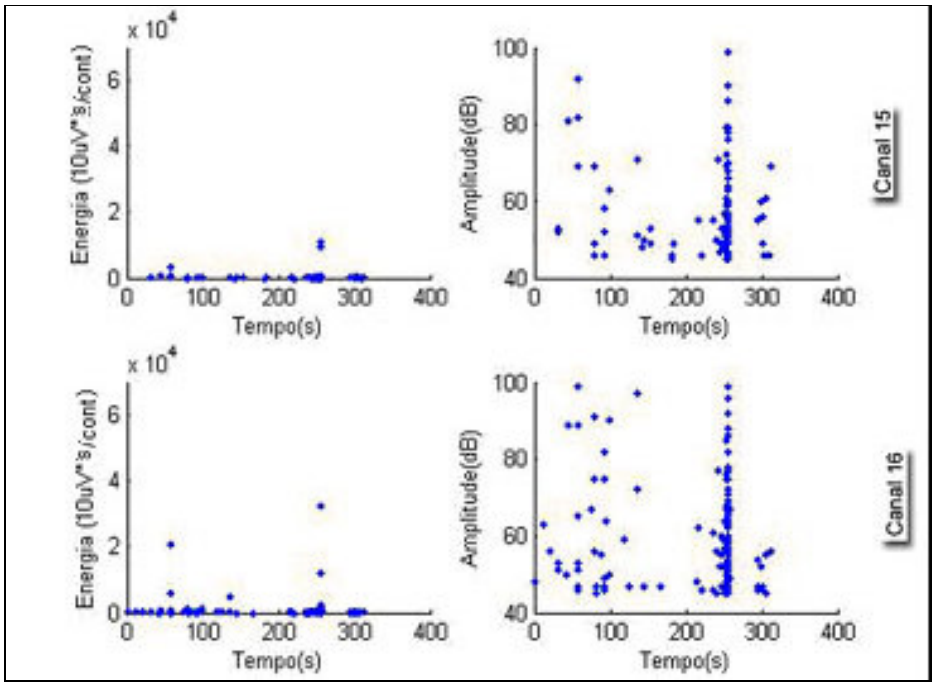

Figura 7.7: Resultados dos sensores de EA colocados nas garras da máquina para a amostra que tinha 85% de seção remanescente.

Durante os ensaios ocorreram sinais sonoros audíveis em dois momentos, perto da queda de carga e na ruptura das tiras. Esses sons foram captados por todos os sensores, inclusive pelos que estavam presos nas garras da máquina de tração (próximos a 50s na Figura 7.7).

A Figura 7.8 mostra o resultado da comparação dos 4 sensores colocados diretamente no corpo de prova. Os sensores dos canais 2 e 6 são os que tiveram a pré-amplificação menor (30dB), e isso resultou em maiores amplitudes tanto no momento do descolamento quanto na ruptura da tira (109dB), enquanto que os sensores 1 e 5, que tiveram pré-amplificação de 40dB, registraram 99dB para ambos os eventos, fato esse que a princípio parece completamente ilógico.

Após contato com um representante da PASA e olhar com mais detalhe o manual, descobriu-se que, apesar do *software* da PAC possuir na sua janela de aquisição uma caixa para alterar a pré-amplificação, essa opção é meramente informativa para o aparelho. Efetivamente o *software* não é capaz de diminuir o ganho. Essa janela existe para permitir que o programa calcule a amplitude máxima e a energia correspondente a cada sinal. Assim, de acordo com a Equação 4, quando se diminui a pré-amplificação a amplitude máxima aumenta.

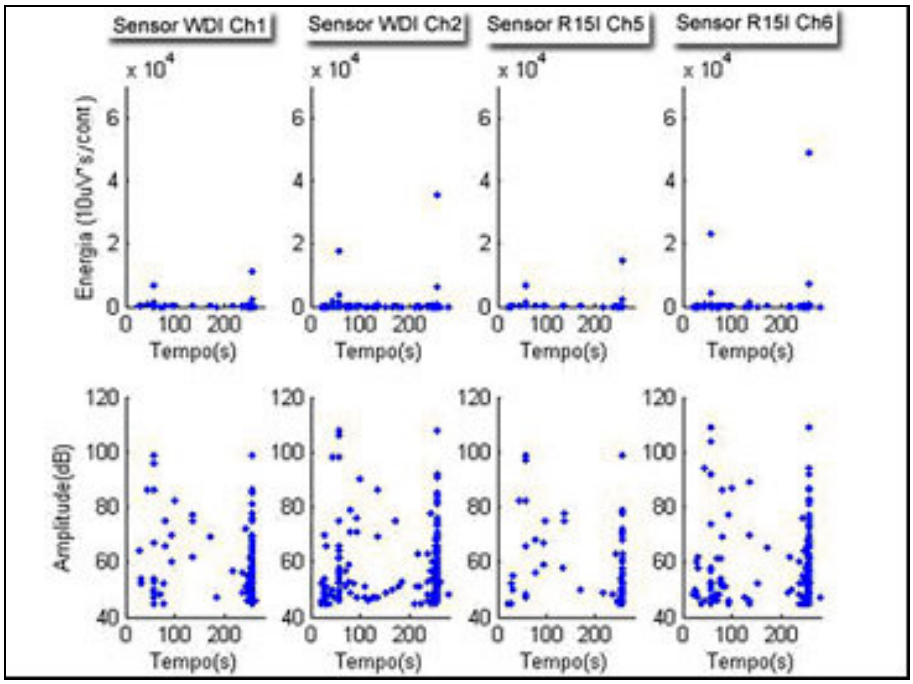

Figura 7.8**: C**omparação entre os sensores R15I-AST e WDI-AST de EA.

A Figura 7.9 mostra os resultados para Freqüência Média (Contagens dividido por Duração) nos canais 1, 2, 5 e 6.

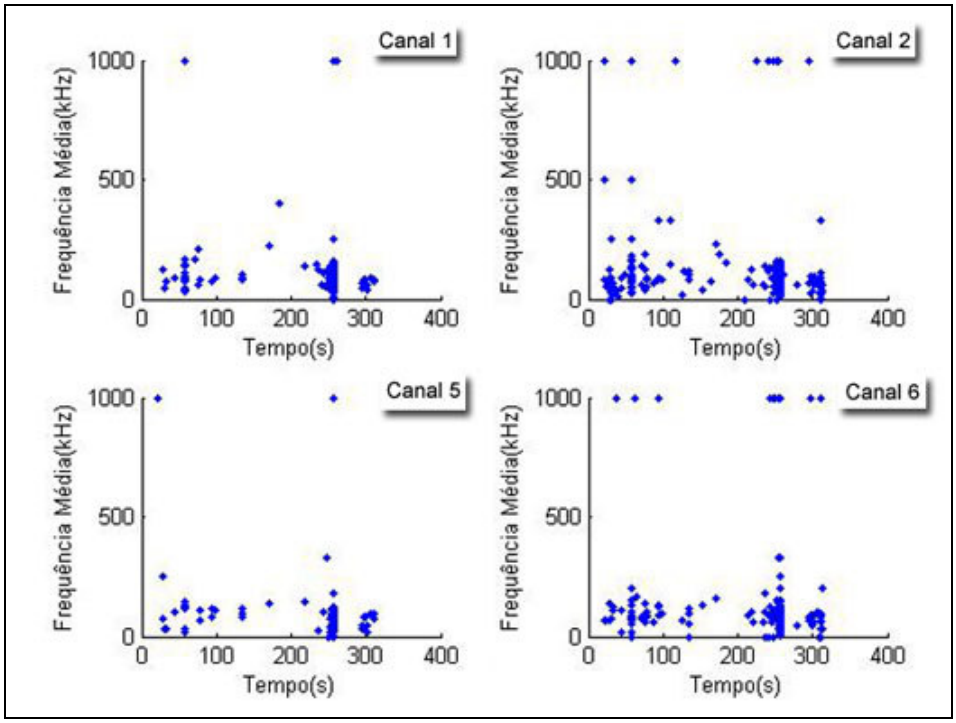

Figura 7.9: Frequencia Média dos sensores montados no corpo de prova.

A literatura cita que é possível diferenciar quebra de resinas e de materiais metálicos através da análise de freqüência dos sinais. No entanto essa análise envolve métodos onde é necessária a aquisição da forma de onda, como a Transformada de Fourier (SMITH 1999) e Transformada *Wavelet* (SERRANO 2001*)*. Análises mais simples como resultantes do parâmetro Freqüência Média não revelaram com clareza a diferença entre o descolamento e a ruptura (Figura 7.9). Resultados similares, comprovando a dificuldade de usar esse parâmetro para diferenciar fontes de sinais também foram encontrados por DRUMMOND (2007).

Já que os resultados para os canais 2 e 6 devem ser tratados pois apresentaram leituras de amplitude maior devido ao problema da pré-amplificação, analisou-se com maior ênfase apenas os resultados dos canais 1 e 5, que correspondem ao sensor WDI e ao sensor R15I presos diretamente à amostra, respectivamente.

A Tabela 7.2 e a Tabela 7.3 apresentam uma distribuição de número de sinais por faixas de energia para o sensor WDI e o R15I respectivamente. Devido à grande quantidade de sinais de baixa energia os dados foram filtrados. DRUMMOND (2007) utilizou um filtro onde ele ignorou todos os dados menores de 80dB de amplitude e 300 unidades de energia. Já que as rupturas tipicamente produzem sinais de EA com uma energia PAC alta, foram filtrados todos os sinais abaixo de 500 unidades. A filtragem reduziu o número de dados significantemente, sobrando aproximadamente 5% dos sinais originais. O sensor R15l-AST provavelmente captou mais sinais do que o WDI-AST porque a sua resposta máxima é maior, e isso pode significar que mais sinais conseguiram passar o limiar, já que ambos os limiares foram ajustados para 45dB.

Tabela 7.2: Distribuição do número de sinais por amostra testada para o sensor WDI-AST.

Faixa da Energia PAC (10µvolt-seg/cont)	Amostra 1 No. Sinais	Amostra 2 No. Sinais	Amostra 3 No. Sinais	Amostra 4 No. Sinais	Total
0	33	65	89	58	245
1 - 100	89	96	87	83	355
101 - 500	9	8	8	1	26
501 - 1000	1	4	1	4	10
1001 - 5000	2	3	3	6	14
5001 - 10000	1	1	0	0	2
Maiores que 10001	1	0	1	0	2
Total	136	177	189	152	654

Tabela 7.3: Distribuição do número de sinais por amostra testada para o sensor R15l-AST.

Faixa da Energia PAC (10μvolt-seg/cont)	Amostra 1 No. Sinais	Amostra 2 No. Sinais	Amostra 3 No. Sinais	Amostra 4 No. Sinais	Total
0	17	28	37	202	284
1 - 100	70	60	67	215	412
101 - 500	6	6	7	10	29
501 - 1000	0	1	2	4	7
1001 - 5000	2	3	2	5	12
5001 - 10000	1	0	0	1	2
Maiores que 10001	1	1	1	1	4
Total	97	99	116	438	750

As Figuras 7.10 e 7.11 mostram a forma de onda e o conteúdo de freqüência dos sinais com maior amplitude obtidos no descolamento da interface e no rompimento da tira usando o sensor WDI-AST. Os espectros mostram freqüências ao redor de 100kHz, o que está de acordo com a Figura 4.3b. CASEY (1985) também obteve resultados perto da região de 100kHz quando estudou rupturas de cabos de aço.

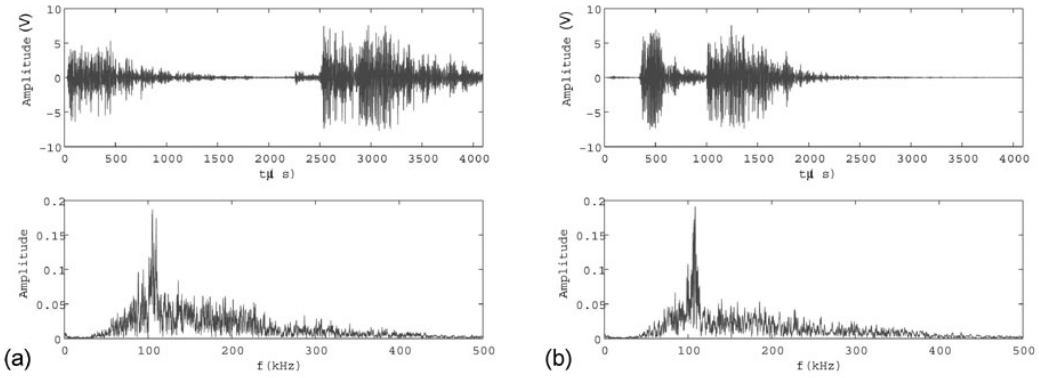

Figura 7.10: (a) Forma de onda de EA do descolamento para a amostra 1 e o sensor WDI-AST; (b) forma de onda de EA do descolamento para a amostra 2 e o sensor WDI-AST.

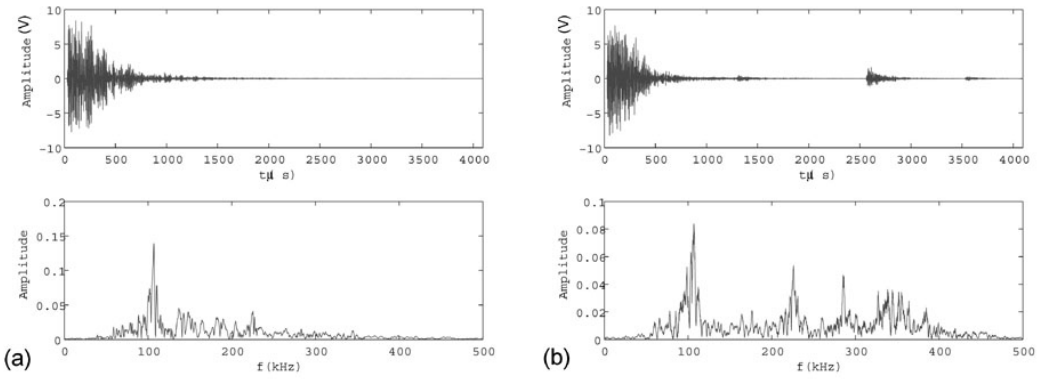

Figura 7.11: (a) Forma de onda de EA da ruptura para a amostra 1 e o sensor WDI-AST; (b) forma de onda de EA da ruptura para a amostra 2 e o sensor WDI-AST.

As Figuras 7.12 e 7.13 mostram a forma de onda e o espectro de freqüência para os sinais com maior amplitude obtidos no descolamento e na fratura da tira, usando o sensor R15I-AST. Aparentemente, há uma maior dispersão de freqüências nos sinais que ocorreram no descolamento quando comparados com os sinais de ruptura. O fato do conteúdo em freqüência dessas figuras estar ao redor de 150kHz era esperado, já que a faixa de maior resposta do sensor é de 50-200kHz (Figura 4.3a).

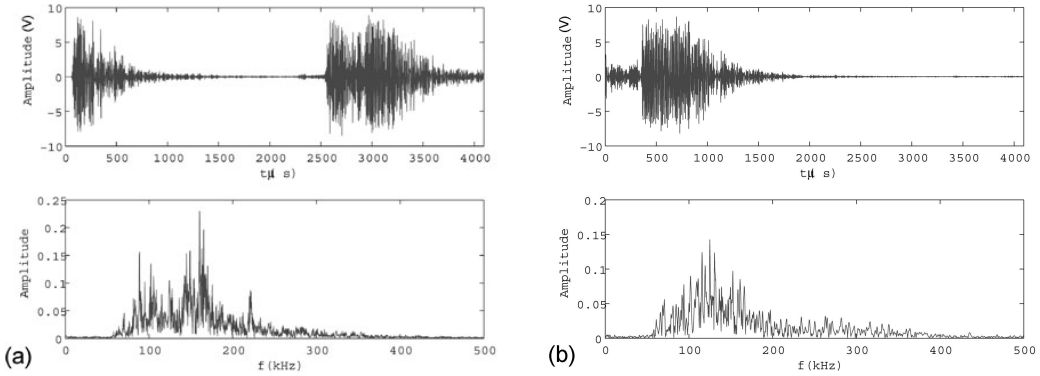

Figura 7.12: (a) Forma de onda de EA do descolamento para a amostra 1 e o sensor R15I-AST; (b) forma de onda de EA do descolamento para a amostra 2 e o sensor R15I-AST.

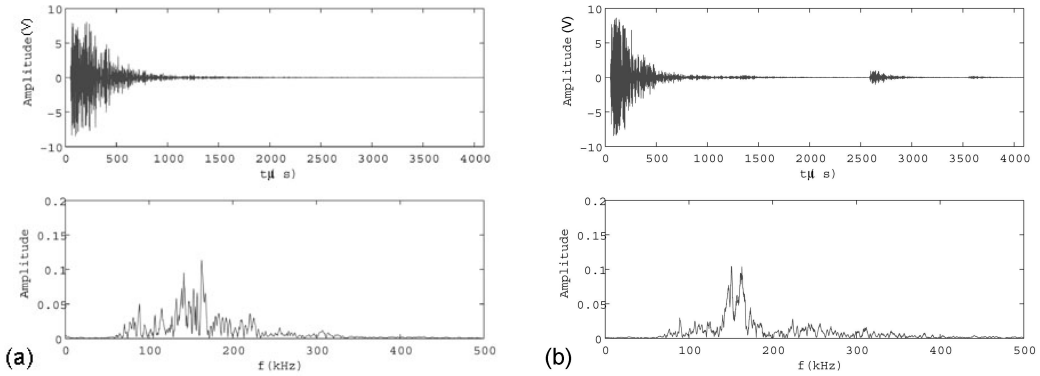

Figura 7.13: (a) Forma de onda de EA da ruptura para a amostra 1 e o sensor R15I-AST; (b) forma de onda de EA da ruptura para a amostra 2 e o sensor R15I-AST.

Algumas figuras mostram duas formas de onda e foi considerado que a segunda forma de onda poderia interferir com a resposta da Transformada de Fourier. Com isso em mente, a segunda forma de onda foi manualmente apagada e a FFT foi recalculada. Nenhuma diferença significativa foi encontrada, então decidiu-se manter a segunda onda nas figuras.

Esses fenômenos inesperados aconteceram devido a um aumento no ruído de fundo entre sinais e à escolha de um limiar muito baixo. Isso explica porque o *software* AEWin mostrou alguns sinais como tendo durações maiores do que 6ms (Tabela 7.4). O problema do limiar significou que todos os parâmetros de EA baseados em tempo (duração, energia, etc...) haviam sido calculados de maneira não confiável. Até esse momento, as únicas informações que poderiam ser utilizadas eram Amplitude e as formas de onda, já que o equipamento da Disp 16C é fabricado de modo que os circuitos de extração de forma de onda e de extração de parâmetros são independentes. Todos os parâmetros de EA são calculados através do circuito de *parametrics* e nenhum a partir do módulo de forma de onda.

Tabela 7.4: Comparação entre os parâmetros de EA baseados em tempos resultantes do AEWin e os extraídos via Origin para a amostra 1 (85%de seção) e 2 (67%).

Amostra	Sensor	Origem	Tempo (s)	Origin (μs)		AEWin (μs)	
				Tempo Subida	Duração	Tempo Subida	Duração
1	WDI		43.497	117	1130	75	1930
1	WDI	Descolam.	57.622	146	1665	187	3784
1	WDI	Descolam.	57.752	78	1982	46	8652
1	WDI	Fratura	256.031	85	1997	88	3268
1	WDI	Fratura	256.421	68	601	76	24641
1	R15l		43.497	124	810	140	2197
1	R15l	Descolam.	57.622	55	1441	643	4683
1	R15l	Descolam.	57.686	205	710	219	3343
1	R15l	Descolam.	57.752	59	1959	71	9516
1	R15l		135.51	443*	805	10	7855
1	R15l	Fratura	256.031	48	1847	31	4179
1	R15l	Fratura	256.313	26	466	29	3889
1	R15l	Fratura	256.417	24	606	615	34277
2	WDI	Descolam.	51.074	161	970	181	1670
2	WDI	Descolam.	51.891	104	1107	439	7087
2	WDI		55.486	79	749	114	1329
2	WDI		206.539	24	804	47	1934
2	WDI	Fratura	207.024	26	1641	28	5374
2	WDI	Fratura	207.047	16	875	239	2629
2	WDI	Fratura	207.052	24	369	8	2922
2	WDI	Fratura	207.062	589*	3948	712	21030
2	R15l		29.691	26	685	118	1602
2	R15l		41.184	97	1296	406	3386
2	R15l	Descolam.	51.074	127	1176	61	3464
2	R15l	Descolam.	51.568	14	809	199	12066
2	R15l	Descolam.	51.891	699*	3435	649	7567
2	R15l		55.486	99	751	145	1876
2	R15l	Fratura	206.539	31	845	33	2751
2	R15l	Fratura	207.024	59	1588	62	5502
2	R15l	Fratura	207.052	174	1099	123	4560
2	R15l	Fratura	207.062	Forma de onda não registrada		245	44123

* A análise da forma de onda mostra o que acredita-se serem 2 ondas juntas, algo similar ao que acontece na Figura 7.11a perto de 2500s.

A análise das formas de onda levou à conclusão de que um novo limiar de 100mV (60dB) deveria ser escolhido. O mesmo limiar pareceu servir tanto para o sensor WDI-AST quanto para o R15I-AST. Os dados foram levados ao Origin para se extrair a Duração e Tempo de Subida e confrontar com os resultados dados pelo software AEWin. A Tabela 7.4 mostra os resultados para os sinais na ruptura e no descolamento, para as amostras de 67% e 85% de seção remanescente.

Os três sinais que mostraram Tempos de Subida maiores do que 200μs são aqueles que envolveram duas ondas chegando ao mesmo tempo, deformando assim a forma de onda. Isso significa que a escolha de um PDT de 200μs seria uma boa estimativa para a maior parte dos sinais. Ainda, parece que a maior parte dos sinais possui durações menores ou iguais a 2ms, então números maiores do que esse deveriam chamar a atenção do analista.

O manual do AEWIN sugere um HDT mínimo igual a duas vezes o PDT, e um HLT mínimo de 300μs. Assim, para se poder diferenciar as duas ondas na Figura 7.10a (sinal do sensor WDI), seria necessário um limiar 350mV (71dB), assim como novas definições de tempo (HDT = 400us e HLT = 300us). A mesma análise na Figura 7.12a (sinal para o sensor R15l) resultaria em um limiar de 200mV (66dB), HDT = 400μs e HLT = 300μs.

Mesmo com essas novas definições, algumas vezes duas ondas chegaram ao sensor em um intervalo de tempo muito pequeno, distorcendo o que seria esperado da forma de onda e fornecendo números altos para parâmetros que são baseados em tempo (Duração, Energia PAC, etc...). Acredita-se que é possível monitorar fraturas de tiras mesmo com esse problema ocorrendo, desde que o analista saiba que ele pode ocorrer. Assim, qualquer sinal que possua mais do que 200μs em Tempo de Subida e/ou 2ms de duração nessa configuração de teste deveria ser investigado. Com isso em mente, sugere-se o uso de pelo menos 3 sensores, com limiares de 45dB, 60dB e 75dB.

As Figuras 7.14 e 7.15 mostram os resultados para o cálculo das energias através da integral das formas de onda e uma comparação com os resultados do AEWin. Infelizmente, só se pode fazer a comparação dos resultados dos sinais que possuíam até 4ms de duração, já que as formas de onda possuem comprimento máximo de 4ms.

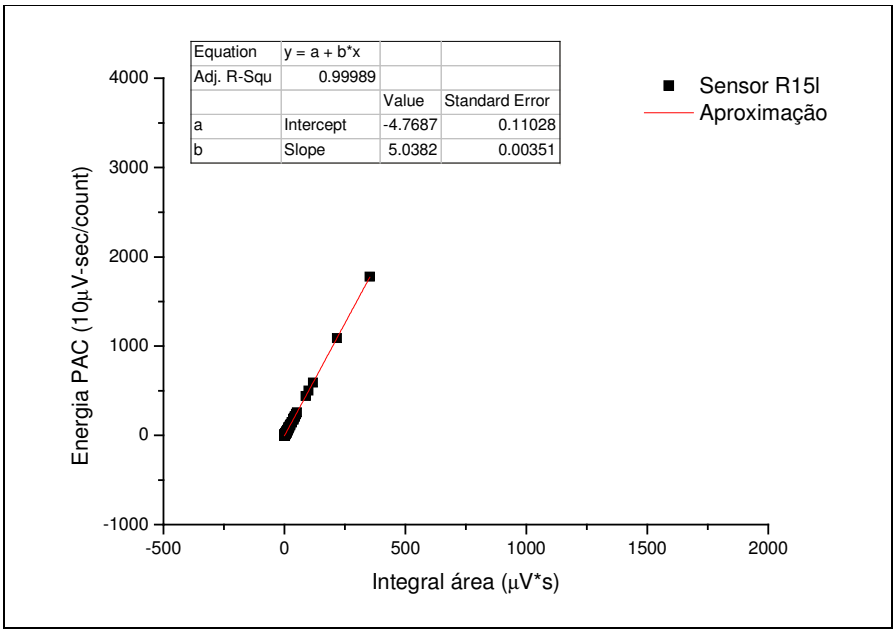

Figura 7.14: Comparação de Energia calculada pelo Matlab e AEWin para o sensor R15I.

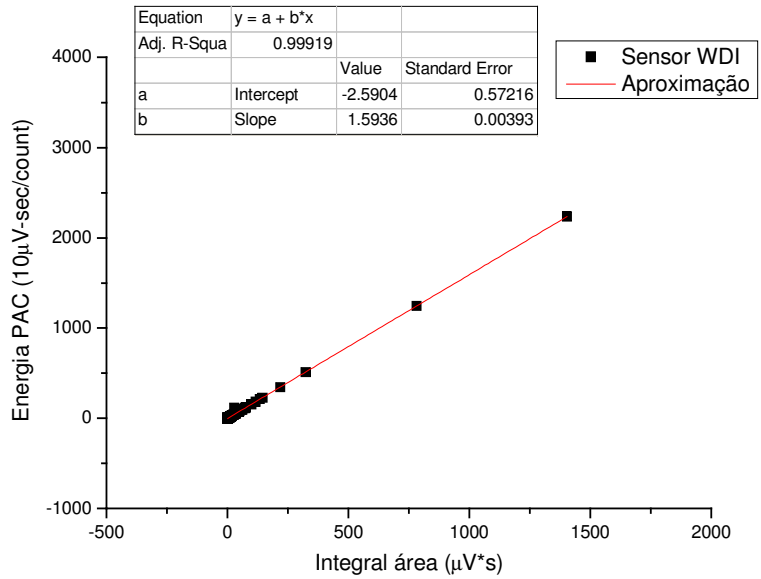

Figura 7.15: Comparação de Energia calculada pelo Matlab e AEWin para o sensor WDI.

Nota-se que existe uma correlação linear excelente entre os resultados mas que eles não foram exatamente os mesmos para os dois cálculos. O fato das equações de reta das aproximações não serem a mesma se deve ao fato de que os sensores possuem respostas em freqüência diferente. Como as energias foram calculadas a partir das formas de onda, o sensor WDI certamente recebeu maior contribuição de freqüências do que o R15I.

No manual do Disp 16C (PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION 2005) está escrito que a energia é a integral do sinal retificado e que uma constante que foi usada para permitir comparações entre os diversos modelos de equipamentos da PAC. No entanto, não há explicação de como utilizar essa constante apropriadamente. Tentativas de comunicação com os representantes da PAC no Brasil, a PASA, não resultaram em uma boa explicação do que é e como se calcula a Energia PAC. Nessa época, foi perguntado como é definido o envelope ao redor do sinal da forma de onda para se calcular a energia pois supunha-se que a Energia PAC deveria ser a mesma que a Energia MARSE, que classicamente possui essa definição. Outros usuários do equipamento mostraram curiosidade sobre como era possível uma forma de onda resultar em "Energia 0", como obtido pelo AEWin.

A Figura 7.16 mostra a amplitude e duração associada a sinais, coletados pelo sensor WDI nas amostras de 1 a 4, que possuem "Energia 0" de acordo com o AEWin. A tendência é a de quanto maior a amplitude, menor a duração dos sinais.

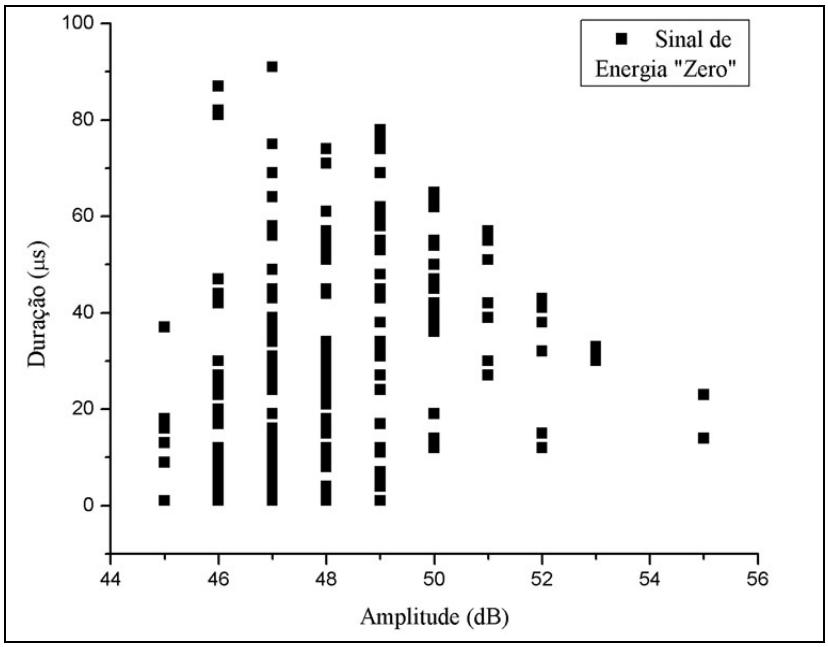

Figura 7.16: Sinais de "Energia Zero" coletados pelo sensor WDI nas amostras 1-4.

A Figura 7.17 mostra um aumento das áreas próximas à origem dos eixos x,y das Figuras 7.14 e 7.15. Nota-se claramente que a "Energia 0", na realidade, corresponde a uma discretização da energia calculada pela integração da forma de onda. Isso pode ser resultado de uma necessidade de acelerar a parametrização do sinal. Assim sendo, sinais que não chegam a determinados limites não tem a energia calculada. Considerando-se que

um grande número de sinais durante o teste (aproximadamente 20% segundo Tabelas 7.2 e 7.3) estão na condição de "Energia 0" entende-se a necessidade dessa espécie de filtro.

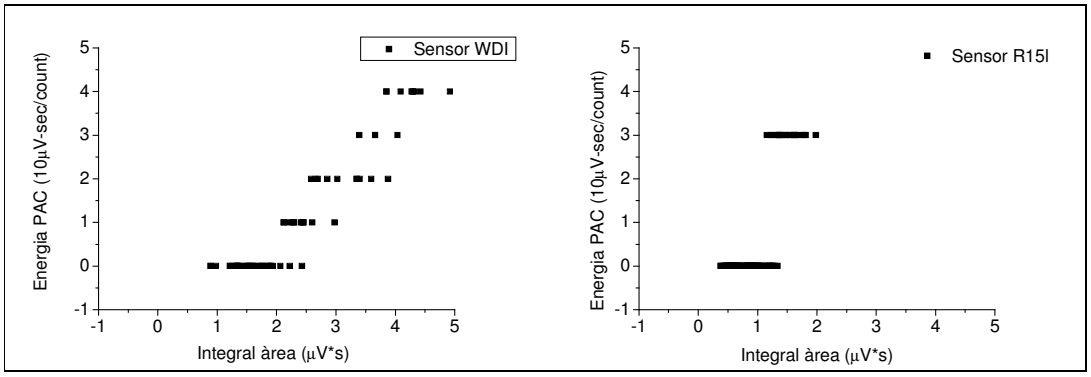

Figura 7.17: Aumento da área próxima à origem dos eixos x,y das Figuras 7.14 e 7.15.

Essa investigação sobre o parâmetro Energia teve origem no problema dos erros de cálculo dos parâmetros Duração e Tempo de Subida. Como a Energia é baseada em Duração, e como não se tinha uma boa explicação de como ela era calculada, acreditava-se que o parâmetro Energia simplesmente não era confiável. Uma vez provado que este parâmetro está relacionado com a Integral da Área abaixo da curva do sinal retificado, acredita-se que ele seja mais confiável do que o parâmetro Duração, por exemplo. A Energia é menos sujeita a ser influenciada por erros no cálculo em algumas condições. Para casos em que a forma de onda é captada e o ruído de fundo permanece levemente acima do limiar, o parâmetro Energia é mais confiável do que o Duração, já que o valor absoluto de energia é grande e o erro é pequeno quando comparado com o valor absoluto de duração que está na mesma escala que o erro. Esse tipo de avaliação é importante porque as redes neurais (DA SILVA 2006), por exemplo, necessitam de parâmetros de entrada livres de erros e de preferência correlacionados com a resposta na saída.

Verificou-se que os problemas citados de erro de cálculo de Energia ocorrem para sinais de alta amplitude, duração e energia. Como o enfoque deste trabalho não é o cálculo exato desses parâmetros, decidiu-se não continuar este tipo de estudo. Isso porque as tiras ao romperem resultam em sinais de alta energia, e neste caso, não importa se a energia não está sendo precisamente parametrizada, o que importa é que as rupturas sejam claramente distinguíveis do resto do ensaio.

7.3 Conclusões do Terceiro Grupo de Ensaios

A comparação entre os dois sensores indica que ambos são indicados para monitorar a ruptura de tiras sujeitas à tensão. O sensor R15l-AST permitiu que mais sinais cruzassem o limiar, sendo mais indicado para uma análise baseada em parâmetros de sinais ou quando um número grande de dados é necessário. O sensor WDI-AST mostrou menos sinais do que o ressonante, mas a resposta em freqüência do banda-larga mostra menos componentes harmônicos e os picos estão melhor definidos. Esse tipo de sensor é indicado para uma análise baseada em freqüência.

Uma importante conclusão dos ensaios é a de que não se pode controlar o ganho dos sensores através do software AEWin. Assim sendo, caso seja necessário diminuir o ganho dos sensores R15l-AST e WDI-AST, deverá ser utilizar um anteparo entre o sensor e a amostra ou outros sensores com pré-amplificadores externos que permitam esse tipo de controle. Outra opção seria trocar a instrumentação.

No que diz respeito às regras de aquisição, um PDT de até 200μs parece apropriado para essa aplicação. O limiar de 60dB pareceu funcionar bem para ambos os sensores, mas é necessário o estudo de outros limiares. Um limite de confiança foi estabelecido, de modo que qualquer sinal que tenha mais do que 200μs para Tempo de Subida e/ou 2ms para Duração deveria ser investigado para tiras nas condições testadas. Alguns parâmetros podem estar sendo medidos erroneamente, e portanto é necessário fazer avaliações de PDT, HDT e HLT para cada aplicação em específico, já que a mudança do tipo de sensor e limiar influenciam diretamente esses parâmetros temporais de aquisição.

A partir destes resultados e conclusões, voltou-se para o *riser* em escala real, e ele foi testado em fadiga.

8.0 QUARTO GRUPO DE ENSAIOS

O objetivo do quarto grupo de ensaios foi tentar localizar rupturas de tiras em um ensaio de fadiga de um *riser* em escala real utilizando-se a EA. As tiras da armadura de tração foram entalhados para facilitar a sua ruptura.

8.1 Procedimento Experimental do Quarto Grupo de Ensaios

A montagem dos sensores de EA R15l-AST no *riser* foi feita do seguinte modo: 3 sensores foram montados no conector feito pela COPPE, 9 montados no conector original e 1 foi acoplado na treliça. A Figura 8.1 mostra o arranjo dos sensores. Os sensores dos canais 1,2 e 3 foram montados com 120º entre si, assim como os dos canais 14, 15 e 16. Os sensores dos canais 4,5,6,7,8 e 9 foram montados com 60º entre si. O sensor do canal 10 foi montado na treliça para servir como referência (sensor guarda).

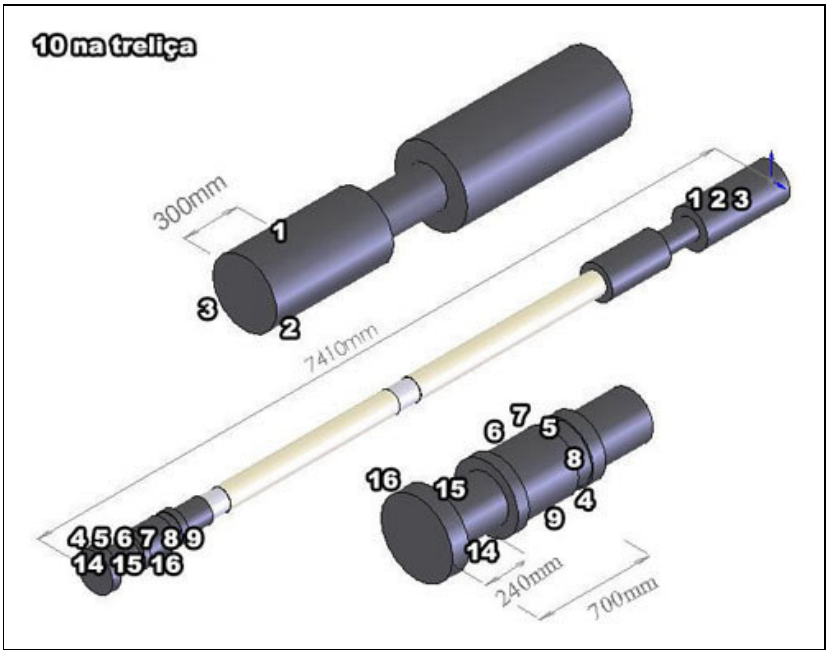

Figura 8.1: Esquema da montagem dos sensores no *riser* para o teste de fadiga.

Os parâmetros temporais de aquisição foram: PDT 200μs, HDT 800μs e HLT 1000μs. Não foram coletadas formas de onda, e dois limiares foram utilizados: 60dB para os canais 4,5 e 6 e 45dB para todos os outros canais.

O *riser* foi carregado em fadiga de maneira senoidal, com uma freqüência aproximada de 5 ciclos por minuto, dentro da faixa de 60ton como limite superior e 20ton como limite inferior. O procedimento de carga envolveu o carregamento manual do *riser* até uma carga de 40 ton, e oscilação da carga com 20ton de amplitude.

As tiras foram entalhadas na janela perto do conector original, ou seja, perto de onde estão montados os 9 sensores. Iniciava-se o carregamento em fadiga e, se passado algum tempo, a tira não rompesse, era parado o ensaio e o entalhe era aumentado. Assim, cada vez que uma tira era rompida, a contagem dos ciclos de fadiga era reiniciada.

O *riser* originalmente possuía 74 tiras na camada da armadura de tração mais externa. Destas, 30 já estavam rompidas quando se começou o ensaio de fadiga.

8.2 Resultados do Quarto Grupo de Ensaios

As Figuras 8.2 e 8.3 mostram resultados das duas primeiras rupturas que ocorreram simultaneamente com 9 ciclos de fadiga (tempo de 350s). Avaliou-se que as tiras possuíam uma seção resistente de aproximadamente 20-35% da seção original.

Analisando a Figura 8.2, nota-se que existe atividade acústica de baixa amplitude quando o ensaio começa e enquanto o *riser* é carregado manualmente até 40ton (180s). No início do ensaio de fadiga (210s) aparecem sinais de alta amplitude, mas a amplitude dos sinais cai para aproximadamente 65dB durante a fadiga. Uma súbita elevação na amplitude dos sinais, no tempo de 350s para 99dB nos canais 4 a 16 e para 80dB nos canais 1 a 3, indica as duas rupturas das tiras. A diferença nas amplitudes é explicada pelo fato de que os sensores dos canais 1,2 e 3 estavam montados no conector longe do ponto onde as tiras romperam. Existe, ainda, uma janela de tempo na qual não aparece atividade nenhuma, correspondendo ao tempo no qual o controle do atuador estava sendo mudado de manual para controlado pelo computador.

A Figura 8.3 apresenta a energia dos sinais durante o ensaio. Com atenção pode-se notar que a energia dos sinais é levemente mais alta do que o normal quando o ensaio de fadiga começa, e é claramente mais alta quando as tiras rompem no instante 350s.

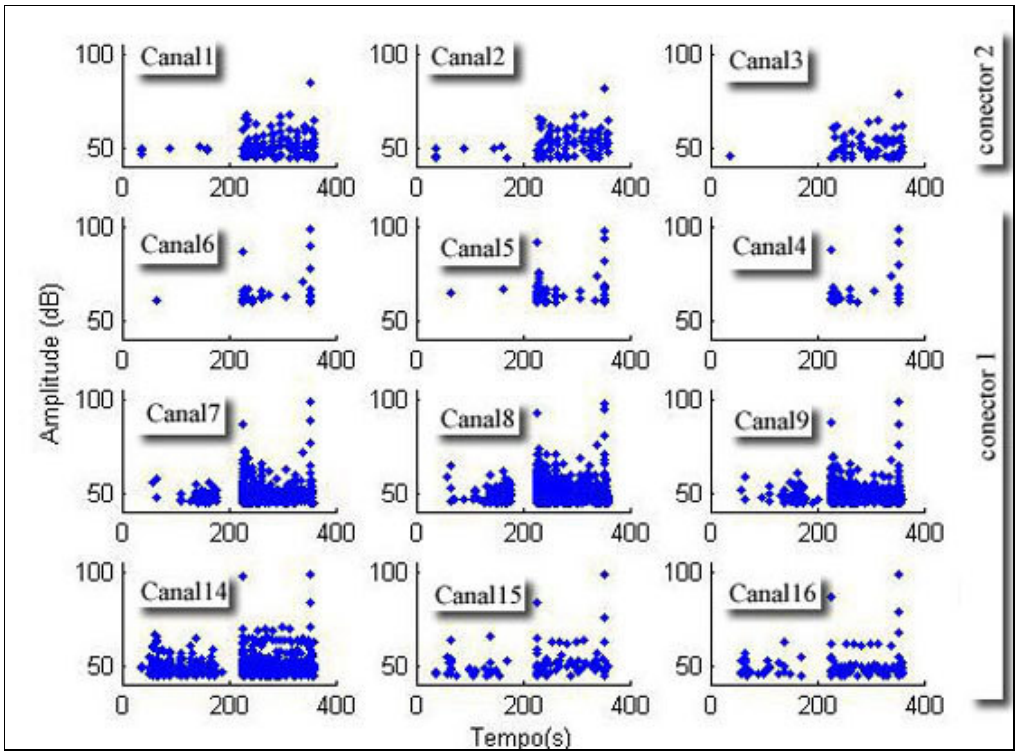

Figura 8.2: Gráficos de Amplitude de EA x Tempo para as 2 primeiras tiras que romperam.

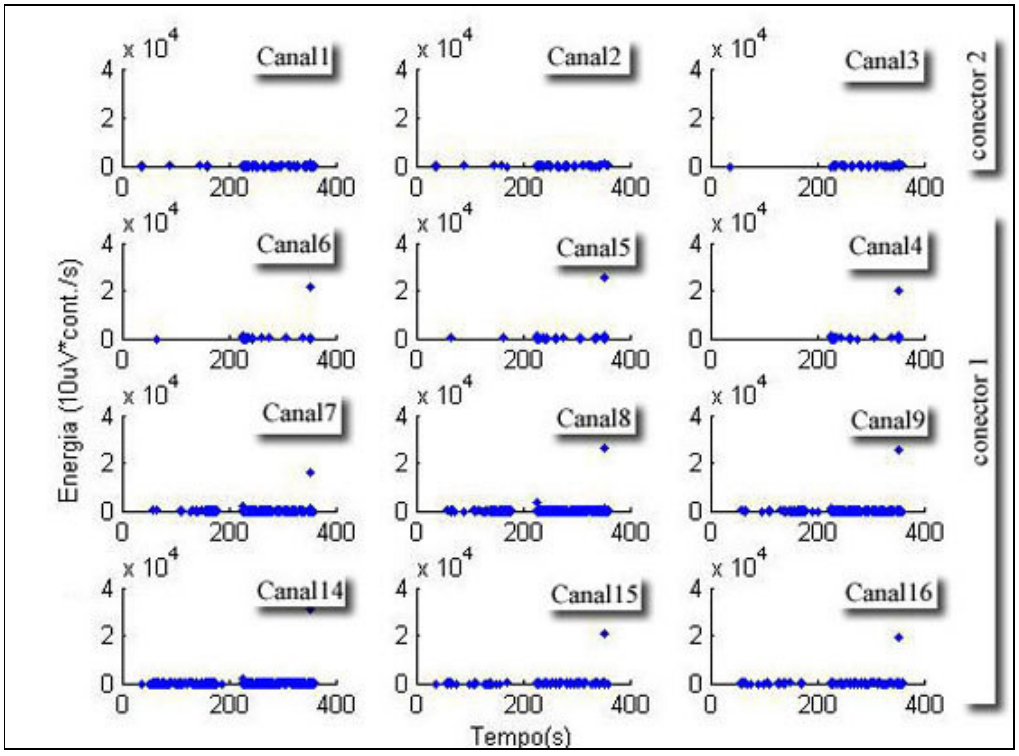

Figura 8.3: Gráficos de Energia de EA x Tempo para as 2 primeiras tiras que romperam.

A Figura 8.4 mostra o gráfico de amplitudes por tempo para o rompimento da terceira tira, que se sucedeu com 7 ciclos de fadiga (tempo de 200s) após o rompimento das tiras 1 e 2. Os canais 1 a 3 registraram uma amplitude próxima de 70dB, mais baixa que a amplitude registrada para as 2 primeiras tiras. Os canais 4 a 16 registraram os mesmos 99dB. Existe uma janela de tempo com pouca ou nenhuma atividade (dependendo do canal) que é o tempo em que o ensaio foi parado para ser verificada a ruptura. Após essa verificação, prosseguiu-se com a fadiga por mais alguns ciclos para que fossem adquiridos sinais de fadiga das tiras após o rompimento.

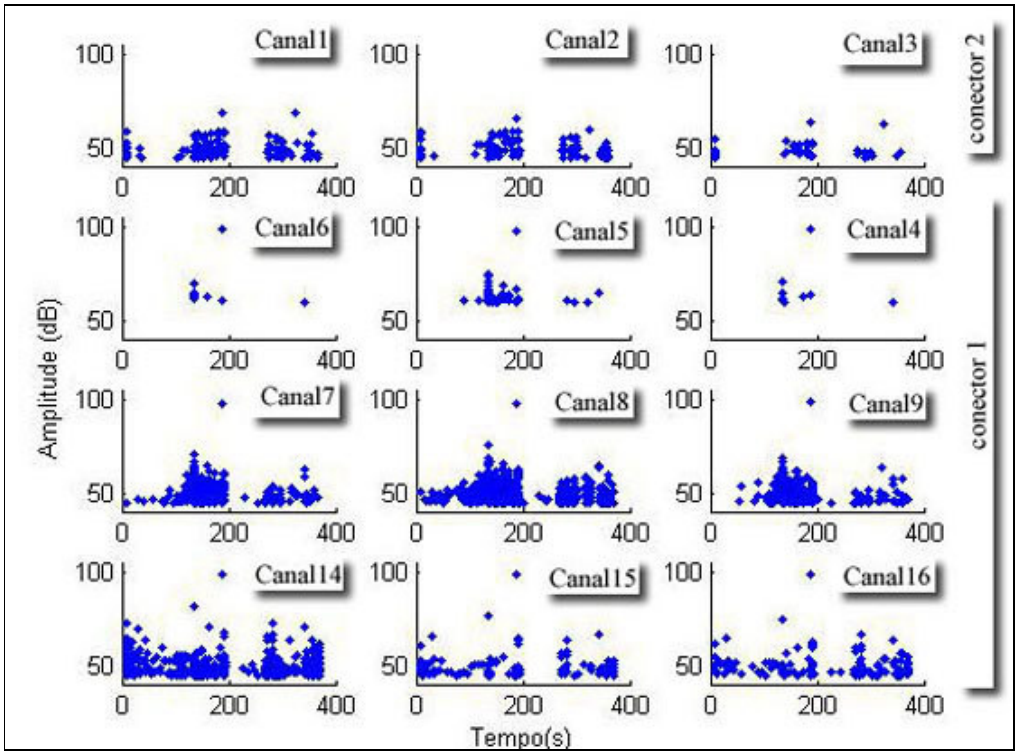

Figura 8.4: Gráficos de Amplitude de EA x Tempo para a terceira tira que rompeu.

Verifica-se na Figura 8.5 que as energias de ruptura da terceira tira são menores do que as energias detectadas no rompimento dos dois primeiros arames. Isso poderia ser explicado se ao se romperem dois arames, ocorresse uma soma de ondas. Considerando que o sistema é complexo e que existem várias ondas refletidas e refratadas, a soma de ondas geraria um sinal de amplitude maior. Todos os canais que estavam no mesmo conector resultaram em número semelhantes de energia. No entanto, os resultados para os sensores dos canais 1,2 e 3 que estavam no conector mais afastado da janela, não mostraram com clareza o momento da ruptura. Isso pode significar que se o rompimento

de uma tira ocorrer a seis metros de distância dos sensores presos ao conector numa plataforma, pode ser que não seja possível detectar a ruptura analizando-se Energia.

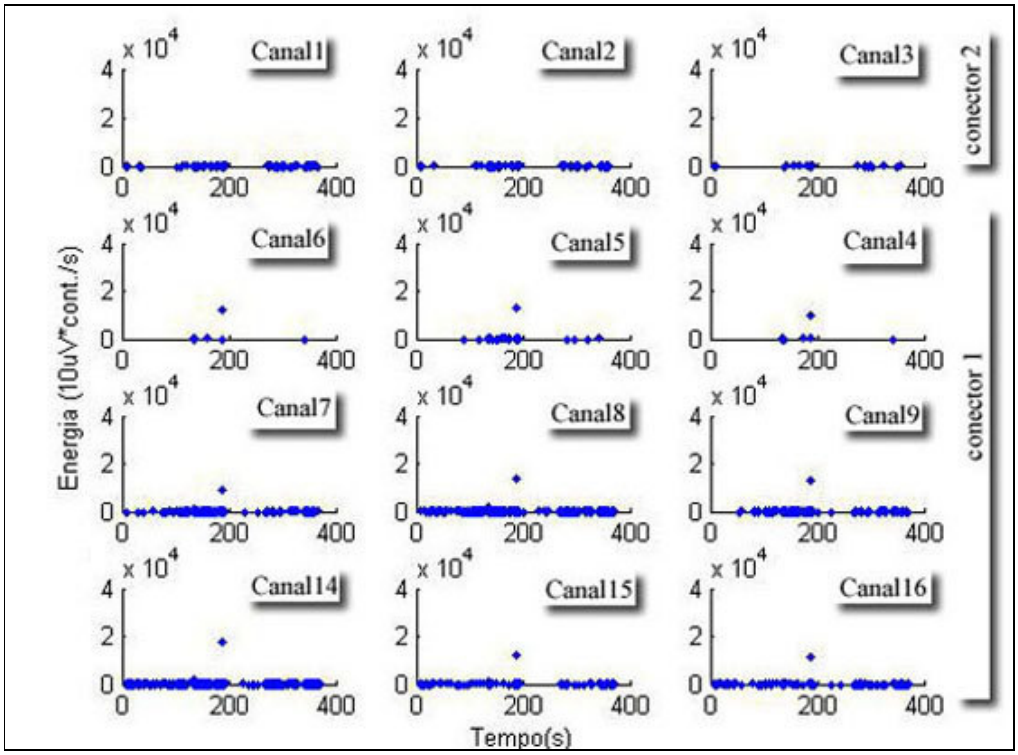

Figura 8.5: Gráficos de Energia de EA x Tempo para a terceira tira que rompeu.

As quebras da quarta e quinta tira são mostradas nas Figuras 8.6 e 8.7. A quarta tira rompeu com 11 ciclos de fadiga (aproximadamente 250s) e a quinta com 28 ciclos de fadiga (aprox. 520s). Não é possível distinguir as rupturas das tiras ao considerarmos os canais 1, 2 e 3 (Figura 8.6). Os canais 4 a 16 mostram claramente pontos de maior amplitude (99dB) quando comparados com o ruído das tiras durante a fadiga. Os últimos sinais de alta amplitude, perto de 750s, correspondem à parada do ensaio de fadiga e mudança do controle do descarregamento para manual.

Na Figura 8.7 nota-se que a energia das tiras durante o rompimento foi consideravelmente mais alta do que durante o ensaio. Comparando-se com os resultados dos outros rompimentos, entretanto, nota-se que elas resultaram em valores mais baixos. Nota-se uma tendência de que quanto mais tiras são rompidas, menor a energia dos sinais acústicos relacionados ao rompimento. Esse resultado causa estranheza, já que esperava-se que as tiras estariam mais carregados e que isso resultaria em rupturas de maior energia. Resultados semelhantes, entretanto, já haviam sido apresentados por CASEY (1997).

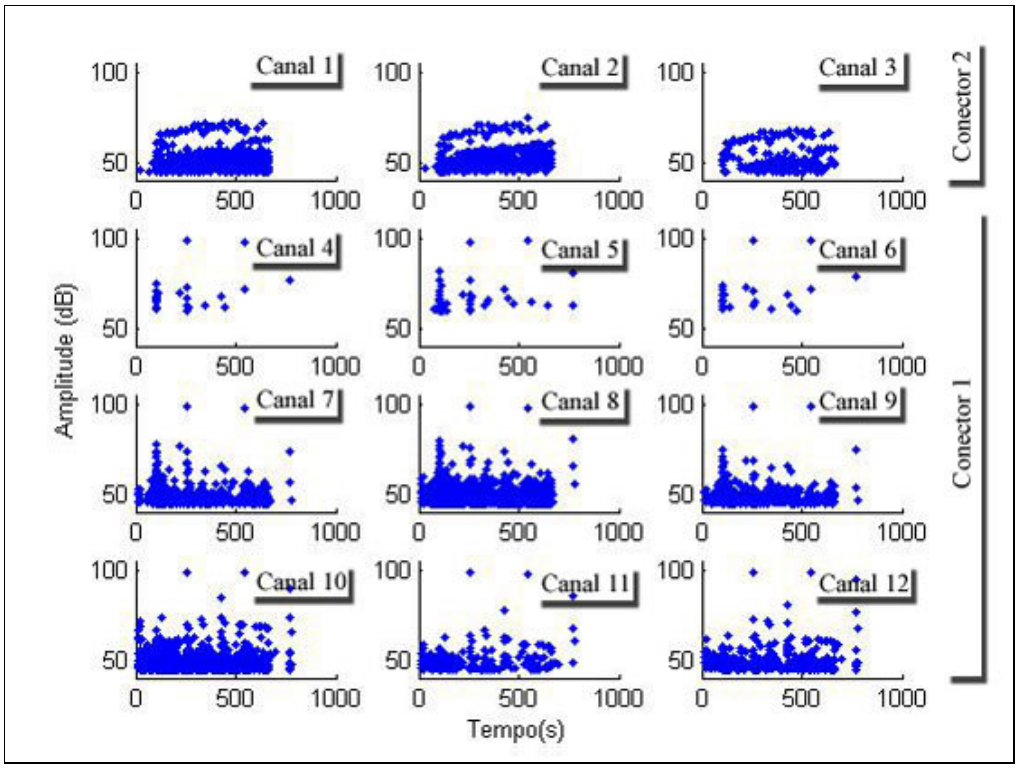

Figura 8.6: Gráficos da Amplitude x Tempo para as rupturas da quarta e quinta tira.

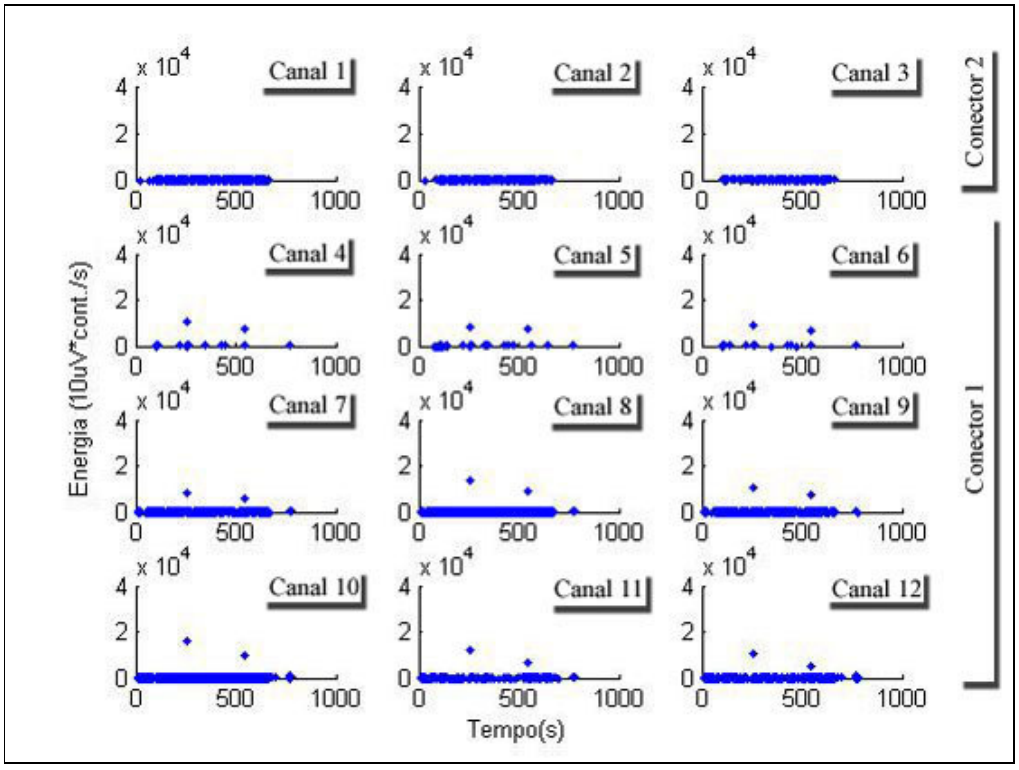

Figura 8.7: Gráficos de Energia x Tempo para as rupturas da quarta e quinta tira.

A fim de efetivamente se tentar uma correlação entre energia e número de tiras rompidas, seria necessário analisar a área exata que cada tira que rompeu possuía no seu momento de ruptura e também qual a carga na qual a tira rompeu. Apesar de teoricamente a tira romper no pico do carregamento, isso não ocorre necessariamente sempre, tendo-se verificado que algumas das rupturas ocorreram quando a carga estava próxima a carga média.

A Tabela 8.1 mostra a análise estatística da variância (ANOVA) que foi feita no programa SPSS para comparar os parâmetros de EA dos sinais de ruptura para os diferentes limiares.

Tabela 8.1: Comparação do limiar de 45dB com limiar de 60dB para cada um dos parâmetros de EA nas diferentes rupturas

	Limiar (dB)		T. de S. (μs)	Contagens	Energia (un.)	Duração (μs)	Amplitude (dB)	RMS (V)	ASL (dB)
Rupturas 1 e 2	45	Média	135	3363	23063	39429	98.8	0.3010	72.3
		D.P.	52	675	5381	9181	0.4	0.0467	1.4
	60	Média	106	1513	22318	16019	98.7	0.2985	72.7
		D.P.	40	175	2632	3071	0.6	0.0205	0.6
		F	0.763	20.4	0.049	17.4	0.259	0.007	0.156
		P	0.411	**0.003**	0.831	**0.004**	0.626	0.935	0.705
Ruptura 3	45	Média	509	2448	12795	29360	98.7	0.2184	69.7
		D.P.	281	542	2974	7127	0.5	0.0321	1.6
	60	Média	460	944	11611	11624	98.7	0.2123	69.7
		D.P.	317	176	1707	2241	0.6	0.0207	0.6
		F	0.055	20.7	0.392	16.7	0.000	0.088	0.000
		P	0.822	**0.003**	0.551	**0.005**	1.000	0.776	1.000
Ruptura 4	45	Média	117	2444	11766	31612	99.0	0.2068	69.5
		D.P.	72	599	2807	7965	0.0	0.0304	1.4
	60	Média	227	817	9565	10052	98.7	0.1856	68.3
		D.P.	179	69	1189	1204	0.6	0.0278	1.5
		F	1.875	20.6	1.607	20.3	2.333	1.021	1.345
		P	0.213	**0.003**	0.246	**0.003**	0.170	0.346	0.284
Ruptura 5	45	Média	132	1524	7345	19021	98.5	0.1584	67.0
		D.P.	86	253	1690	3452	0.5	0.0238	1.3
	60	Média	218	667	7087	7865	98.7	0.1621	67.0
		D.P.	117	139	762	2007	0.6	0.0109	0.0
		F	1.584	28.8	0.061	25.8	0.179	0.062	0.000
		P	0.249	**0.001**	0.813	**0.001**	0.685	0.810	1.000

D.P. = Desvio Padrão T. de S. = Tempo de Subida

$p \leq 0,05$ = estatisticamente significativo (a variância entre grupos é estatisticamente maior do que a variância intra grupos).

$p > 0,05$ = estatisticamente não significante

Alguns fatos interessantes podem ser vistos na Tabela 8.1. A média e o desvio padrão para Contagens e Duração dos sinais para o limiar de 45dB são geralmente maiores (dobro ou mais) do que os sinais para o limiar de 60dB; no entanto, a energia dos sinais nos dois limiares está na mesma escala e é muito próxima. Os parâmetros Contagens e Duração apresentaram diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) na comparação dos limiares em todas as rupturas, assim como esperado. No entanto, o parâmetro Energia não apresentou diferença considerável entre os dois limiares, o que também era esperado, já que a Energia leva em conta a integral da área do sinal acima e abaixo do limiar. Isso é um indicativo de que a parametrização da forma de onda não foi feita adequadamente, e que pode ter ocorrido uma elevação do ruído de fundo para um valor logo acima do limiar por alguns instantes. Essa elevação e consequente erro na medição acaba afetando mais parâmetros de medição como Contagens e Duração do que Energia, já que a contribuição do ruído para a área da integral é muito pequena. Considerando os limites de confiança para Duração encontrados no Grupo de Ensaios 3, nota-se que em todos os casos a Duração está fora da faixa de confiabilidade.

O parâmetro RMS tem a tendência de se comportar da mesma forma que o parâmetro Energia, e não foi encontrada diferença significativa entre os dois limiares.

Os resultados para o parâmetro Tempo de Subida são um tanto aleatórios, e apesar de não ter sido encontrada diferença estatística entre os limiares, isso realmente não quer dizer muita coisa. Supostamente quando aumentamos o limiar de 45dB para 60dB estamos medindo um Tempo de Subida menor do que o que seria o Tempo de Subida real. No entanto, o aumento do limiar significa que erros do tipo elevação do ruído de fundo irão afetar menos a medição desse parâmetro. Em algum momento deve existir um ponto ótimo, mas considerando que a elevação do ruído de fundo influencia fortemente o Tempo de Subida, acredita-se que esse não seja um parâmetro muito confiável a menos que seja feito um estudo aprofundado do caso. Se considerarmos os limiares de confiança encontrados no Grupo de Ensaios 3, nota-se que a média do Tempo de Subida para a ruptura do terceiro arame estaria fora do limiar.

O parâmetro Amplitude não apresentou diferença significativa e nem poderia, já que diferenças indicariam um grave erro de aquisição pelo equipamento.

O parâmetro ASL teria uma tendência de diminuir para um limiar mais baixo porque existe uma grande contribuição de ruído de baixa amplitude, suposição baseada nos

resultados de Energia e Duração. Um limiar mais alto significaria que existe menos ruído no sinal e portanto o ASL deveria ser mais alto; no entanto, não foi encontrada diferença significativa. O problema se trabalhar com ASL é que se pode obter valores muito parecidos quando se compara duas formas de onda completamente diferentes, já que o ASL é a média das amplitudes, como pode ser visto na Figura 8.8.

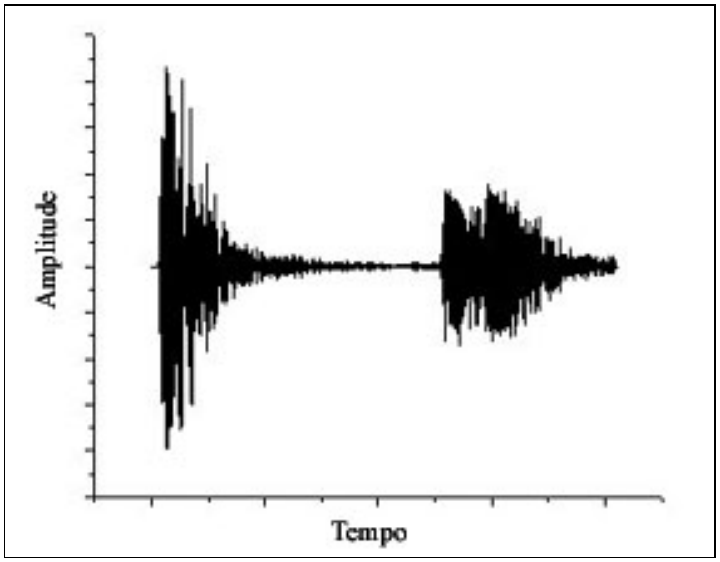

Figura 8.8: Duas formas de onda com valores de ASL muito próximos.

8.3 Conclusões do Quarto Grupo de Ensaios

Obteve-se sucesso em encontrar as rupturas das tiras do *riser* para os casos de fadiga de baixo ciclo. À medida que mais tiras são rompidas, existe uma tendência de que aumente o nível de ruído, o que pode dificultar a detecção das rupturas para sensores que estejam montados longe do local da ruptura (como ocorreu no caso dos sensores afastados de aproximadamente 6m).

Ainda que alguns dos resultados dos parâmetros para o limiar de 60dB estejam fora do limite de confiança estabelecido no Terceiro Grupo de Ensaios, acredita-se que eles estão mais próximos dos valores corretos do que os resultados para o limiar de 45dB. A quantidade de sinais que chegou aos sensores com limiar de 60dB foi consideravelmente menor do que no caso dos sensores de 45dB, mas mesmo assim foi possível detectar as rupturas dos arames.

Sugere-se que no futuro sejam utilizados pré-amplificadores que permitam um ganho menor do que 40dB. Isso necessariamente resultará na necessidade de escolha de um novo limiar e novos parâmetros temporais de aquisição.

9.0 CONCLUSÕES

Ocorreu uma evolução nos procedimentos de aquisição de dados e de análise à medida que os ensaios foram ficando mais complexos. Como conclusões finais dessa série de experimentos se pode citar:

- As rupturas de tiras foram captadas e distinguidas do ruído com sucesso para todos os ensaios, desde os mais simples de tração nas tiras até nos ensaios de fadiga de *risers* em escala real.

- Foi criada uma faixa de confiança (200μs para Tempo de Subida e 2ms para Duração) que pode ser usada para indicar má escolha de limiar e tempos de aquisição (PDT, HDT e HLT) para ensaios de tiras montadas em caixas. Essa faixa de confiança serve como guia para ensaios em *risers* em escala real.

- No ensaio do riser em escala real concluiu-se que apesar de ser possível detectar e distinguir rupturas de tiras do ruído das camadas atritando entre si, é necessária uma investigação com outros sensores sem pré-amplificação embutida e pré-amplificadores que permitam diminuir o ganho, para 0 ou 20dB por exemplo. Para o caso do emprego de sensores R15I-AST, acredita-se que um limiar de 60dB é mais apropriado do que um limiar de 45dB.

- A utilização de novos sensores e pré-amplificadores irá resultar na necessidade de uma nova avaliação de limiar e parâmetros temporais de aquisição.

- Para todos os ensaios de EA é necessária uma pré-filtragem dos dados antes da análise final. Um filtro que rejeite todos os sinais abaixo de 500 unidades de energia tipicamente resulta numa redução de 90% dos dados sem prejudicar a análise e detecção da ruptura das tiras.

- A análise de gráficos Amplitude x Tempo e Energia x Tempo foram as que resultaram nos melhores resultados para detecção das rupturas. Isso também reflete o fato destes parâmetros serem os menos influenciados por situações em que o ruído de fundo do sinal é elevado e fica logo acima do limiar de aquisição escolhido.

- Os parâmetros Amplitude, Energia e Número de Sinais são os parâmetros menos sujeitos a erros do tipo elevação temporária de ruído de fundo para as configurações de sistema e amostra utilizadas. Esses três parâmetros devem ser considerados preferencialmente para análises de reconhecimento de padrões neste caso.

10.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Repetir os ensaios das tiras dentro de caixas utilizando sensores com pré-amplificadores externos onde se possa escolher o ganho para 0, 10, 20 e 30dB.
- Modificar a geometria das caixas de modo que se possa montar três tiras por caixa, permitindo assim a comparação entre as rupturas das tiras que devem resultar em sinais acústicos diferentes devido à transferência de carga.
- Estudar novos parâmetros de aquisição (limiar e tempos de aquisição) para ensaios em escala reduzida de tiras e para ensaios de risers em escala real para a nova configuração de sensores e pré-amplificadores.
- Utilizar outros equipamentos de EA para aquisição de sinal como por exemplo o AMSY-5 da VALLEN e comparar resultados com o sistema Disp 16C da PAC.
- Implementar a utilização de redes neurais e outras técnicas de reconhecimento de padrões para tratar os resultados dos ensaios.

11.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLIN, J.M.; CAWLEY, P. **Design and construction of a low frequency wide band non-resonant transducer**. Ultrasonics 41, p.147-155, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (a). **ABNT NBR 15242**. Ensaios não destrutivos - Montagem de sensores piezoelétricos de contato para emissão acústica – procedimento. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (b). **ABNT NBR 15269**. Ensaios não destrutivos - Monitoração contínua por emissão acústica – Procedimento. 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 17B**: Recomended Practice for Flexible Pipe, 3ª edição, Março 2002.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial Ensaio por Ultra-Som**. Apostila ABENDE. Julho 2008.

ASM Metal´s Handbook. **Nondestructive Evaluation and Quality Control**. 9th edition, Volume 17. 1989

BAI, Y. **Pipelines and Risers -** Elsevier Ocean Engineering Book Series, vol. 3. 2001.

BENEVOLENSKI, O. I. et al. **Mode I fracture resistance of glass fiber mat-reinforced polypropylene composites at various degree of consolidation**. Composites: Part A 34, p.267–273, 2003.

BIANCOLINI, M.E. et al. **Fatigue cracks nucleation on steel, acoustic emission and fractal analysis.** International Journal of Fatigue 28, p.1820–1825, 2006.

BLITZ, J.; SIMPSON, G. **Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing.** Non-Destructive Evaluation Series. Ed. Chapman & Hall. 1996.

BOGARIN, J.A.G., EBECKEN, N.F.F. **Integration of Knowledge Sources for Flexible Pipe Evaluation and Design.** Expert Systems With Apllications, Vol. 10, No.1, pp.29-36, 1996.

CALLISTER, W. D. Jr. **Materials Science and Engineering, an Introduction**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 5ª edição, 2000.

CARNEVAL, R. de O., et al. **Flexible Line Inspection**. 9th European NDT Conference (ECNDT), Berlin, Alemanha, 2006.

CASEY, N.F. et al. **Frequency analysis of the signals generated by the failure of constituent wires of wire rope**. NDT International Vol. 18, No.6, December 1985.

CASEY, N.F. et al. **The acoustic evaluation of wire ropes immersed in water.** NDT International, Vol. 20, No. 3, June 1987.

CASEY, N. F. et al. **A review of the acoustic-emission monitoring of wire rope.** Ocean Engineering, vol. 24, no. 10, p. 935-947. 1997.

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

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. **CONTEC N-2409.** Specification for Flexible Pipe, SC-21. Rio de Janeiro. 2004.

DA SILVA, R.R. et al., 'Detection of the propagation of defects in pressurized pipes by means of the acoustic emission technique using artificial neural networks', Insight, Vol. 48, No 1, January 2006.

DE OLIVEIRA, R., MARQUES, A. T. **Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks**. Computers and Structures 86, p. 367–373, 2008.

DRUMMOND, G., et al. **Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing.** NDT&E International 40, p. 94–101, 2007.

ELMAN, P.; ALVIM, R. **Development of a Failure Detection System for Flexible Risers**. Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada, July 6-11, 2008

GAILLET, L. et al. **Diagnostic assessment of multi-layer cable anchorage by means of acoustic emission.** Bulletin de Laboratoires de Ponts et Chaussées 250-251, p.55-63, 2004.

GALLEGO, A. et al. **Coating adherence in galvanized steel assessed by acoustic emission wavelet analysis**. Scripta Materialia 52, p. 1069–1074, 2005.

GODIN, N. et al. **Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers.** NDT&E International 37, p.253–264, 2004.

GÓMEZ, M.P. et al. **Ultrasonic attenuation in Zircaloy-4**. CP760, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 24, 2005, American Institute of Physics.

GRAYELI, N**. Studies of steel microstructure by acoustical methods**, IEEE Ultrasonics Symposium, 1979.

HALLEY, J. M.; KUNIN, W. E. **Extinction Risk and the 1/f Family of Noise Models.** Theoretical Population Biology 56, p.215-230, 1999.

HANZAWA, M. et al. **Fatigue Behaviour of Large-Diameter wire Ropes**. Society of Petroleum Engineers Journal 26, p.421-428, June 1982.

HARROP, I.; SUMMERSCALES, J. **Acoustic emission testing of the structural integrity of multicore cable**. British journal of NDT Vol. 31, no. 7, 1989.

HEARN, E. J. **Mechanics of Materials 2 - An introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials**. Ed. Butterworth – Heinman. 3ª edição, 1997.

HUTCHINS, D.A. et al. **Surface Waves Using Laser Generation and Electromagnetic Acoustic Transducer Detection**. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroeletrics, and Frequency Control. Vol. UFFC-33, No.5, 1986.

JOHNSON, M. **Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component analysis**. NDT&E International 35, p. 367 – 376, 2002.

KAWAMOTO, S. **Use of AE/AU techniques for monitoring wood drying defects**. 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, EWGAE 2008.

KLINE, R.A.; Green, R. E. Jr. **A comparison of optically and piezoelectrically sensed acoustic emission signals**. Journal of Acoustic Society of America Vol 64(6), p. 1633-1639, 1978.

LANDIS, E.N.; WHITTAKER, D.B. **Acoustic Emissions and the Fracture Energy of Wood**. Condition Monitoring of Materials and Stuctures, Proceedings of Sessions of Engineering Mechanics 2000, Farhard Ansari, 2000.

LANDIS, E.N. e Baillon, L. **Experiments to Relate Acoustic Emission Energy to Fracture Energy of Concrete**. Journal of Engineering Mechanis, 2002.

LANGHORNE, P.J.; HASKELL, T.G. **Acoustic emission during fatigue experiments on first year sea ice**. Cold Regions Science and Technology 24 p.237-250, 1996.

LAURA, P. A. A., MATTHEWS, J. R. **Monitoring the status of a mechanical cable while in operation by means of the acoustic emission method**. Ocean Engineering, Vol. 12, No. 3, p.211-219, 1985.

LEMOS, C. A. de**. Análise de Fadiga em *Risers* Flexíveis.** Tese COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro 2005

LOKAJÍČEK, T.; Klíma.K. High Order **Statistics Approach: automatic determination of sign and arrival time of Acoustic Emission signals**. 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, EWGAE 2008.

LOUTAS, T.H. et al. **Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms.** Composites Science and Technology 66, p.1366–1375, 2006.

LYONS, G. J. et al. **Measurements from the Emerald instrumented flexible riser.** Engineering Structures vol. 18, no. 8, p. 615-627. 1996.

MARINHO, M. G. et al., **Integrity Assessment and Repair Techniques of Flexible Risers**, Proceedings of OMAE2006, June 4-9, 2006.

MARINHO M.G. et al. **Surface Monitoring Techniques for a Continuous Flexible Riser Integrity Assessment**. Offshore Technology Conference, Proceedings. OTC-18946-PP, 2007.

MCS INTERNATIONAL. **State of the Art Flexible Riser Integrity Issues,** Study Report prepared for UKOOA**.** Job No. 2-1-4-181, Doc No. 2-1-4-181 / SR01 Ver. 04, Abril 2001

MILLER, R. K. et al. **A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques**. NDT&E International 32, p. 1–8, 1999.

MIX, P. **Introduction to nondestructive testing, a training guide -** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2a. Edição, 2005.

MOORTHY, V. et al. **Acoustic emission technique for detecting micro- and macroyielding in solution-annealed AISI Type 316 austenitic stainless steel**. International Journal of Pressure Vessels & Piping Vol 64, pp 161-168, 1995.

OUT, J. M. M. et al. **The integrity of flexible pipe: search for an inspection strategy.** Engineering Structures vol. 17, No. 4, p. 305-314. 1995.

OZEVIN, D. et al. **Resonant capacitive MEMS acoustic emission transducers**. Smart Materials and Structures Vol 15, pp.1863-1871, 2006.

PAPARGYRIS, A.D.; Papargyri, S.A. **Acoustic emission characterization of kaolin-based clay ceramics**. Applied Clay Science 18, p. 191–204. 2001.

PAPOULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**. 3ª edição, McGraw-Hill series in electrical engineering, 1991.

PATEL, M.H., SEYED, F.B. **Review of flexible riser modelling and analysis techniques**. Engineering Structures, Vol. 17, No.4, pp.293-304, 1995.

PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION. **DiSP with AEwin USER´S MANUAL**. Rev.3. November 2005. Princeton Junction, NJ, USA.

PIOTRKOWSKI, R. et al. **Wavelet processing of Acoustic Emission signals from scratch test on nitride coatings**. DGZfP-Proceedings CC 90-CD, EWGAE 2004.

PIOTRKOWSKI, R. et al. **Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis**. NDT&E International 38, 260–267, 2005.

PUMAREGA, M. I. L. et al. **Study of acoustic emission sources and signals**. CP615, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol.21, 2002

RAMADAN, S. et al**. Contribution of Acoustic Emission to evaluate cable stress corrosion cracking in simulated concrete pore solution**. 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, EWGAE 2008.

RUIZ, A. et al. **Medición de ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica en un acero AISI 1020.** Ensayos No Destructivos Y Estructurales, CR Caballero, Ed. M.C. Ruch, 2005.

RUZZANTE, J. **Ondas elásticas, sensores y emissão acústica**. IT/A 69/98 Apostila.

SAEVIK, S.; BERGE, S. **Fatigue testing and theoretical studies of two 4in flexible pipes.** Engineering Structures, Vol. 17, No.4, pp.276-292, 1995.

SANCHEZ, R.L. **Barkhausen Effect and Acoustic Emission in a metallic glass – preliminary results.** CP700, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol.23, ed. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, 2004.

SERRANO, E. **Introducción a la Transformada Wavelet y sus aplicaciones al procesamiento de senales de Emisión Acústica**. Segundo Encuentro Latinoamericano de Emisión Acústica, E-GLEA2 2001.

SMITH, S.W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. Second Edition, California Technical Publishing, 1999.

SOARES, S. D. **Correlações entre Emissão Acústica de defeitos e parâmetros de Mecânica da Fratura na avaliação da integridade de dutos**. Tese. Rio de Janeiro 2008.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. 2ª edição, Cambridge University Press, 1998.

TECHNIP <http://www.technip.com/english/publications/p_download.html> Acesso 8 outubro. 2007.

THEOBALD, P.D et al. **Acoustic emission transducers – development of a facility for traceable out-of-place displacement calibration**. Ultrasonics Vol 43, pp.343-350, 2005.

THEOBALD, P. et al. **Couplants and their influence on AE sensor sensitivity**. 28th European Conference on Acoustic Emission testing, EWGAE 2008.

VALLEN, H. **AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications**. Vallen Systeme GmbH. <www.vallen.de> Acesso 13 de abril. 2007.

WITZ, J. A. **A Case Study in the Cross-section Analysis of Flexible Risers**. Marine Structures 9, p. 885-904. 1996.