



Murilo Giron Camerini

**Monitoramento de Risers Flexíveis Através
de Técnica Baseada em Vibrações**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Dr. Sérgio R. K. Morikawa

Rio de Janeiro
Abril de 2012



Murilo Giron Camerini

**Monitoramento de Risers Flexíveis Através
de Técnica Baseada em Vibrações**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Sérgio Ricardo Kokay Morikawa

Co-Orientador

PETROBRAS

Dr. Sérgio Damasceno Soares

PETROBRAS

Dr. Luiz Cláudio de Marco Meniconi

CENPES/PETROBRAS

Prof. Miguel de Andrade Freitas

CETUC – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Murilo Giron Camerini

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2009. Atualmente trabalha no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio. Tem como áreas de interesse o setor de petróleo e energia.

Ficha Catalográfica

Camerini, Murilo Giron

Monitoramento de risers flexíveis através de técnica baseada em vibrações / Murilo Giron Camerini ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador: Sérgio R. K. Morikawa. – 2012.

94 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Monitoramento da integridade estrutural. 3. Dutos flexíveis. 4. Monitoramento de dutos. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Morikawa, Sérgio R. K. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Arthur Martins Barbosa Braga pelo apoio e orientação na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Sérgio Ricardo Kokay Morikawa pelo estímulo e parceria no desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos e companheiros de trabalho Msc.Tiago Baltar Simões e Dr. Roberth Waldo Angulo Llerena por todo apoio e amizade.

Ao excelente time do Laboratório de Sensores à Fibra Óptica. Carla, Sully, Alex, Guedes, Paula, Leonardo, Angélica, “Bento”, Takahashi, “Tiagão”, Victor Hugo, Fabiano, Luciana, Samia, Maria Clara, Felipe, João Gabriel.

Ao Dr. Miguel Freitas e sua capacitada equipe do Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção pelo apoio e ajuda técnica.

Ao Centro de Pesquisa da Petrobras e toda equipe do TMEC por viabilizar essa pesquisa.

Ao LAMEF e ao LTS, pelo apoio durante os testes realizados.

À PUC-Rio, pelo suporte concedido, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu Pai, pela amizade, conselhos e sugestões na vida e neste trabalho.

À minha Mãe, por todo carinho, amor e incentivo.

Aos meus irmãos Flavia, Cesar e Isabel, pela amizade, companhia, paciência e por tornarem mais fácil a realização deste trabalho e de tantos outros.

A todos os amigos e familiares que de certa forma me ajudaram, apoiaram e me estimularam para realização desse trabalho.

Resumo

Camerini, Murilo Giron; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Monitoramento de risers flexíveis através de técnica baseada em vibrações**. Rio de Janeiro, 2012. 94p. Dissertação de Metrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais mecanismos de falha em *risers* flexíveis é o rompimento de arames da armadura de tração. A experiência tem mostrado que esta classe de dano tende a surgir primariamente na parte emersa do *riser*, próximo à sua terminação. A ruptura dos arames ocorre de forma progressiva, podendo ser causada por diferentes processos, tais como corrosão pelo ingresso de fluido no espaço anular entre capa e armadura, desgaste excessivo associado com o contato e atrito entre arames adjacentes ou entre as diferentes camadas metálicas da armadura, ou mesmo a presença de níveis elevados de tensões produzidas pelos carregamentos mecânicos aos quais o *riser* é submetido durante a operação. O deterioramento progressivo pode dar origem a defeitos localizados que agem como concentradores de tensão e levam o arame à ruptura através de um processo de fadiga. O duto flexível é capaz de manter-se em operação mesmo com alguns dos arames de suas armaduras rompidos, porém uma sequência de rupturas pode levar à ocorrência de vazamentos ou mesmo a falhas catastróficas. O monitoramento contínuo em tempo real é uma das principais alternativas para evitar que o dano progressivo nas armaduras do *riser* resulte em acidentes com severas consequências econômicas e ambientais. As técnicas de monitoramento da integridade de *risers* flexíveis podem ser classificadas como diretas, onde é possível identificar diretamente a existência de um dano/falha, ou indiretas, em que o sistema de sensoriamento registra indicações secundárias, possivelmente consequência da falha. Esta dissertação relata o desenvolvimento de um sistema de monitoramento baseado em vibrações. Trata-se de uma técnica indireta baseada em eventos, onde no momento da ruptura do arame um sinal de vibração, distinto tanto na frequência quanto na amplitude, é detectado por acelerômetros instalados na capa polimérica externa do *riser*. No trabalho, são apresentados resultados de quatro ensaios em escala real que demonstraram a viabilidade do sistema para um primeiro teste de campo. Estratégias de instrumentação dos dutos e as variações

dos sinais detectados são apresentadas e discutidas. Os resultados mostraram que a resposta vibratória do sinal de ruptura apresenta características específicas, garantindo uma boa confiabilidade na detecção. Porém, em se tratando de uma técnica indireta, verifica-se que quando dois sistemas de monitoramento de naturezas complementares são empregados em conjunto, as probabilidades de detecção dos eventos de rupturas aumentam significativamente.

Palavras-chave

Monitoramento da Integridade Estrutural; Dutos flexíveis; Monitoramento de Dutos.

Abstract

Camerini, Murilo Giron; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Flexible risers monitoring technique based on vibration measurements.** Rio de Janeiro, 2012. 94p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main failure in flexible risers is the disruption of the wires from the tensile armor layer. Experience has shown that this class of damage occurs primarily near to the top riser connector. The breaking of the wires occurs gradually and may be caused by different processes as corrosion by inflow of fluid in the annular space, excessive wear associated with the contact and friction between adjacent wires or between different riser layers. The progressive deterioration can lead to localized defects that act as stress concentrators and may break the wire from the tensile armor layer through a fatigue process. The flexible pipe is able to remain in operation even with some broken wires, but a sequence of ruptures can conduce to a catastrophic failure. Real time continuous monitoring is one of the main alternatives to prevent progressive wire damage results in an accident with severe economic and environmental consequences. This thesis describes the development of a monitoring system based on vibrations. This is an indirect technique based on events, where in the moment of the wire break, one vibration signal is registered. This signal can be distinguished both in frequency and amplitude and detected by accelerometers installed on the polymeric outer layer of the riser. We present results of four tests in real scale that demonstrated the viability of the system for an initial field test. Instrumentation strategies in riser and the variations of the signals detected are presented and discussed. The results showed that the vibrational signal has specific characteristics ensuring good detection reliability.

Keywords

Structural Health Monitoring; Flexible Pipes; Pipeline Monitoring.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1. Dutos Flexíveis	19
1.1.1. Carcaça Metálica (1)	22
1.1.2. Camada (polimérica) de Pressão Interna (ou barreira de pressão) (2)	22
1.1.3. Armadura (metálica) de Pressão (3 e 4)	23
1.1.4. Armadura Interna e Externa de Tração (5 e 6)	23
1.1.5. Conjunto de Fitas de Alta Resistência (7)	24
1.1.6. Capa (polimérica) Externa (8 e 9)	24
1.1.7. Camada de Isolamento Térmico	25
1.1.8. Conexão	25
1.2. Histórico de Falhas	26
1.2.1. Conexão de Topo	26
1.2.2. Armadura de Tração	27
1.2.3. Carcaça	28
1.3. Outras Técnicas para Monitoramento de <i>Risers</i>	29
1.3.1. Monitoramento com Fibra Óptica	29
1.3.1.1. Sensores de Redes de <i>Bragg</i>	29
1.3.1.1.1. MODA	30
1.3.1.1.2. Colar Óptico e Colar óptico 3D	31
1.3.2. Televisionamento	33
1.3.3. Monitoramento por Emissão Acústica	34
1.3.4. <i>SubC-mat</i> - Monitoramento por vibração	35
1.4. Objetivo do Trabalho	36
2 SISTEMA DE MONITORAÇÃO POR VIBRAÇÕES	37
2.1. Tipos de Acelerômetros	37
2.1.1. Acelerômetro Eletro-mecânico	38
2.1.2. Acelerômetro Capacitivo	38
2.1.3. Acelerômetro Piezelétrico	39
2.1.4. Acelerômetro Piezoresistivos	39

2.2. Técnica Indireta de Monitoramento	39
2.3. Sistema de Aquisição	39
2.3.1. Primeiro Protótipo	40
2.3.2. Segundo Protótipo	43
3 TESTES E RESULTADOS	45
3.1. Testes	45
3.2. Primeiro Teste / COPPE-LTS	46
3.2.1. Instrumentação	48
3.2.2. Resultados	50
3.3. Segundo Teste / LAMEF- UFRGS	54
3.3.1. Instrumentação	56
3.3.2. Resultados	57
3.3.3. Ruídos e Acomodações	60
3.3.4. Análise das Frequências	62
3.3.4.1. Efeito <i>Aliasing</i>	63
3.4. Terceiro Teste / LAMEF – UFRGS	65
3.4.1. Instrumentação	67
3.4.2. Resultados	68
3.5. Quarto Teste / LAMEF – UFRGS	71
3.5.1. Instrumentação	73
3.5.1.1. Vibração	73
3.5.1.2. Fibra Óptica	74
3.5.2. Resultados	76
4 CONCLUSÕES	86
4.1. Trabalhos Futuros	89
5 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	90

Lista de Figuras

Figura 1.1- <i>Riser</i> com falhas na armadura de tração identificadas pelas linhas longitudinais referenciais.	17
Figura 1.2-Imagem em camadas da estrutura de um <i>riser</i> e um <i>flowline</i> . (Coflexip_Curso Geraldo Spilnelli PUC-Rio)[6].	20
Figura 1.3- Seção transversal de um umbilical [6].	20
Figura 1.4-Esquemático da configuração dos diferentes tipos de dutos flexíveis em um sistema marítimo de produção [6].	21
Figura 1.5-Estrutura padrão de um duto flexível.	22
Figura 1.6-Carcaça metálica[8].	22
Figura 1.7-Perfil em Z e em T [3].	23
Figura 1.8-Perfil da armadura de tração.	24
Figura 1.9-Aplicação das camadas de fitas durante o processo de fabricação do duto flexível.	24
Figura 1.10- Aplicação das camadas isolante durante o processo de fabricação do duto flexível.	25
Figura 1.11-Rompimento dos arames próximo ao conector em processo de fadiga [11].	27
Figura 1.12-Defeito tipo “gaiola de passarinho” no meio da amostra[12].	28
Figura 1.13-Defeito na terminação do duto flexível[12].	28
Figura 1.14-Visão externa do defeito[12].	28
Figura 1.15-Vista interna[12].	28
Figura 1.16- Princípio de funcionamento das redes de <i>Bragg</i> .	30
Figura 1.17- Visualização gráfica do Sistema MODA [14,35].	31
Figura 1.18-Diferentes comprimentos de colar óptico [3].	32
Figura 1.19-Colar óptico instalado em testes de laboratório	32
Figura 1.20- Representação esquemática do colar óptico.	33
Figura 1.21-Colar óptico 3D instalado em campo.	33
Figura 1.22-Interface do software de monitoramento por televisionamento. (A) Alvo fixo no <i>riser</i> (B) Imagem do <i>riser</i> digitalizada e de onde é extraído o ângulo de torção (C) e (D) Gráficos de torção <i>versus</i> tempo	34
Figura 1.23-Protótipo do sistema monitoramento baseado em vibrações [16].	35
Figura 2.1-Primeiro protótipo de aquisição de sinais.	41
Figura 2.2-Registro de um evento simulado.	43

Figura 2.3-Segundo protótipo de sinais de vibração para monitoração de <i>risers</i> flexíveis	43
Figura 3.1-Quadro de tração no LTS. Amostra preparada para o primeiro ensaio.	47
Figura 3.2-Confecção de entalhe, via corte com disco de corte, em um dos arames da armadura de tração	48
Figura 3.3-Sensores 1 e 2 instalados junto ao conector travado.	49
Figura 3.4-Sensores 3,4,5 e 6 na seção cilíndrica do <i>riser</i> .	49
Figura 3.5-Sensores 7 e 8 instalados junto ao conector de carregamento.	49
Figura 3.6-Ilustração do sistema de instrumentação dos acelerômetros	50
Figura 3.7- Sinal típico de ruptura detectado durante o teste.	51
Figura 3.8-Distribuição radial dos níveis de vibração em $g(m/s^2)$ numa seção transversal da amostra, para 5 rupturas de arame.	53
Figura 3.9- acelerômetro especificado.	54
Figura 3.10-Aplicação de pontos de solda e ácido para fragilização dos arames.	55
Figura 3.11- <i>Riser</i> instrumentado para início dos testes. As setas indicam a posição dos acelerômetros.	55
Figura 3.12-Disposição dos sensores na amostra (medidas em mm).	56
Figura 3.13-Gráfico imediato do <i>software</i> de análise. Sinal registrado no momento da ruptura de um arame. Detalhe para a saturação dos picos, ultrapassando o fundo de escala.	58
Figura 3.14-Gráfico com o sensor de sensibilidade 10mV/g. Taxa de aquisição de 12,5 kHz.	59
Figura 3.15-Sinal no conector identificado pelo sensor 00.	61
Figura 3.16- Análise no domínio da frequência dos sinais durante a ruptura do 4º até o 9º arame.	62
Figura 3.17-Sinal de ruído no conector no domínio da frequência.	63
Figura 3.18-Simulação em MATLAB do efeito de <i>aliasing</i> .	64
Figura 3.19- Injeção de água salgada saturada com CO ₂ e o controle de temperatura.	66
Figura 3.20- <i>Riser</i> no quadro de tração para início do teste. Acelerômetros indicados com seta.	66
Figura 3.21-Instrumentação do acelerômetro.	67
Figura 3.22-Esquemático da cinta de fixação do acelerômetro no <i>riser</i> .	68
Figura 3.23 – Sinal da quarta ruptura	69
Figura 3.24-Sinal de cada sensor registrado durante a quarta ruptura	70
Figura 3.25-Rompimento do nono arame. Janela em destaque para análise do tempo e amplitude do sinal.	70

Figura 3.26-Detalhe de cada sensor. Com uma escala mais aproximada é possível verificar o local de ruptura dos arames. As amplitudes maiores no sensor 00 e no sensor 01 indicam que a falha ocorreu perto desses sensores. É perceptível a variação no tempo de resposta de cada sensor, auxiliando também na identificação.	71
Figura 3.27- Tempo de resposta de cada sensor.	71
Figura 3.28- <i>Riser</i> no quadro de tração. Acelerômetros e os sensores ópticos instrumentados para início do 4º teste. Acelerômetros em círculo vermelho são indicados na figura e as setas indicam o local dos sensores ópticos.	73
Figura 3.29-Disposição dos acelerômetros no duto flexível.	73
Figura 3.30-Disposição dos sensores de fibra óptica no duto flexível.	74
Figura 3.31-Sensores ópticos instrumentados na capa do <i>riser</i> .	75
Figura 3.32-Sinal de ruptura medido pelo colar óptico 3D. O degrau corresponde ao momento da ruptura.	76
Figura 3.33-Disposição dos rompimentos.	77
Figura 3.34-Sinal no atuador e referente à primeira ruptura.	78
Figura 3.35- Sinal no lado engastado referente à terceira ruptura.	79
Figura 3.36-Sinal no lado engastado da amostra e referente à décima terceira ruptura (último rompimento).	80
Figura 3.37-Aumento da amplitude dos sinais com o decorrer das rupturas.	81
Figura 3.38-Esquemático de propagação do sinal em campo.	83
Figura 3.39-Rupturas dos arames no tempo.	84

Lista de Tabelas

Tabela 2.1-Equipamentos presentes no desenvolvimento do primeiro protótipo.	41
Tabela 3.1-Eventos de ruptura em ordem cronológica.	52
Tabela 3.2-Diferença entre os 2 primeiros testes.	59
Tabela 3.3-Resumo dos resultados registrados. Aceleração máxima em g (m/s^2).	60
Tabela 3.4-Ordem cronológica dos eventos	68
Tabela 3.5- Cronologia de rupturas do quarto teste.	81
Tabela 3.6 – Atenuação da potência entre os sensor 01 e 02.	82
Tabela 3.7-Registro dos eventos	85

1 Introdução

Os desafios impostos por novos campos de produção em águas profundas e ultra profundas levam as estruturas e os equipamentos de produção *offshore* a operarem cada vez mais próximos de seus limites. Com isso, a indústria do petróleo vem-se aprimorando e desenvolvendo novas tecnologias para acompanhar as recentes descobertas. No Brasil, cerca de 91,2% da produção de óleo e gás [1] provém de reservatórios em águas profundas. A partir da exploração dos campos das camadas pré-sal, essa porcentagem tende a subir ainda mais.

No ano de 1968, foi iniciada no Brasil, pela Petrobras, a prospecção petrolífera no mar, um marco na história da empresa, pois abriu frente para a exploração e extração em águas profundas e ultra profundas [2]. Com isso, a empresa se tornou uma das líderes mundiais no cenário de produção *offshore*, sendo reconhecida mundialmente pela sua tecnologia de ponta, capaz de desenvolver as tecnologias demandadas pelas novas descobertas.

Em abril do ano de 2006 foi colocada em operação a plataforma P-50, instalada na bacia de Campos no campo de Albacora Leste, a aproximadamente 120 km do litoral e com uma capacidade de produzir cerca de 180 mil barris por dia. Com esse feito, o Brasil, pela primeira vez na sua recente história de exploração de petróleo, atingiu a sua autossuficiência na produção de hidrocarbonetos, produzindo cerca de 1,8 milhões de barris diários, 0,2 milhões a mais de barris do que a o consumo diário interno [1].

Atualmente, o mercado nacional de exploração de óleo resume-se principalmente na produção *offshore*, sendo responsável por 91,2% de toda extração de óleo no País. E foi na bacia de campos que a Petrobras encontrou a sua maior reserva de óleo, responsável por 79% da produção nacional [1]. Esses acontecimentos vinculados com as recentes descobertas de óleo da camada do pré-

sal elevam a Petrobras ao patamar de maior exploradora de petróleo e gás em águas profundas do mundo.

Um dos principais desafios para a produção em águas profundas é a manutenção da integridade dos dutos que ligam a plataforma ao leito marinho. Como a lâmina d'água é cada vez maior, viu-se a necessidade de desenvolver novos dutos que seriam capazes de trabalhar melhor nessas condições de operação. Com isso, surgiram os dutos flexíveis, compostos de várias camadas com diferentes materiais, que com sucesso entraram no mercado *offshore* ganhando destaque e espaço na indústria nacional, estando presentes na maioria das plataformas de produção e exploração e nas conexões e interligações submarinas de escoamento de petróleo e gás. Há cerca de 30 anos os dutos flexíveis dominam o mercado nacional, tendo a Petrobras tornado-se uma das maiores consumidoras de flexíveis do mundo, alcançando uma marca próxima dos 8000 quilômetros de linhas instaladas, um patrimônio estimado em cerca de 15 bilhões de reais [3].

Os dutos flexíveis operam em ambientes corrosivos e estão sujeitos a grandes carregamentos devido às pressões interna e externa, abrasão com o leito marinho, pelas forças das marés e agentes externos. O caso mais crítico para um duto flexível é quando ele se apresenta em trecho vertical, sujeitando-se ao carregamento axial devido ao seu peso próprio. Nesta configuração o duto é chamado de *riser*.

A falha de um *riser* flexível pode trazer sérias consequências econômicas e ambientais. Além disso, custos com intervenções para reparo ou manutenção nestes dutos são elevados. Também significativas são as potenciais perdas ocasionadas pela sua indisponibilidade em paradas não programadas, acarretando em atrasos nas metas de produção e conseqüentemente no retorno do capital investido. Ao mesmo tempo, os altos riscos ambientais associados com a atividade de exploração e produção de hidrocarbonetos trazem exigências ainda mais severas no que diz respeito à garantia da integridade dos sistemas produtivos. Neste contexto, é fundamental lançar mão de estratégias de gerenciamento da manutenção que maximizem a disponibilidade dos sistemas de produção e garantam sua integridade ao longo do maior período possível, quando factível estendendo a vida útil para além daquela prevista em projeto. O monitoramento

contínuo e em tempo real da integridade estrutural de *risers* flexíveis é parte fundamental destas estratégias.

Estudos e a experiência operacional vêm demonstrando que os principais pontos de falhas dos dutos flexíveis estão na armadura de tração, que é uma camada em que arames metálicos dispostos em helicóide resistem principalmente aos carregamentos axiais sobre o duto. Essas falhas se apresentam com maiores frequências nas terminações dos *risers*, onde a concentração de tensões e os carregamentos são mais elevados [4].

A fotografia reproduzida na Figura 1.1 mostra um *riser* em operação que apresenta falha em um ou mais de seus arames da armadura de tração. Este tipo de falha induz alterações na capa polimérica do *riser*, gerando deformações seguidas de torção devido ao rompimento do arame. Nota-se claramente na Figura 1.1 a deformação na capa do *riser*.

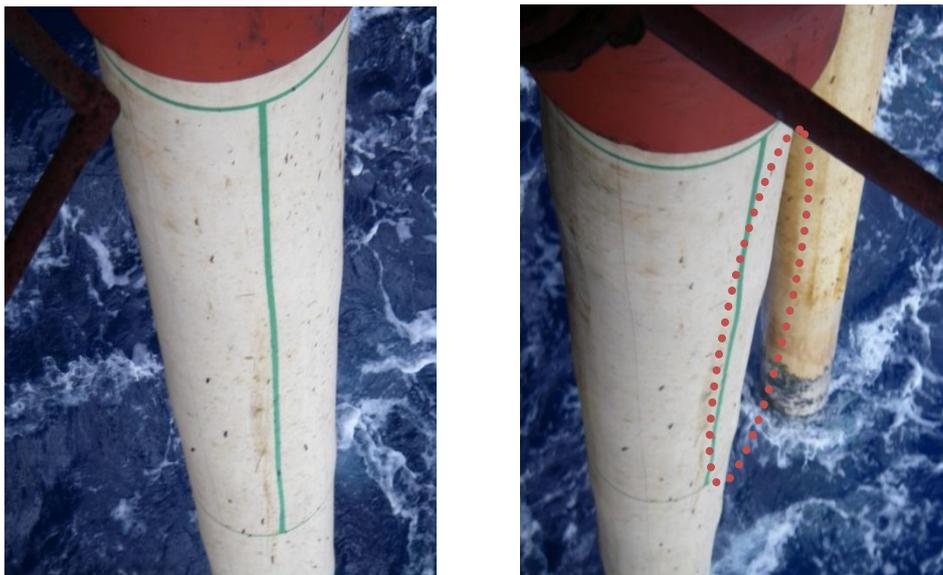


Figura 1.1-*Riser* com falhas na armadura de tração identificadas pelas linhas longitudinais referenciais.

Mesmo com alguns arames rompidos o *riser* pode continuar em operação. Entretanto, o carregamento será agora distribuído por um número menor de arames da armadura que passam a sofrer sobrecargas. Assim, a sequência de rupturas dos arames na armadura de tração é um mecanismo de dano progressivo. O dano inicia-se em um ou alguns poucos arames e continua propagando-se pelos

demais, até que a estrutura perde a capacidade de operar podendo inclusive perder a capacidade de contenção do fluido ou mesmo falhar de forma catastrófica.

Uma das primeiras técnicas empregadas pela Petrobras a fim de monitorar falhas na armadura de tração consistiu na impressão de uma linha longitudinal de referência ao longo do duto flexível como apresentado na Figura 1.1. Esta forma simples de monitoramento visual permite identificar de forma fácil a torção e os protuberâncias na capa polimérica decorrente de rupturas na armadura. A técnica porém é pouco eficiente, e, entre outras limitações, depende das condições de visibilidade do local onde o *riser* está instalado.

A necessidade de disponibilizar técnicas quantitativas e de maior confiabilidade estimulou a Petrobras a iniciar um projeto em parceria com a PUC-Rio que basicamente visa estudar e desenvolver técnicas que viabilizam a monitoração e inspeção de dutos flexíveis. Várias propostas foram desenvolvidas e testadas com o objetivo de monitoramento dos *risers* em operação, dentre elas destacam-se as técnicas com sensores a fibra óptica, processamento de imagens, vibração, magnetismo e emissão acústica.

O que será abordado nesse trabalho são os resultados do estudo que compreende a captura e identificação do sinal de vibração gerado no momento da ruptura do arame da armadura tração. Trata-se de um enfoque que ainda não havia sido explorado para o monitoramento de falhas em arames das armaduras de dutos flexíveis, e que teve início com o trabalho relatado nesta dissertação.

Cabe ressaltar que pesquisas envolvendo emissão acústica para o monitoramento de falhas em trechos de *risers* flexíveis já vem sendo estudada a longo tempo [5]. Porém, apesar da técnica envolvendo emissão acústica ser de mesma natureza física da técnica baseada em acelerômetros para registro de transientes de vibração, as frequências envolvidas entre os dois métodos são de ordens de grandeza bem diferentes. O que difere completamente o tipo de sinal registrado e analisado.

O sistema de monitoramento desenvolvido é baseado na detecção de eventos. Sensores de vibração fixados na capa externa do *riser* ou no seu conector capturam sinais transientes produzidos pela ruptura dos arames das armaduras.

Além dos equipamentos de aquisição de dados, o sistema possui um software que analisa continuamente os sinais produzidos pelos acelerômetros. Quando a amplitude destes sinais atinge um patamar pré-estabelecido, o sistema grava as medidas efetuadas pelos acelerômetros e emite um sinal de alarme indicando a ocorrência de um evento. O sistema foi testado com sucesso em laboratório através de três ensaios em escala real, onde amostras de tubos flexíveis foram submetidas a diferentes carregamentos e processos para iniciação da falha por rompimento de arames das armaduras de tração. Nos três testes, 100% dos eventos de ruptura foram detectados pelo sistema desenvolvido.

Nesta seção será apresentado o funcionamento dos dutos flexíveis, assim como seus principais pontos de falhas e suas consequências.

1.1. Dutos Flexíveis

Dutos flexíveis apresentam várias camadas de materiais distintos e basicamente operam em duas configurações distintas, chamadas de *riser* e *flowline*. O *riser* trabalha estaticamente ou dinamicamente e é o trecho responsável por ligar o leito marinho até a plataforma. Já o *flowline*, trabalha estaticamente e realiza todas as ligações entre os poços e os equipamentos submarinos até chegar à seção do *riser*. Esses dois tipos apresentam pequenas diferenças no projeto, principalmente no número de camadas como demonstrado na Figura 1.2. O *riser*, por estar sujeito a carregamentos dinâmicos axiais e flexionais, geralmente apresenta um maior número de camadas que o *flowline*.



Figura 1.2- Imagem em camadas da estrutura de um riser e um flowline. (Coflexip_Curso Geraldo Spilnelli PUC-Rio)[6].

Existem alguns outros tipos de dutos flexíveis, como os umbilicais, Figura 1.3, que levam linhas elétricas, hidráulicas e ópticas para a cabeça do poço, apresentam camadas principais de resistência à tração, pressão e estanqueidade [7].



Figura 1.3- Seção transversal de um umbilical [6].

Uma particularidade desses três tipos de linhas flexíveis citadas acima, é que cada camada tem sua função individual, auxiliando muito pouco na função das camadas adjacentes. Ou seja, a camada responsável por sustentar a pressão interna, em pouco colabora para a resistência ao carregamento axial. Com isso, cada camada do duto tem sua função fundamental na composição do flexível e o monitoramento independente das camadas críticas tem que ser levado em consideração para garantir a integridade completa do duto.

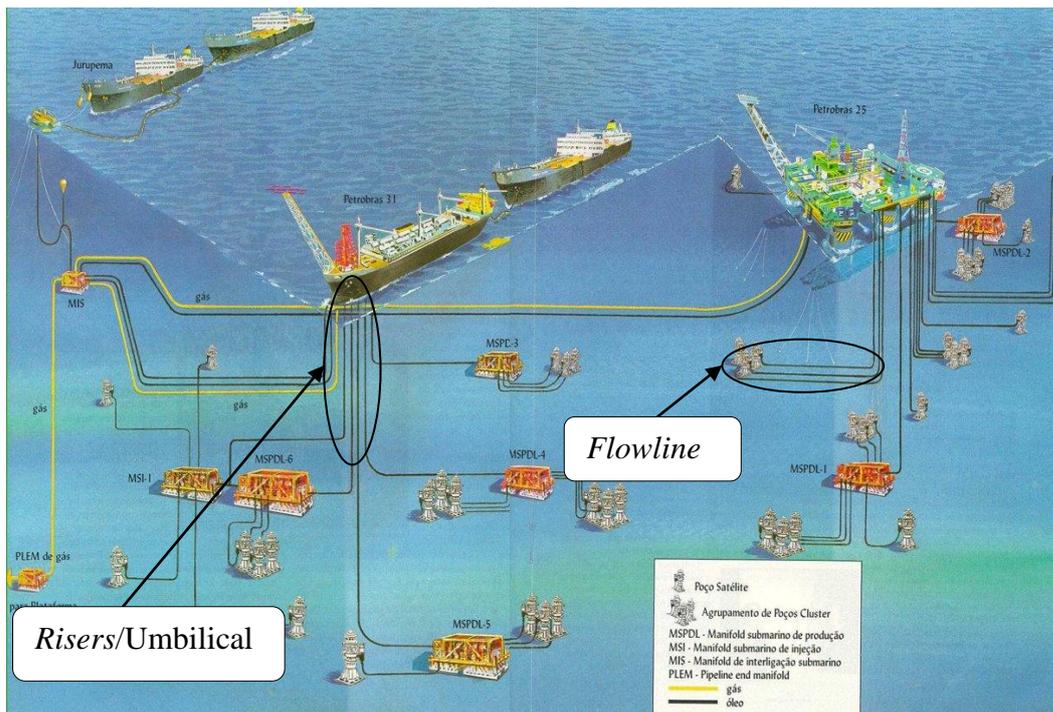


Figura 1.4-Esquemático da configuração dos diferentes tipos de dutos flexíveis em um sistema marítimo de produção [6].

As principais empresas fabricantes de dutos flexíveis instalaram suas fábricas no Brasil nos últimos anos para atender a demanda no País, principalmente da Petrobras. A *Technip* com uma fábrica situada no Espírito Santo e a *Wellstream* baseada no Rio de Janeiro são as principais fornecedoras de dutos flexíveis. Mais recentemente a dinamarquesa *NKT* tem entrado no mercado nacional importando as linhas de sua sede na Dinamarca.

Além das razões técnicas, outro motivo que faz com que o mercado de dutos flexíveis cresça bastante, está relacionado às questões de ordem comercial, como por exemplo, a logística de transporte e instalação para esses dutos flexíveis é muito mais simples quando comparado com a instalação e o transporte de tubos rígidos.

Serão apresentadas abaixo as principais camadas que estão presentes no duto flexível. Trata-se de uma estrutura de corpo tubular composta por camadas, cada uma delas dotada de uma ou mais funções principais. Do interior para o exterior, temos:

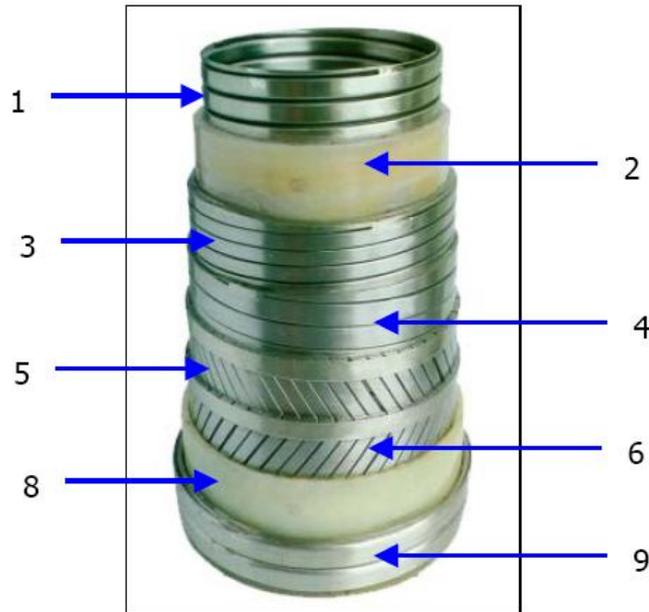


Figura 1.5-Estrutura padrão de um duto flexível.

1.1.1. Carcaça Metálica (1)

Camada mais interna, que apresenta contato direto com o fluido de injeção ou produção. Tem como suas principais funções prover a resistência ao colapso hidrostático e resistir a compressões mecânicas radiais

Seu perfil é fabricado em aço inoxidável e apresentado na forma de letras ‘S’ intertravados entre si como apresentado na Figura 1.6 e disposto em helicoides [8].

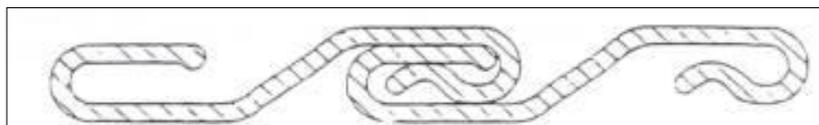


Figura 1.6-Carcaça metálica[8].

1.1.2. Camada (polimérica) de Pressão Interna (ou barreira de pressão) (2)

Camada de polímero com espessuras que variam de acordo com o projeto da linha. Principal função é garantir a estanqueidade interna da linha do duto flexível.

1.1.3. Armadura (metálica) de Pressão (3 e 4)

Perfis metálicos que podem apresentar formas de Z, C ou T (Figura 1.7), intertravados entre si e dispostos em helicoide, semelhante à carcaça metálica. O material dessa camada é aço carbono, uma vez que sua estrutura não apresenta contato direto com fluidos de produção e injeção. Suas principais funções são suportar a camada polimérica de pressão interna e dar resistência mecânica na direção radial, tanto a pressão interna quanto colapsos hidrostáticos. As linhas flexíveis geralmente apresentam duas camadas de armadura de pressão para garantir uma resistência adicional na direção radial [8].

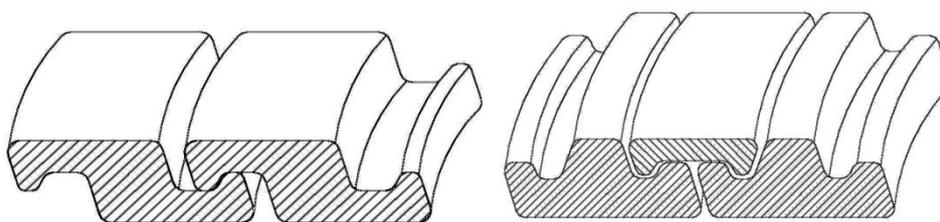


Figura 1.7-Perfil em Z e em T [3].

1.1.4. Armadura Interna e Externa de Tração (5 e 6)

Camadas metálicas compostas por arames em helicoide, os dutos flexíveis podem apresentar até quatro armaduras de tração para sustentação dos esforços axiais presentes no duto. De acordo com objetivo do projeto o número de arames dessa camada pode variar, assim como a seção transversal de cada arame. A geometria do arame pode variar, mas nas maiorias das vezes os arames apresentam uma seção transversal retangular com bordas e quinas adoçadas, como observado na Figura 1.8. Os arames estão submetidos a elevadas tensões, sendo construídos com aço carbono ABNT 1060, com alta resistência mecânica, 1400MPa.

O ângulo de “armagem” da armadura de tração também é passível de alteração e está diretamente associado à resistência mecânica do duto flexível. Caso o *riser* seja especificado para uma maior sustentação axial, o ângulo da helicoide pode atingir até 25 graus em relação ao eixo longitudinal do duto. Porém se o duto flexível precisar de maior resistência radial o ângulo da helicoide pode

chegar a 55 graus. Esse valor é definido de acordo com cada projeto e aplicação da linha flexível. A disposição em helicóide da armadura de tração apresenta ângulos opostos para evitar possível torção na linha. Ou seja, se a camada interna apresentar 55°, a camada externa, obrigatoriamente, deverá apresentar -55°.

Devida à importância de sustentação do duto, essa camada do flexível ganhou destaque na indústria de inspeção e monitoramento.

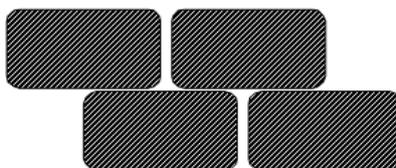


Figura 1.8-Perfil da armadura de tração.

1.1.5. Conjunto de Fitas de Alta Resistência (7)

Fitas de poliamida, fibra de vidro ou Kevlar, geralmente com 1,5mm de espessura, são utilizadas como revestimento no duto flexível após a camada da armadura de tração. A fita apresenta uma função estrutural de grande importância, sendo capaz de garantir a resistência mecânica na direção radial, impedindo folgas radiais ou o desarranjo das armaduras de tração. Podem ser aplicadas em várias camadas e em sentidos alternados. Figura 1.9. Variando de acordo com a resistência requerida em cada projeto de linha flexível.

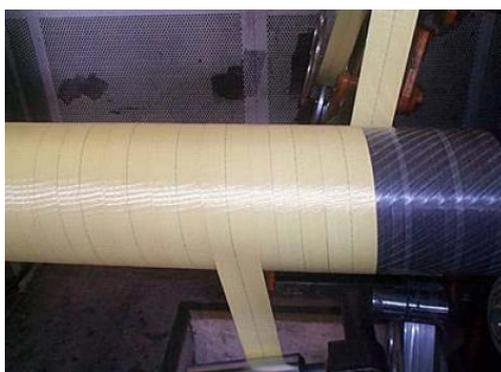


Figura 1.9-Aplicação das camadas de fitas durante o processo de fabricação do duto flexível.

1.1.6. Capa (polimérica) Externa (8 e 9)

Última camada do duto flexível, logo após a aplicação das fitas de alta resistência, é extrudada a quente e pode apresentar materiais de Poliamida (Rilsan) ou Polietileno (TP-Flex).

Promove a estanqueidade do ambiente externo marinho, evitando a entrada de água para dentro da linha e assim protegendo as camadas internas. Tem também como finalidade atuar como proteção mecânica e à corrosão, evitando também possíveis defeitos devido à erosão com o leito marinho e/ou corais ou até mesmo a abrasão no contato com outro *riser*. Ultimamente os dutos estão sendo fabricados com uma dupla camada polimérica, com a finalidade de proteger ainda mais o flexível.

1.1.7. Camada de Isolamento Térmico

É responsável por isolar termicamente, quando necessário, a linha flexível. Evitando a geração de parafina e hidratos quando o fluido de transporte é afetado termicamente com as baixas temperaturas da água.



Figura 1.10- Aplicação das camadas isolante durante o processo de fabricação do duto flexível.

1.1.8. Conexão

A conexão de topo é um ponto importante e crítico entre a interface do duto flexível e a plataforma. Na terminação, os arames da armadura de tração são montados de forma artesanal, o que pode gerar modificações na estruturação do material podendo causar trincas e vir a falhar nesse ponto.

Como é um local que sofre grande influência das marés e movimentação da plataforma, geralmente o conector recebe um enrijecedor cônico, denominado de *Bend Stiffener*, com a finalidade diminuir os esforços dinâmicos próximos à terminação do *riser*.

1.2. Histórico de Falhas

Os *risers* têm a finalidade de transportar petróleo e gases dos poços de petróleo ou transferi-los até as plataformas ou navios de produção. Entretanto, eles não transportam apenas óleo e gás, produtos químicos para estimulação dos poços e compostos altamente corrosivos também são injetados ou produzidos pelos poços. Portanto, é necessária uma manutenção e uma monitoração preventiva dessas linhas, uma vez que esses produtos aceleram a corrosão do flexível, diminuindo consideravelmente a sua vida útil [9].

Durante a produção de um fluido que contenha gás no interior dos dutos flexíveis, a camada de pressão plástica pode vir a permitir uma difusão do gás em função da temperatura e da pressão de operação do duto. Com isso, poderá ser criado um ambiente corrosivo no anular do duto, local entre as duas camadas estanques do duto flexível, e com isso danificar camadas metálicas presentes no anular.

Para mapear as falhas no duto flexível em cada camada, a Petrobras criou uma Norma N-2409 visando registrar os principais problemas e acontecimentos que possam a levar o duto a não operar como projetado [10].

Serão discutidos nesse trabalho apenas os principais e mais recorrentes tipos de falha no duto flexível. A fim de facilitar o entendimento, as falhas foram divididas de acordo com a região onde ocorrem.

1.2.1. Conexão de Topo

Perda do sistema de ancoragem das armaduras de tração. O colar tripartido utiliza uma cinta metálica responsável por prender os arames da armadura de tração no corpo do *riser*, que podem vir a falhar por tração, pressão, torção ou combinação das mesmas.

Outra falha que pode vir a ocorrer nas terminações de topo são rupturas da estrutura do conector causada por fadiga. Vazamentos através do sistema selante

também podem ser causados por fadiga devido aos carregamentos dinâmicos de tração, pressão e torção.

1.2.2. Armadura de Tração

Ruptura dos arames devido a tração, torção, curvatura ou combinação das mesmas. Falha que ocorre geralmente na região emersa onde o duto apresenta uma maior concentração de tensão e as aplicações dinâmicas no duto são mais solicitadas acelerando o processo de falha. A Figura 1.11 apresenta uma dissecação de um duto flexível onde é possível observar os arames da armadura de tração rompidos na região do conector.



Figura 1.11-Rompimento dos arames próximo ao conector em processo de fadiga [11].

Na conexão do duto flexível com o *manifold* no leito marinho é possível gerar tensões compressivas, conhecido como efeito negativo, quando a pressão externa no duto é muito maior que a pressão interna no *riser*, gerando assim, um defeito conhecido como “gaiola de passarinho”. Com a finalidade de evitar o aparecimento desse tipo de defeito, fitas de alta resistência são aplicadas no duto flexível durante a fabricação para manter as armaduras de tração organizadas e conferir boa resistência a compressão axial decorrente do efeito de fundo negativo [8]. Já foi observado que durante a instalação da linha, processo conhecido como *pull in*, ocorre compressão axial, porem ainda não houve registro de acontecimentos de defeitos de “gaiola de passarinho” durante esse processo.

Como consequência desse tipo de defeito, pode ocorrer uma perda de resistência à pressão interna do duto e também um destravamento da armadura de

pressão, ocasionando assim, uma possível explosão na camada de pressão, vazando o fluido interno da linha para o meio ambiente e levando o duto a parada de produção. As imagens representadas nas Figuras 1.12 e 1.13 demonstram os efeitos tipo “gaiola de passarinho” [8,12,13].



Figura 1.12-Defeito tipo “gaiola de passarinho” no meio da amostra[12].



Figura 1.13-Defeito na terminação do duto flexível[12].

1.2.3. Carcaça

O duto flexível está sujeito a colapso, que pode ocorrer por dois modos de defeito: na forma de ovalização ou “coração”, Figura 1.14 e 1.15. Ocorre em função da rigidez da carcaça contra a rigidez da armadura de pressão. Essas falhas ocorrem geralmente quando há presença de muitos grãos de areia no fluido interno de produção, podendo ocasionar erosão das paredes da carcaça, baixando a resistência à pressão externa [8,12].



Figura 1.14-Visão externa do defeito[12].



Figura 1.15-Vista interna[12].

Como a estrutura do *riser* é composta de materiais distintos, e como cada camada tem uma função característica na integridade do *riser*, o ponto para

monitorar a estrutura deve-se basear nos elementos e camadas críticas que compõem a integridade do duto flexível.

As linhas flexíveis no Brasil estão sujeitas a uma baixa pressurização interna, fazendo com que o principal fator que contribua para as falhas no equipamento sejam as grandes lâminas d'água que levam o *riser* a operar sob elevados níveis de tração.

Em vista disso, o monitoramento estrutural da armadura de tração tem ganhado destaque, por permitir ao operador acompanhar continuamente sua condição, detectando a ocorrência de falhas em tempo hábil para que uma medida corretiva seja tomada.

No presente trabalho, o estudo esteve focado na camada da armadura de tração, na zona que se delimita entre a superfície marinha e a conexão terminal de topo, onde estão presentes os maiores esforços dinâmicos do *riser*.

1.3. Outras Técnicas para Monitoramento de *Risers*

Visto a necessidade de identificar os primeiros indícios de danos no *risers* alguns centros de pesquisas desenvolveram técnicas de monitoramento e inspeção para acompanhar e analisar a integridade estrutural das linhas flexíveis. Nesta seção serão apresentados alguns projetos de pesquisa alinhados com o monitoramento e inspeção dos *risers*.

1.3.1. Monitoramento com Fibra Óptica

1.3.1.1. Sensores de Redes de *Bragg*

Os sensores de redes de *Bragg* são filtros ópticos reflexivos criados no núcleo da fibra, que retornam um comprimento de onda específico para cada sensor (comprimento de onda de *Bragg*), Figura 1.16 [14,33,35]. Este comprimento de onda sofre variações quando os sensores são submetidos a esforços mecânicos e/ou variações de temperatura. Estas variações são lineares, o que permite a larga utilização destes como sensores na medição direta destas grandezas. Por ter sua informação baseada em comprimento de onda, permite que

diversos sensores de comprimentos de onda distintos estejam alinhados em uma mesma fibra atuando de forma independente, podendo medir grandezas diferentes, além de tornar estas medidas imunes a pequenas variações de amplitude devidas, por exemplo, a atenuações na fibra causadas por curvaturas ou seu comprimento total.

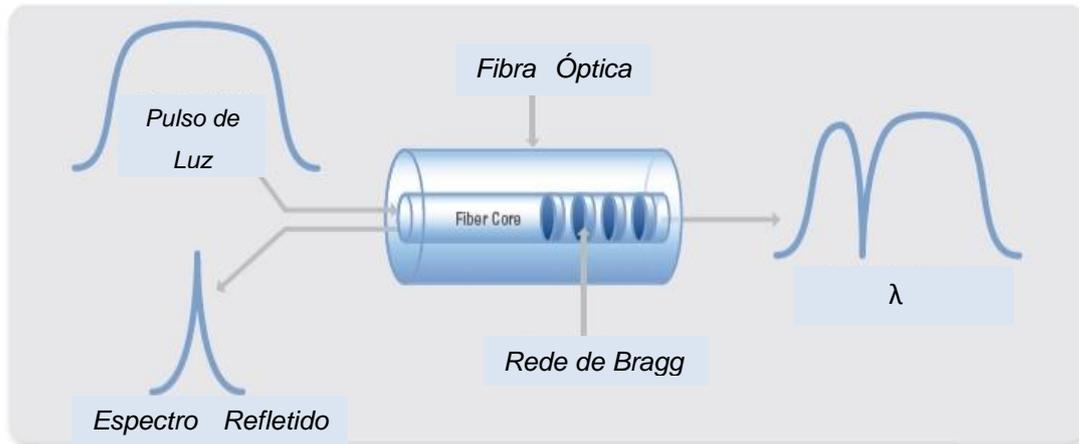


Figura 1.16- Princípio de funcionamento das redes de *Bragg*.

1.3.1.1.1. MODA

O Sistema MODA foi desenvolvido pelo Laboratório de Sensores a Fibra Óptica em parceria com o Centro de Pesquisas da Petrobras, para fornecer em tempo real e de forma contínua medidas de deformação dos arames da armadura externa de *risers* flexíveis. Com o *riser* em operação, todos os arames são instrumentados com sensores de deformação à fibra óptica.

Para a instalação do Sistema MODA deve-se abrir uma janela na capa do *riser*, obtendo-se acesso a todos os arames e permitindo a instalação dos sensores ópticos. A janela de instrumentação é fechada utilizando-se fitas adesivas apropriadas para a proteção dos sensores e dos arames da armadura do duto flexível, garantindo proteção contra corrosão.

O MODA emprega extensometria óptica baseada em sensores de redes de *Bragg* dispostos em uma mesma fibra óptica, medindo continuamente as tensões/deformações atuantes em cada arame. De posse do conjunto de medidas de deformação individual de todos os arames, é possível se obter mapas

contínuos no tempo com estas informações, e então, fazer inferências ou detectar comportamentos que representem anomalias, Figura 1.17.

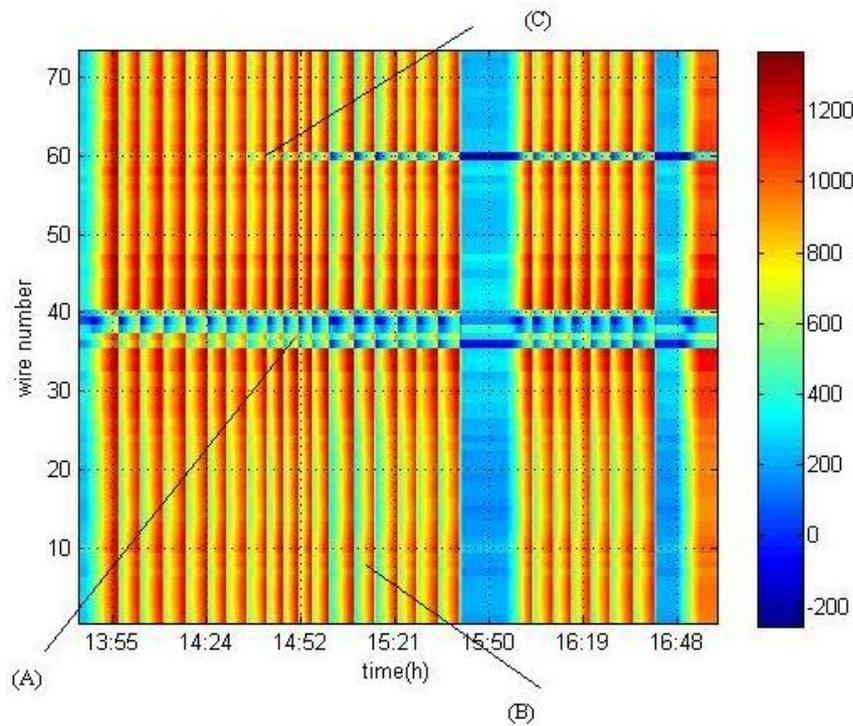


Figura 1.17- Visualização gráfica do Sistema MODA [14,35].

(a) Arame rompido (B) Arame íntegro (C) Momento da ruptura

1.3.1.1.2. Colar Óptico e Colar óptico 3D

O colar óptico e o colar óptico 3D foram desenvolvidos pelo Laboratório de Sensores a Fibra Óptica em parceria com o Centro de Pesquisas da Petrobras, para monitorar de forma indireta o rompimento de arames das armaduras de tração de *risers* flexíveis. O sistema mede continuamente as deformações na capa externa do *riser* [3].

Ao ocorrer o rompimento de um ou mais arames, deformações circunferenciais, longitudinais e torsionais são transmitidas para a capa do *riser*, que passa a exibir deformações dinâmicas com uma assinatura diferente da inicial. A alta sensibilidade dos sensores de deformação a fibra óptica permite a captura instantânea destas alterações e a emissão de alarmes informando o operador da ocorrência do dano.

O colar óptico é responsável por medições circunferências no duto flexível. O sistema apresenta Redes de *Bragg* instrumentados sobre uma lâmina metálica, que por sua vez abraça todo diâmetro do *riser* Figura 1.18. O colar é fabricado com a mesma ordem de grandeza do perímetro do *riser* a ser instrumentado e com a ajuda de um parafuso sem-fim é fixado ao duto Figura 1.19. O colar em testes de escala real mostrou-se capaz de medir variações na ordem de 0,002% no diâmetro da capa [3].



Figura 1.18-Diferentes comprimentos de colar óptico [3].

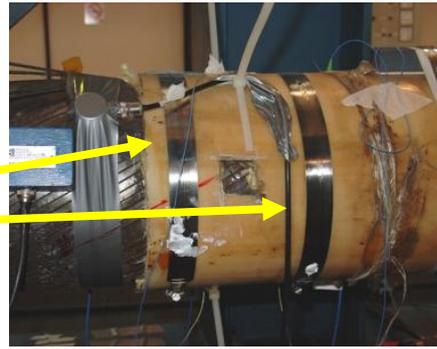


Figura 1.19-Colar óptico instalado em testes de laboratório

Como o colar óptico se limita a inferir variações apenas no diâmetro do *riser*, foi desenvolvido o colar óptico 3D, com a finalidade de acrescentar valores de medidas de torção e deformação axial ao sistema de medição óptico. O posicionamento dos sensores de *Bragg*, em forma de roseta extensiométrica, Figura 1.20, colados diretamente na capa do duto (Figura 1.21) são capazes de medir deformações axiais, torcionais. O sensor representado pelo número 2 identifica deformações axiais na amostra, e as variações angulares são inferidas pelas redes 1 e 3, essas dispostas a 45° e 235° graus, como apresentado no esquemático da Figura 1.20. O colar óptico, mencionado acima, é representado pelo número 4.

O sistema colar óptico 3D é a combinação de uma roseta extensiométrica óptica com uma abraçadeira instrumentada com sensores ópticos (colar óptico), cobrindo as principais deformações presentes na capa polimérica externa.

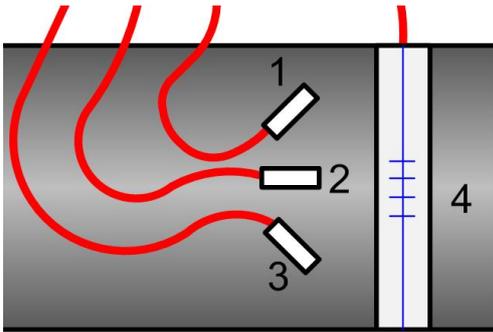


Figura 1.20- Representação esquemática do colar óptico.

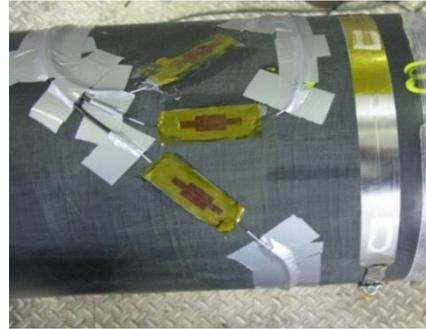


Figura 1.21- Colar óptico 3D instalado em campo.

1.3.2. Televisionamento

O sistema de monitoramento baseado em televisionamento foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção da PUC-Rio (CPTI) em parceria com o Centro de Pesquisas da Petrobras para controle de torção de *risers*.

O controle de torção já é parte da rotina de inspeção de dutos flexíveis através de avaliação visual. Entretanto, as incertezas associadas a este tipo de inspeção reduzem sua confiabilidade tanto na detecção inicial do problema, quanto no acompanhamento da sua evolução. Neste contexto, o Sistema de televisionamento busca eliminar a subjetividade do inspetor através de um método automatizado de inspeção visual.

Tem como objetivo fornecer em tempo real e de forma contínua medidas de torção de *risers* flexíveis. Baseado nas recomendações da API 17B que associam torções permanentes nos flexíveis a problemas estruturais, comumente relacionados a falhas nos arames das armaduras de tração. O equipamento utiliza um processamento de imagem para inferir medidas de torção identificando e digitalizando um alvo fixo solidário ao corpo do *riser*.

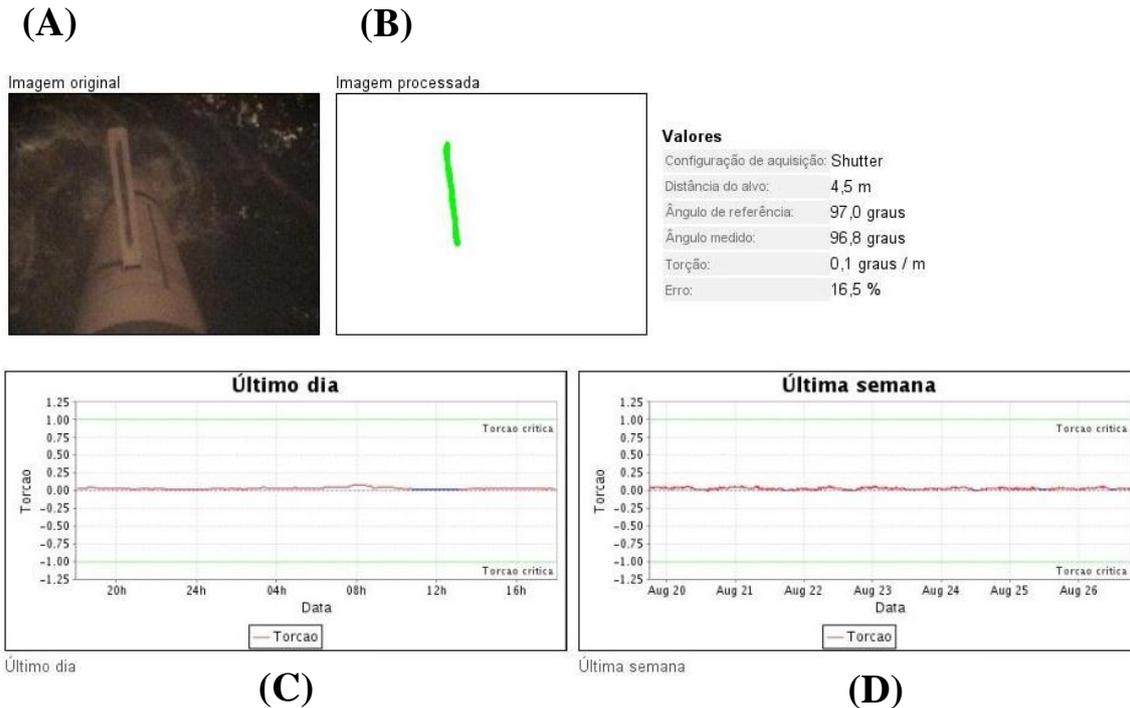


Figura 1.22-Interface do software de monitoramento por televisionamento.

(A) Alvo fixo no *riser*

(B) Imagem do *riser* digitalizada e de onde é extraído o ângulo de torção

(C) e (D) Gráficos de torção *versus* tempo

1.3.3.

Monitoramento por Emissão Acústica

Trata-se de um sistema de detecção já tradicional e que foi adaptado pelo Centro de Pesquisas da Petrobras, visando à identificação dos ruídos provocados pelo rompimento dos arames da armadura de tração. O método consiste em utilizar sensores capazes de converter a energia liberada na forma de onda elástica acústica, que ocorre no momento da ruptura, em sinais elétricos, e com esses sinais elétricos identificar e caracterizar o evento de ruptura do arame. [15].

A técnica ainda se encontra em desenvolvimento, porém resultados preliminares apontaram bons resultados laboratoriais [15]. Durante a ruptura do arame é possível identificar um ruído com alta amplitude de sinal e assim concluir que a onda sonora se propaga pelo arame. Para a utilização em campo, ruídos que sejam semelhantes ao sinal de ruptura, inerentes em uma plataforma, estão sendo estudados para a elaboração de filtros para detecção apenas dos sinais de ruptura. A ocorrência de falsos alarmes é a principal desvantagem desta técnica.

1.3.4. **SubC-mat - Monitoramento por vibração**

Este equipamento, denominado *SubC-mat*, foi desenvolvido por uma empresa francesa do ramo de petróleo e tem como objetivo monitorar a vibração induzida no momento da ruptura dos arames da armadura de tração do *riser*, com o objetivo de prevenir acidentes e eventuais falhas nos dutos. Este protótipo apresenta conceitos parecidos com os que serão apresentados mais a frente neste trabalho. O produto ainda encontra-se em fase de teste, mas existem alguns artigos publicados que descrevem o funcionamento do mesmo [16].

O *SubC-mat* utiliza sensores de rede *Bragg* gravados em uma fibra óptica ao longo do duto a ser monitorado. O sistema é instalado ao longo de todo o duto, desde a conexão no leito marinho até terminação na plataforma, cobrindo todo o equipamento.

O sistema é designado para caracterizar e discriminar a energia proveniente apenas do sinal de ruptura dos arames em meios a ambientes ruidosos através da variação do comprimento de onda dos sensores. Geralmente, a fibra óptica instalada é protegida por um revestimento metálico e inserida diretamente na armadura de tração durante a fabricação da linha flexível, ou pode ser instalado na capa polimérica como apresentado na Figura 1.23.

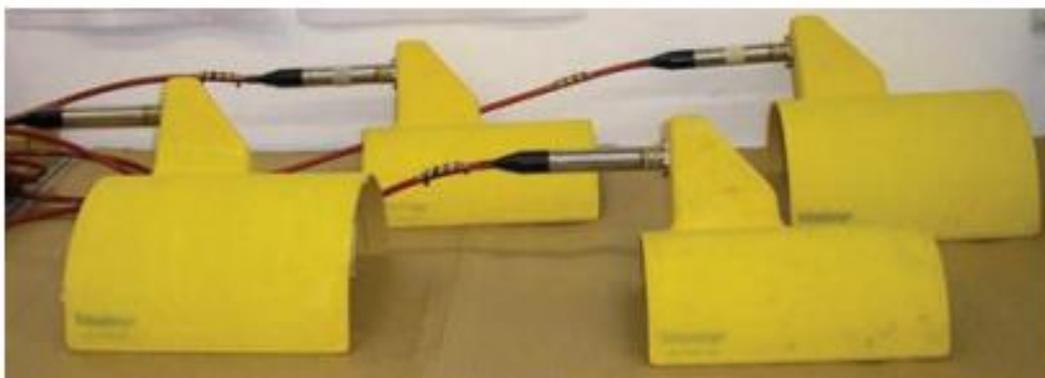


Figura 1.23-Protótipo do sistema monitoramento baseado em vibrações [16].

1.4. Objetivo do Trabalho

O presente trabalho está relacionado com o projeto MONFLEX, que foi desenvolvido por universidades e laboratórios nacionais e internacionais. O projeto visa o desenvolvimento de novas tecnologias para a inspeção, monitoramento e análise da integridade estrutural de um *riser*, bem como o aprimoramento de técnicas já existentes. A idealização do projeto Monflex surgiu a partir da necessidade da engenharia submarina prever falhas em dutos flexíveis em plataforma, que podem ocorrer de forma repentina e catastrófica. Com isso, inúmeros testes em escala real foram realizados e diversas grandezas físicas foram monitoradas e medidas para cercar e conhecer bem os fenômenos que ocorrem em um duto flexível ao longo de sua vida útil.

Este trabalho tem como finalidade estudar e identificar a assinatura de um sinal de ruptura das camadas de tração de *riser* flexíveis, sinal este captado por acelerômetros. O trabalho visa o desenvolvimento de um sistema, que através de acelerômetros, seja capaz de monitorar a estrutura de forma contínua por longos períodos de tempo e registrar o momento em que algum sinal de ruptura de arame seja gerado no *riser*.

O uso de acelerômetro se mostrou atraente uma vez que se pode contar com toda a bagagem tecnológica, seja de equipamentos ou dos conhecimentos de técnicas de monitoração baseadas em vibrações mecânicas.

Tradicionalmente utilizada para monitorar máquinas e equipamentos, estes equipamentos e sensores de vibração, tem forte potencial para identificar o momento da ruptura dos arames das camadas de tração. Adicionalmente, as técnicas de filtragem dos sinais, permitem a separação dos sinais de interesse daqueles provenientes de outras fontes de ruídos.

2 Sistema de Monitoração por Vibrações

Neste capítulo serão descritos os 2 sistemas de aquisição desenvolvidos para monitorar dutos flexíveis através da análise de vibrações. Foram desenvolvidos dois sistemas de monitoramento para aquisição dos dados. Sendo o primeiro protótipo para atender as necessidades identificadas durante o primeiro teste. Já o segundo equipamento foi desenvolvido, com características semelhantes ao primeiro, porém com modificações para facilitar o trabalho em campo. O tamanho físico e robustez do equipamento foram as principais melhorias nesse segundo projeto.

O ponto inicial para estudar o sinal foi avaliar qual sensor de vibração seria o mais adequado para ser usado durante os testes. A seguir serão apresentados os principais tipos de acelerômetros disponíveis no mercado e como se comportam fisicamente.

2.1. Tipos de Acelerômetros

O sinal de vibração é medido por sensores do tipo acelerômetros, que são capazes de quantificar níveis de vibração mecânica através de diferentes fenômenos físicos. A grande maioria dos acelerômetros segue o modelo básico de sistema massa mola, onde uma massa suspensa por molas recebe o esforço mecânico e a força aplicada na massa é transferida e equilibrada pela mola. Então como o deslocamento permitido pela mola é diretamente proporcional à aplicação da força, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa. A maioria dos acelerômetros converte a aceleração da gravidade, ou do movimento aplicado, em sinais elétricos. Comumente são encontrados acelerômetros capazes de medir em até três direções de orientação.

Os sensores são identificados e selecionados para cada tipo de aplicação de acordo com o nível de sensibilidade e a faixa de frequência que se pretende medir. A sensibilidade indica a razão entre o sinal de saída obtido, normalmente expresso em volts, e a aceleração, normalmente expressa em relação a aceleração da gravidade na superfície da terra unidades de “g” ($1g = 9,81\text{m/s}^2$ ao nível do mar e latitude 45°). A faixa de frequência indica em que intervalo de frequências a resposta do acelerômetro é considerada linear.

Dos acelerômetros mencionados cada tipo apresenta características específicas de funcionamento e desempenho que o tornam mais adequado a determinadas aplicações. Neste trabalho, devido à natureza dos sinais medidos, os eventos de rupturas de arames, foram adotados acelerômetros do tipo piezoelétricos mencionado no item 2.1.3.

Dentre os diversos tipos de acelerômetros, podem ser destacados:

2.1.1.

Acelerômetro Eletro-mecânico

São transdutores compostos por um gás selado que funciona como um amortecedor, uma massa e mola. Comumente chamados de MEMS (*micro eletro mechanical systems*) são sensores muito pequenos e de baixo custo. Atualmente muito utilizados pela indústria de equipamentos eletrônicos portáteis, o sensor ganhou muito espaço no mercado devido à produção em larga escala pela indústria automobilística, exercendo a função de controle de estabilidade e no auxílio na orientação de sistemas de posicionamento GPS.

2.1.2.

Acelerômetro Capacitivo

São sensores baseados no princípio de funcionamento dos capacitores elétricos. Formado por duas placas paralelas, sendo uma fixa, o outro móvel e uma massa. O sistema funciona com a aceleração da massa provocando variações entre a placa fixa e a móvel alterando a capacitância do sensor. Ou seja, a força de aceleração altera a capacitância do sistema de forma proporcional a aceleração gerada. Utilizado na construção civil e em automóveis, esse tipo de sensor faz medições de baixa frequência.

2.1.3. Acelerômetro Piezelétrico

Constituído, basicamente, de cristais piezelétricos e uma massa, o sistema transforma em voltagem a força aplicada na massa inercial em contato com o material piezelétrico. Esse material piezelétrico tem a propriedade de transformar esforços mecânicos como compressão ou tração em um sinal elétrico. O sensor não precisa de alimentação externa, podendo ser conectado diretamente no sistema de aquisição. Esse tipo de sensor é um dos mais utilizados na indústria de um modo geral devido ao seu bom desempenho, custo relativamente baixo e grande versatilidade.

2.1.4. Acelerômetro Piezoresistivos

Sensor muito semelhante ao acelerômetro piezoelétrico, porém o cristal piezolétrico é substituído por um piezoresistivo, em que a força exercida faz variar a resistência do cristal. Essa variação é detectada por uma ponte de Wheatstone. Tem a vantagem de medir acelerações bem próximas de zero Hertz.

2.2. Técnica Indireta de Monitoramento

O monitoramento baseado na análise da vibração decorrente da ruptura dos arames da armadura de tração é considerado uma técnica indireta de monitoramento, uma vez que infere a integridade dos arames sem que haja uma medida direta do seu estado. A fixação dos sensores é realizada sobre a capa do *riser*, de forma externa e não invasiva. A aquisição do sinal de ruptura de um arame depende da transferência de energia através das camadas do duto no momento da falha. Testes em escala real indicam que é perfeitamente possível detectar as perturbações mecânicas geradas pela ruptura dos arames desta forma, e que a energia gerada se propaga ao longo do duto por vários metros, fazendo com que o monitoramento indireto seja um método confiável de monitoramento.

2.3. Sistema de Aquisição

O ponto de partida para desenvolver um sistema dedicado para analisar o sinal de ruptura dos arames foi a falta de um equipamento comercial com as

características necessárias para identificação e armazenamento dos sinais de acordo com o propósito da medição.

Nos primeiros testes foram utilizados equipamentos de bancada/laboratório onde os dados do ensaio eram armazenados de forma contínua, gerando uma quantidade de dados muito grande.

Com os primeiros resultados já animadores, viu-se a necessidade da criação de um sistema personalizado, com um específico método de aquisição, a fim de atender os testes futuros e o possível trabalho em campo.

A seguir, serão descritos os dois sistemas de monitoramento desenvolvidos para registrar os sinais dos testes em escala real.

2.3.1. Primeiro Protótipo

Motivado pelos bons resultados obtidos com o sistema de aquisição de bancada utilizado no teste em escala real realizado no Laboratório de Tecnologia submarina (LTS) dentro das instalações da COPPE/UFRJ foi possível, pela primeira vez, verificar que o rompimento de arames de um *riser* flexível produz vibrações que se propagam por toda sua estrutura, incluindo a capa polimérica, e, na inexistência de boas alternativas comerciais com as características requeridas de um equipamento de aquisição de dados, foi desenvolvido, pelo Centro de Pesquisas em Tecnologia de Inspeção (CPTI - PUC-Rio) o primeiro protótipo com características específicas para um sistema de aquisição de eventos de ruptura.

Em agosto de 2009 foi finalizada a montagem do primeiro protótipo do sistema de detecção de ruptura de arames especialmente desenvolvido para monitorar *risers* flexíveis através de vibrações. O equipamento possui 4 canais que operam em uma taxa programável de até 32 kHz.

Durante a pesquisa de componentes para a fabricação do protótipo, foram especificados componentes comerciais, com o objetivo de viabilizar a montagem de novas unidades e reposição das peças, conforme descrito na Tabela 2.1.

Tabela 2.1-Equipamentos presentes no desenvolvimento do primeiro protótipo.

CPU com rede formato PC104.
Fonte 110V
Condicionador de sinal com 4 canais.
Fonte 110V para o condicionador de sinais.
Nobreak
4 Acelerômetros (intrinsecamente seguros).
4 Barreiras Zenner.
Consumo total: 17W
Autonomia de 1 hora sem alimentação externa (registrando sinal de 4 transdutores).

Um equipamento para ser utilizado em campo que fosse capaz de registrar sinais apenas quando um valor mínimo de aceleração fosse atingido e com uma eletrônica capaz de registrar e processar o sinal diretamente foram os principais argumentos para iniciar o desenvolvimento desse sistema.

O equipamento monitora continuamente até 04 canais de acelerômetros, cada qual configurável de forma independente, possibilitando o estabelecimento do nível de sinal necessário para o disparo e registro de eventos, taxa de aquisição e janela temporal de evento.

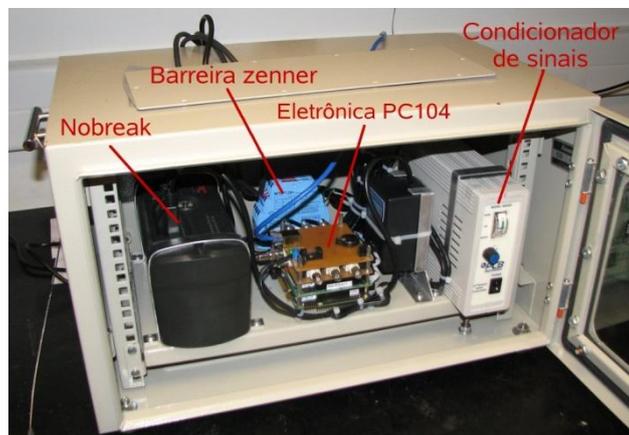


Figura 2.1-Primeiro protótipo de aquisição de sinais.

A Figura 2.1 mostra a montagem final do equipamento e destaca seus principais componentes. A barreira *Zenner* instalada dentro do conjunto é necessária para atender as normas de segurança para dispositivos intrinsecamente seguros. Embora somente o acelerômetro seja certificado como tal e, portanto, passível à instalação em área classificada, a sua alimentação deve obrigatoriamente passar por uma barreira *Zenner* para evitar surtos de tensão.

A eletrônica PC104 em conjunto com a placa de AD de 500 kHz multiplexa a aquisição dos 4 canais. Já o condicionador utilizado amplifica o sinal para que ganhe tensões adequadas, atingindo boas condições de sinal/ruído.

A interface permite a configuração da taxa de amostragem dos 4 acelerômetros, respeitando o limite de até 32 kHz por canal. Possui um *pré-trigger* ajustável que possibilita o registro de dados anteriores ao instante de ocorrência do evento. O tamanho dos registros também pode ser configurado, podendo atingir um máximo de 10000 amostras.

O nível do *trigger* é um parâmetro importante a ser configurado, pois determina a partir de qual intensidade os eventos serão registrados. Quando o valor do *trigger* é atingido por pelo menos 1 sensor, os sinais de todos os 4 canais são registrados. Apesar de o valor ser configurado em bits no programa, é usual converter para a unidade de aceleração em “g”. Para isso basta relacionar a sensibilidade do sensor (mV/g), o limite de operação do sensor (V) e o limite de operação do equipamento.

A Figura 2.2 apresenta um gráfico de evento detectado na interface gráfica do equipamento. Cada acelerômetro tem o seu sinal traçado com uma cor diferente, sendo a escala vertical automática em bits e na horizontal a taxa de amostragem. Este recurso é extremamente útil por permitir uma visualização rápida dos eventos, sem exigir que o usuário tenha que fazer a transferência dos dados para abrir em um programa de análise.

O primeiro protótipo obteve ótimos resultados tanto no *hardware* quanto no *software* ao longo de dois anos de testes, sendo o sistema responsável por registrar todos os dados utilizados nessa dissertação.

Gráfico do evento

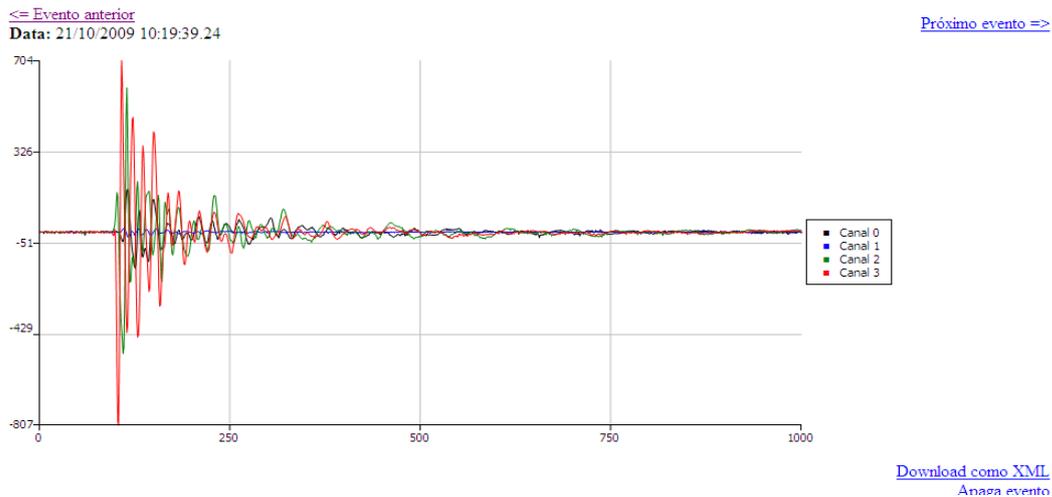


Figura 2.2-Registro de um evento simulado.

2.3.2. Segundo Protótipo

O desenvolvimento do segundo protótipo de monitoramento de vibrações foi fortemente baseado no primeiro sistema, mas visando aprimorar algumas de suas características. A 2ª versão do sistema tem como principais características ser um sistema mais compacto, robusto, de fácil transporte e operação, além de um menor custo final de produção. A Figura 2.3 apresenta o 2º protótipo pronto para operação em campo.



Figura 2.3-Segundo protótipo de sinais de vibração para monitoração de *risers* flexíveis

Os ambientes com áreas classificadas também foram considerados neste 2º protótipo. Os acelerômetros e seus cabos foram especificados com grau de proteção adequado a atmosferas explosivas (EEx ia IIC T4) comuns nos

ambientes de exploração e produção de óleo e gás. Barreiras de potencial (barreira Zenner) também foram adotadas. Adicionalmente, a fim de aumentar a robustez do sistema, todos os conectores elétricos e de interface externas foram especificados para atender aos padrões de proteção IP-67 (proteção contra poeira e imersão em líquidos até 1m de profundidade). Todo o sistema fica embarcado em uma caixa/maleta própria para ambientes classificados.

Neste novo sistema os dados podem ser armazenados localmente em um disco rígido ou ainda em um cartão do tipo SD. Além disso, este sistema já dispõe de envio automático de notificações via mensagem eletrônica, toda vez que um evento for detectado, para os usuários cadastrados.

Pelo fato do computador já estar diretamente acoplado ao o sistema de condicionador, digitalizador e *software*, esse segundo protótipo facilita as operações e medidas de campo.

3 TESTES E RESULTADOS

Testes de laboratório em escala real foram utilizados para investigar e desenvolver o método. Um total de 4 testes são aqui apresentados, cada um com uma particularidade quanto ao tipo da amostra ou quanto ao método de ensaio e monitoração. Algumas modificações foram aplicadas ao monitoramento ao longo destes ensaios, devido aos resultados obtidos e a necessidade de se adequar às modificações no sinal de ruptura em diferentes métodos de ruptura de arames nos testes.

O objetivo dos testes foi simular em laboratório situações reais de campo de modo a verificar a robustez e confiabilidade do método de monitoramento da integridade de *risers* por vibrações. O estudo desenvolvido nesse trabalho teve como finalidade verificar a amplitude do sinal de ruptura dos arames, caracterizar o tipo de sinal e comparar transientes de falhas com eventos inerentes às acomodações e ruídos dos arames íntegros.

3.1. Testes

Como forma de facilitar a análise dos testes, duas metodologias de ensaios realizadas devem ser diferenciadas. Na primeira forma de ensaio, o duto é tracionado até a ruptura de um dos arames da armadura já previamente danificado. Neste caso, os arames são expostos e estimulados com defeitos, através de entalhes ou pontos de solda para facilitar a ruptura. Com isso, o sistema de aplicação de carga é acionado, tracionando a amostra até que ocorra falha nos arames, eventualmente, com a aplicação de alguns poucos ciclos de carregamento. Já a segunda metodologia, consiste em teste de fadiga na qual, carregamentos cíclicos especificados pelo fabricante eram aplicados até a falha do duto. Adicionalmente, estes testes de fadiga contavam com outras características tais

como elevada pressão interna e soluções corrosivas presentes no espaço anular do duto flexível (entre camadas), para avaliação de processos corrosivos e a eficiência de agentes anticorrosivos. Esse segundo método de teste foi denominado teste de corrosão-fadiga.

Foram realizados quatro testes, sendo dois de ruptura induzida e dois de corrosão-fadiga. O primeiro teste de ruptura induzida foi realizado no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) da COPPE/UFRJ. Os três testes seguintes foram executados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, sendo que desses três, o primeiro foi de ruptura induzida e outros dois de corrosão-fadiga. Os resultados dos testes do LAMEF que serão apresentados foram gerados com o mesmo sistema de aquisição, o primeiro protótipo de aquisição apresentado no capítulo 2, o que facilita a análise e comparação dos dados entre os testes.

Nessa seção os testes experimentais serão apresentados de forma cronológica durante os três anos de desenvolvimento. Para cada ensaio foram analisadas a amplitude dos sinais gerados e a resposta no domínio do tempo e da frequência.

3.2. Primeiro Teste / COPPE-LTS

O teste realizado em maio de 2007 no LTS da COPPE/UFRJ, foi o primeiro ensaio em escala real no qual o sistema de vibração proposto foi instalado. Todo o ensaio foi realizado por engenheiros do CENPES e os resultados foram utilizados como bibliografia para a execução dessa dissertação. O objetivo era o de analisar o comportamento da amostra durante a ruptura dos arames da armadura de tração do duto flexível. Porém pouco se sabia sobre a forma de propagação e magnitude das vibrações causadas por esse rompimento, o que dificultou a escolha correta do acelerômetro e a forma de instrumentação nesse primeiro teste.

A amostra de duto flexível no quadro horizontal de teste apresentava 6 metros de comprimento, um diâmetro interno de 6 polegadas e duas armaduras de tração. A seção dos arames das armaduras de tração possuíam 8 mm de largura por 3 mm de espessura. A amostra foi tracionada até 100 toneladas, por limitações

da célula de carga presente no quadro de tração. A Figura 3.1 apresenta as dependências do LTS pronto para o início do teste.



Figura 3.1-Quadro de tração no LTS. Amostra preparada para o primeiro ensaio.

A amostra era um duto retirado de campo e por conta disso apresentava sinais de corrosão nos arames das armaduras de tração, provavelmente pelo ingresso de água na região do seu anular. Para acesso aos arames foi retirado uma seção da capa polimérica do duto próximo ao conector original da linha (o outro conector era um conector de testes). Através desse acesso, os defeitos eram inseridos nos arames a fim de facilitar sua ruptura. Esse método se mostrou bastante simples e eficiente ao longo do teste, pois possibilitava escolher qual arame que seria rompido. Essa metodologia caracterizou o teste como um ensaio de ruptura induzida, já que os arames eram escolhidos e danificados para que acontecesse a ruptura. A Figura 3.2 mostra o modo em que os entalhes eram realizados. Os entalhes representavam uma retirada de até 70% área transversal do arame da armadura, variando de acordo com a quantidade de arames remanescentes e o carregamento aplicado.



Figura 3.2-Confecção de entalhe, via corte com disco de corte, em um dos arames da armadura de tração

3.2.1. Instrumentação

Um ponto importante na instrumentação dos dutos era a localização onde os acelerômetros seriam acoplados sobre sua capa. Como os arames formam uma helicóide ao longo da amostra, essa distribuição poderia alterar a forma de propagação do sinal. Então, para identificar a propagação, acelerômetros foram instalados no sentido radial e longitudinal, para assim identificar e mapear as amplitudes geradas na amostra durante o evento de ruptura. Até dado momento não se conhecia como a disposição em helicóide dos arames poderiam afetar a propagação do sinal.

Foram selecionados os seguintes pontos de medição para o monitoramento da vibração da amostra durante o teste: dois sensores próximos ao conector de aplicação do carregamento da amostra, dois na extremidade travada e quatro sensores no meio da amostra, totalizando oito sensores para monitoramento. As Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 mostram os sensores instalados na capa polimérica da amostra e no conector. O desenho esquemático da Figura 3.6 representa o sistema completo de instrumentação.

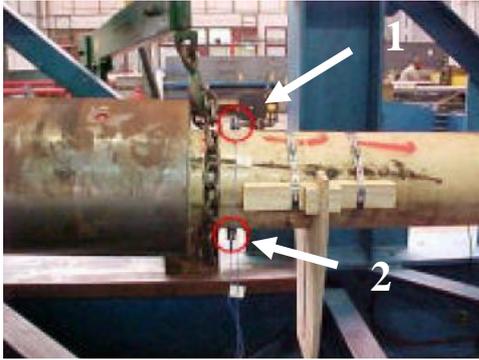


Figura 3.3-Sensores 1 e 2 instalados junto ao conector travado.

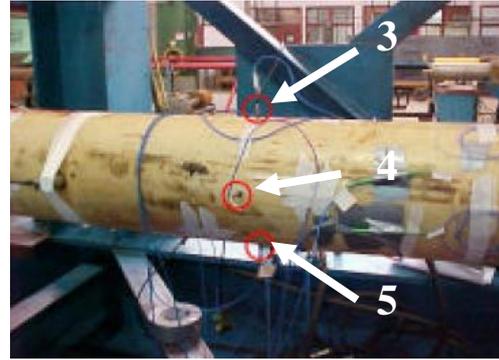


Figura 3.4-Sensores 3,4,5 e 6 na seção cilíndrica do *riser*.

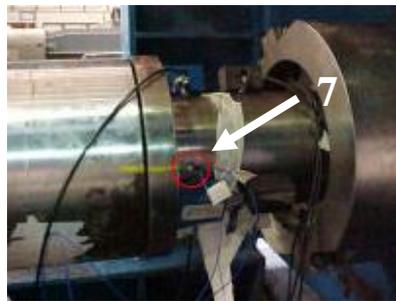


Figura 3.5-Sensores 7 e 8 instalados junto ao conector de carregamento.

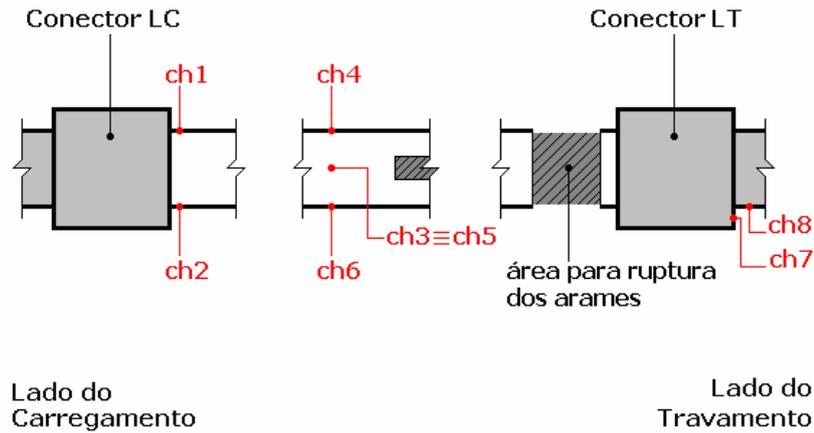


Figura 3.6- Ilustração do sistema de instrumentação dos acelerômetros

3.2.2. Resultados

O teste teve duração de 3 dias e ao final 9 arames foram rompidos. Esse primeiro ensaio teve um papel fundamental para o prosseguimento do estudo, pois foi o passo inicial para entendimento da propagação da onda ao longo do *riser* e analisar o efeito que uma ruptura de arame provoca nos acelerômetros.

Até o primeiro teste ser realizado ainda havia dúvidas e questionamentos sobre que metodologia de investigação seria mais adequada empregando a monitoração por vibrações, se por avaliação nas alterações da resposta em frequência da estrutura ou por detecção de eventos.

A avaliação nas alterações da resposta em frequência da estrutura causadas pela ruptura dos arames mostrou-se incapaz de denotar que alguma alteração estrutural houvesse ocorrido. Ou seja, a ruptura dos arames das armaduras não modificou a resposta em frequência da amostra, impossibilitando acusar um sinal de ruptura por esse método de análise. Por se tratar de uma estrutura complexa constituída por diversas camadas de materiais bastante diferentes, ficou claro, desde as primeiras rupturas, que mesmo em condições controladas de laboratório esse tipo de avaliação da resposta em frequência da estrutura não seria possível.

Por outro lado, a detecção de eventos durante o momento da ruptura do arame mostrou-se bastante eficaz uma vez que foi possível verificar que a energia liberada durante a falha da armadura é suficiente para que sua detecção seja

realizada com sucesso. Além disso, foi verificado que o sinal transiente associado com a ruptura de um arame é capaz de se propagar através da capa externa do *riser* flexível e ser detectado pelos acelerômetros distribuídos ao longo do *riser*.

Nesse teste foram utilizados taxas de aquisição de 20 kHz em equipamentos comerciais que fazem gravações contínuas dos sinais de vibração. Porém, foi observado, com a análise dos sinais típicos de ruptura dos arames que estes podem ser bem representados com taxas de aquisição mais baixa, na ordem de 10 kHz. A Figura 3.7 demonstra a assinatura de um sinal típico de ruptura durante o teste do LTS.

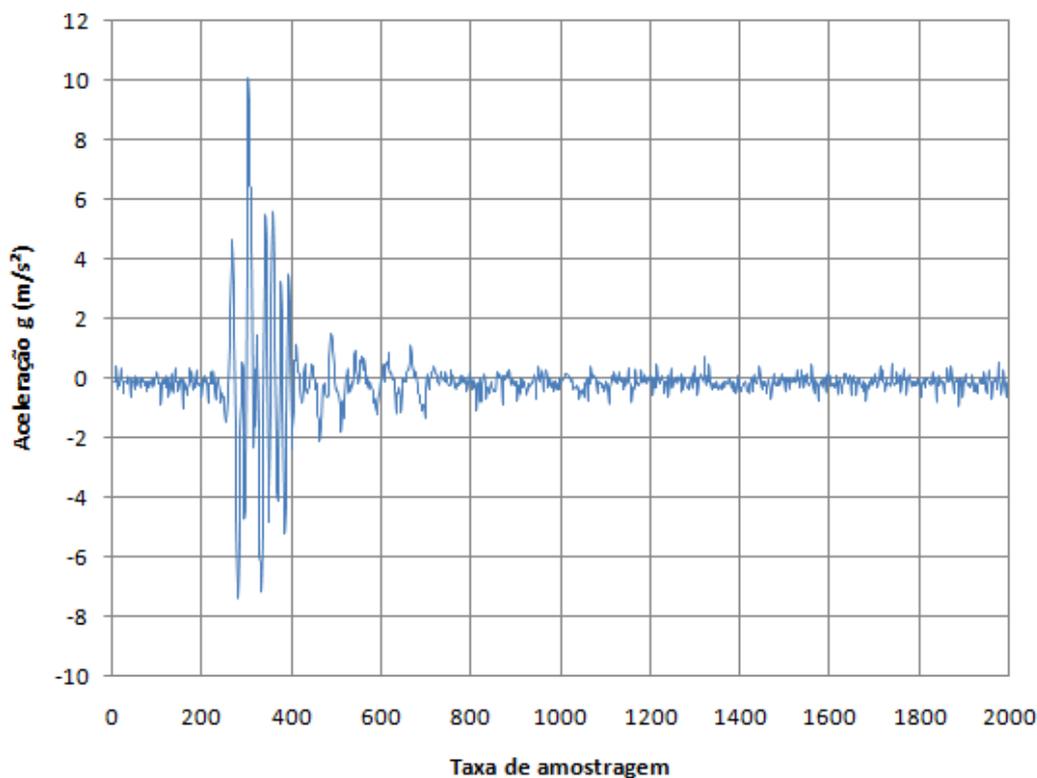


Figura 3.7- Sinal típico de ruptura detectado durante o teste.

A partir da análise da tabela 3.1, verifica-se que os principais sinais de ruptura, com maiores amplitudes, estão associados aos sensores 1 ao 6, que estão diretamente instrumentados na capa do *riser*, Figura 3.6. Os sensores 7 e 8 não apresentaram bons resultados em amplitude durante as rupturas, eliminando assim, a posição instalada no conector como um adequado local para a instrumentação.

Tabela 3.1-Eventos de ruptura em ordem cronológica.

Rompimento	Carga aplicada	Aceleração g (m/s ²)							
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
1 ^o	90	13	13	8	9	10	8	1	1
2 ^o	20	7	9	5	4	7	6	1	1
3 ^o	80	9	11	10	10	10	9	2	2
4 ^o	63	6	8	6	6	6	5	1	1
5 ^o	99	12	12	14	14	12	13	2	2
6 ^o	93	12	12	9	9	9	9	1	2
7 ^o	93	12	12	14	14	13	13	1	2
8 ^o	92	12	14	15	15	14	14	1	2
9 ^o	67	13	16	18	14	14	13	1	2
média	77,4	11	12	11	11	10	10	1	2

Dos resultados foram tiradas algumas conclusões quanto à posição radial e longitudinal dos sensores. Foi verificado que a perturbação causada pela ruptura dos arames se propaga ao longo da amostra ainda que afetada pelo amortecimento da estrutura, especialmente causado pela capa externa de material visco-elástico (nylon ou polietileno). Sensores posicionados radialmente apresentaram magnitudes de vibração semelhantes para um mesmo evento de ruptura, demonstrando que o sinal se propaga de modo uniforme para uma dada seção do duto através de sua capa externa apesar do fato dos arames estarem dispostos em um arranjo helicoidal. Em resumo, um acelerômetro instrumentado na capa irá identificar a falha do arame independente da posição circunferencial de ruptura, eliminando assim a necessidade de instalar radialmente diversos sensores nos testes seguintes, o que permitiu utilizar uma distribuição linear dos acelerômetros ao longo da amostra.

O gráfico da Figura 3.8 ilustra a afirmação acima através dos dados dos quatro sensores instalados radialmente a três metros do lado travado da amostra. O diagrama mostra, para os canais 3, 4, 5 e 6, a distribuição em relação à média dos níveis de vibração para cada ruptura em uma seção transversal da amostra. Importante mencionar que as rupturas privilegiaram uma região onde o acesso manual para danificar os arames era mais fácil, podendo assim gerar o resultado do gráfico da figura 3.8.

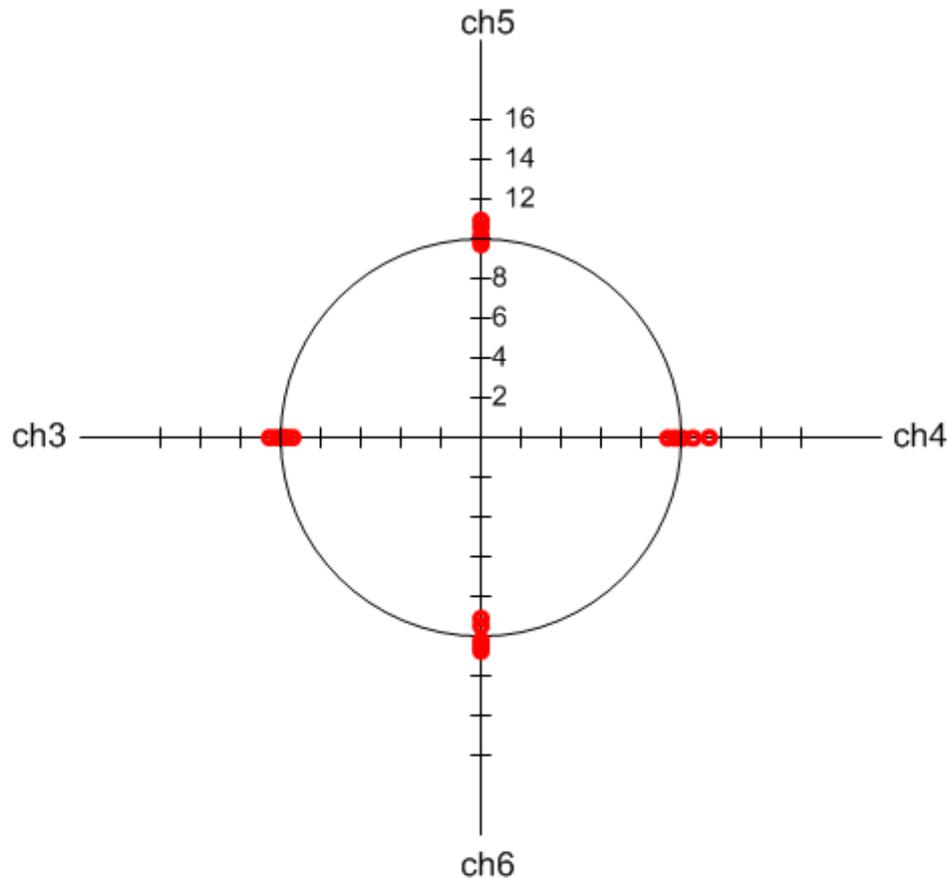


Figura 3.8-Distribuição radial dos níveis de vibração em $g(m/s^2)$ numa seção transversal da amostra, para 5 rupturas de arame.

É possível verificar que a resposta vibratória independe da posição circunferencial dos acelerômetros e sua posição relativa ao ponto dos arames. O gráfico corresponde às cinco primeiras rupturas durante o teste. As amplitudes de vibração em torno de 10g, com pequenas diferenças que variam em torno de um 1g confirmam que a propagação da ruptura é transmitida por todo perímetro da capa polimérica.

Os resultados apresentados foram utilizados como base na criação do primeiro protótipo descrito no capítulo dois, assim como a escolha do acelerômetro que melhor representa o tipo de sinal.

As amplitudes dos sinais gerados nesse teste indicam que um sensor com características para registro de até 50g de vibração e com uma alta sensibilidade, seriam parâmetros suficientes para identificar o espectro de interesse dos sinais de

vibração provenientes da ruptura dos arames da armadura de tração. Com isso foi escolhido o sensor comercial com as características abaixo.

- Sensibilidade 100 mV/g
- Faixa de operação +/- 50 g (m/s²)
- Frequência de ressonância de 20 kHz.



Figura 3.9- acelerômetro especificado.

Todos os testes a seguir utilizaram o primeiro protótipo de aquisição apresentado no capítulo 2 (2.3.1), assim como o acelerômetro especificado acima.

3.3. Segundo Teste / LAMEF- UFRGS

Como continuação no desenvolvimento do projeto, foi monitorado um segundo teste sob carregamento tração-tração e com a ruptura induzida dos arames. O primeiro teste no LAMEF teve características semelhantes ao teste da COPPE, com algumas mudanças que serão descritas abaixo.

Diferentemente do teste da COPPE, onde o *riser* era tracionado até 100 toneladas de forma direta, no ensaio no LAMEF, a tração foi realizada em ciclos, com cargas variando entre 50 a 150 toneladas, em um período de 8s.

A fim de tornar o momento da ruptura mais real, foi proposta nesse segundo teste uma fragilização dos arames, a partir da confecção de pontos de solda, com resfriamento rápido e a adição de ácido. Com isto os arames selecionados ficaram fragilizados e trincados favorecendo o mecanismo de ruptura.

As imagens apresentadas na Figura 3.10 mostram a seção de acesso aos arames da armadura externa durante a aplicação do resfriamento da solda e a adição de ácido nos arames do *riser*. Este procedimento foi aplicado antes do ensaio cíclico.



Figura 3.10-Aplicação de pontos de solda e ácido para fragilização dos arames.

Para realização do teste foi utilizada uma amostra de *riser* com 6 metros de comprimento adquirida para testes (nova), com 6 polegadas de diâmetro interno, e que possuía 34 arames na armadura de tração interna e 37 arames na armadura de tração externa. A seção transversal dos arames das armaduras de tração apresentava dimensão de 15x5mm.

O teste teve duração de cinco dias e ocorreu nas instalações do LAMEF na UFRGS – no período entre os dias 19 a 23 de outubro de 2009, Figura 3.11.

Esse foi o primeiro ensaio após os testes no LTS na COPPE e a primeira vez que os acelerômetros e o sistema de aquisição especificado foram testados.

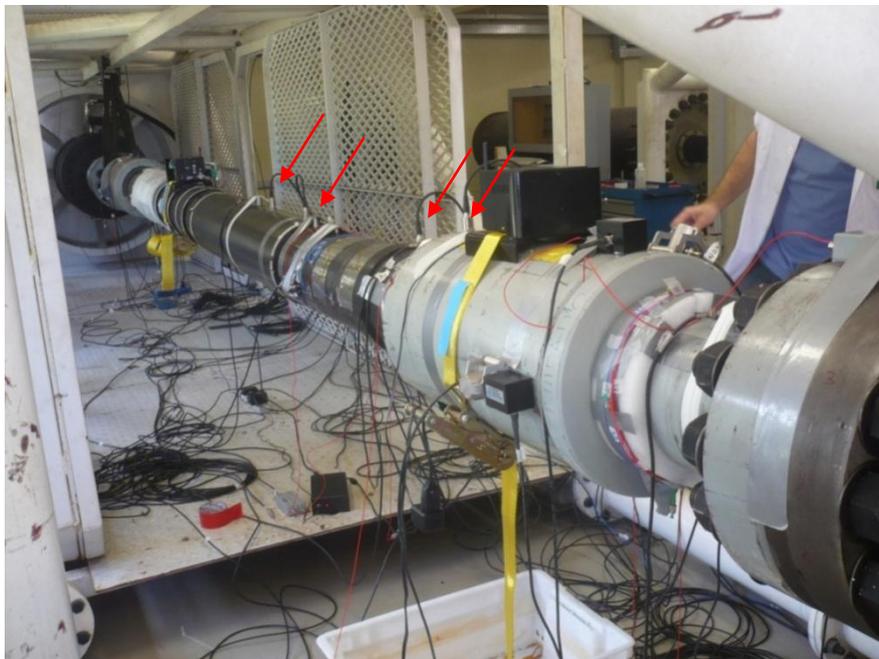


Figura 3.11-*Riser* instrumentado para início dos testes. As setas indicam a posição dos acelerômetros.

3.3.1. Instrumentação

Para a instalação dos acelerômetros no *riser* foram escolhidos pontos de medição ao longo do eixo do duto. Foram instalados quatro sensores na amostra, sendo um no conector e os outros três ao longo do corpo do duto, como apresentado na Figura 3.12.

O acelerômetro no conector tem a finalidade de avaliar e comparar a resposta do sensor acoplado ao conector com os fixados na capa. A grande massa de metal, presente nas conexões, poderia mascarar os resultados das rupturas. Dois sensores foram instalados em uma região do *riser* que apresentava uma capa polimérica dupla, a fim de verificar a propagação do sinal nessa região onde o mesmo poderia sofrer atenuação.

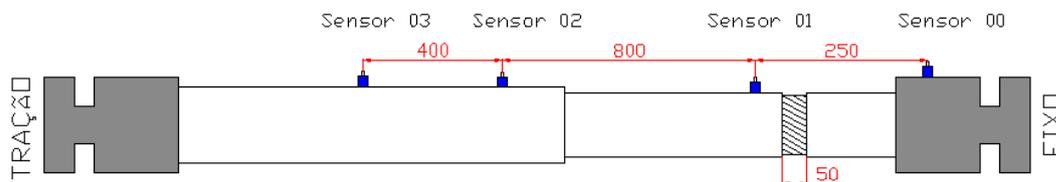


Figura 3.12-Disposição dos sensores na amostra (medidas em mm).

O posicionamento dos acelerômetros permite correlacionar os sinais produzidos no instante da ruptura, para assim verificar sua propagação e determinar o local da ruptura.

Uma observação durante a execução do teste foi em relação à forma de acoplamento dos sensores na capa polimérica e no conector. A instalação foi realizada com preparação mecânica e química da superfície (lixamento e aplicação de *primer*), para melhorar a aderência, e adesivo à base de cianoacrilato na interface polímero-aço (capa do *riser*-base do acelerômetro).

O método de acoplamento dos sensores na capa polimérica do duto flexível teve que ser alterado durante a pesquisa, pois a colagem realizada nos acelerômetros com cianoacrilato demonstrou baixa eficiência. Durante os primeiros ensaios o carregamento era estático, e com isso, a utilização do cianoacrilato para a fixação dos sensores foi adequada. Porém em testes seguintes, quando a forma de carregamento foi alterada de estática para dinâmica, o cianoacrilato apresentou falhas, ocasionando quedas de sensores ao longo dos

testes. Como os testes dinâmicos são de longa duração, o método de colagem tem que ser extremamente confiável, para evitar perda dos dados.

Como o sistema em estudo tem como objetivo final a monitoração de *risers* em plataforma por longos períodos de tempo, o método de colagem deverá não só atender as especificações dos testes, como também as intempéries do monitoramento em campo. Para isso, outros meios de fixação dos acelerômetros foram estudados para solucionar o problema de queda dos sensores da amostra.

3.3.2. Resultados

Os sensores utilizados são acelerômetros piezelétricos que apresentam uma sensibilidade de 100 mV/g e faixa de medição de $\pm 50g$, seguindo o que foi especificado após o teste no LTS. Porém, ao longo do teste, não foi previsto que as amplitudes de vibração pudessem ultrapassar o limite de operação do sensor. Entretanto, alguns sensores, no momento da ruptura, tiveram os seus sinais saturados, indicando que a vibração associada ao rompimento foi maior que 50g. Com isso, para uma melhor análise da resposta, e com o intuito de evitar essa saturação do sinal, o sensor 01 foi substituído por um acelerômetro de menor sensibilidade (10 mV/g) para assim conseguir visualizar as máximas acelerações geradas. A Figura 3.13 abaixo mostra o gráfico de saída do *software* de aquisição e os sensores sofrendo um nível de vibração superior à capacidade de registro.

Gráfico do evento

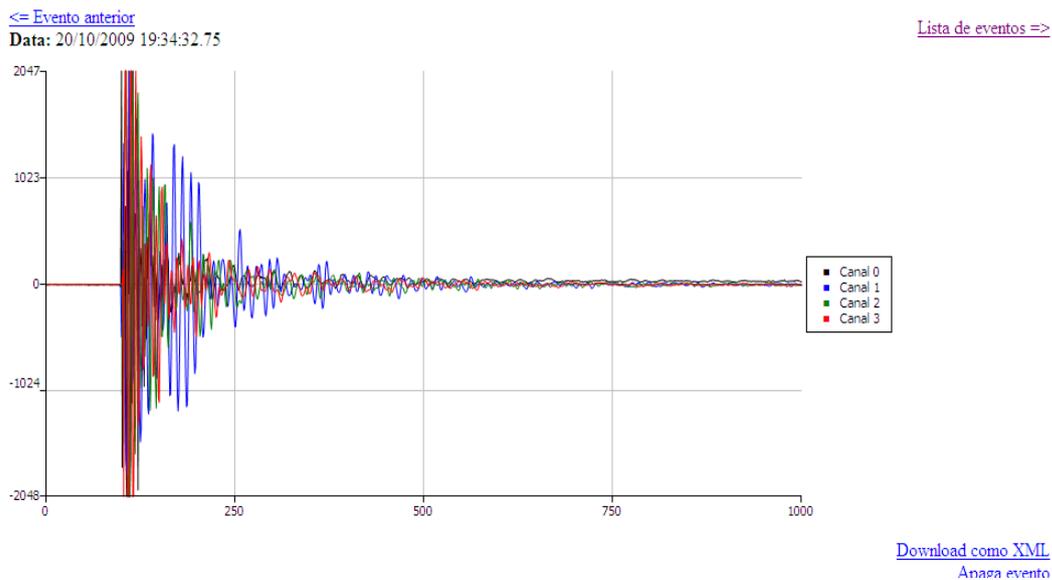


Figura 3.13-Gráfico imediato do *software* de análise. Sinal registrado no momento da ruptura de um arame. Detalhe para a saturação dos picos, ultrapassando o fundo de escala.

Para converter para g, basta dividir por 40,96, que corresponde a 1g. E para conversão no domínio do tempo, divide-se o número de amostra pela taxa de aquisição de utilizada. Durante o teste foram testados valores da taxa de aquisição que variaram entre 10 a 12,5 kHz.

O limite de $\pm 50g$ gera 5 Volts, que é máxima voltagem que o equipamento suporta, ou seja, a saturação é causada tanto no sensor quanto no equipamento.

É possível observar no gráfico da Figura 3.14 que o nível de vibração gerado em algumas rupturas pode alcançar picos de até 120g. Esse valor não foi encontrado durante o primeiro teste no LTS, pois alguns fatores que são relevantes para o aumento de do sinal de vibração começaram a ser estudados a partir do atual teste.

O gráfico da Figura 3.14 mostra o sinal do novo sensor 01, de menor sensibilidade, durante o rompimento do quarto arame.

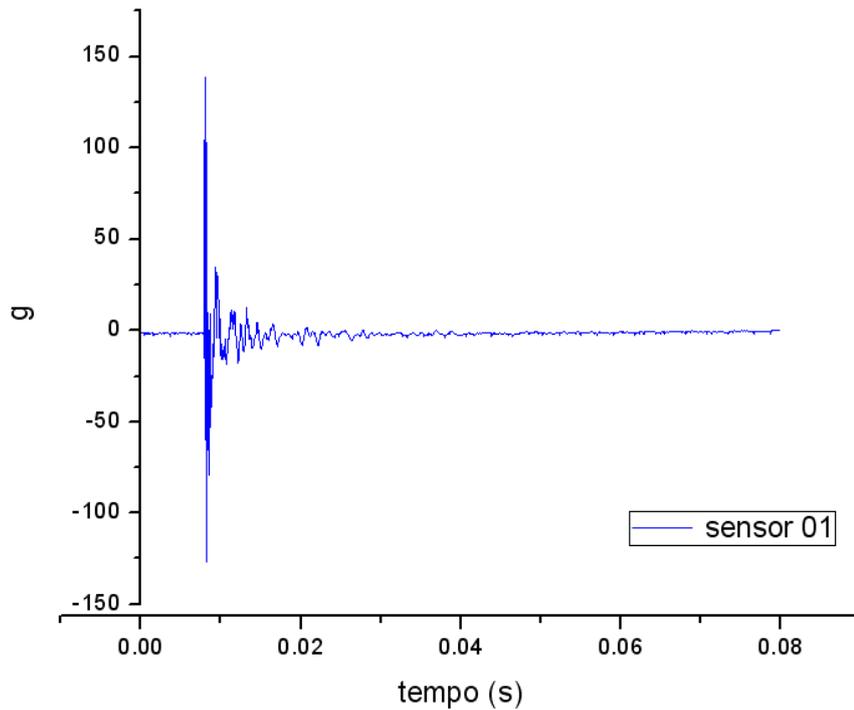


Figura 3.14-Gráfico com o sensor de sensibilidade 10mV/g. Taxa de aquisição de 12,5 kHz.

A Tabela 3.2 aponta as principais diferenças entre os dois testes, a fim de justificar o aumento da amplitude do sinal de ruptura.

Tabela 3.2-Diferença entre os 2 primeiros testes.

	LAMEF	LTS
Carregamento	-Carga cíclica até 150 ton.	-Carga estática até 100 ton.
Arame	-Arame de grande seção transversal. (15mm x 5mm)	-Arame de pequena seção transversal. (8mm x 3mm)
Estímulo de falha	-Pontos de solda e adição de ácido, seção íntegra. -Material fragilizado e grande seção no momento da ruptura	-Corte parcial da seção transversal para facilitar a ruptura. -Seção do arame reduzido durante a ruptura

A assinatura do sinal é coerente com os resultados obtidos nos ensaios em 2007, porém a força g medida na ruptura, é de uma intensidade 10 vezes maior.

Diferente do teste no LTS, as instalações dos sensores nas conexões terminais do duto em ensaio registraram fortes transientes de aceleração, de mesma amplitude que os sensores instrumentados diretamente na capa. Importante

ressaltar que no teste no LTS os sensores na conexão ficaram dispostos atrás do conector, enquanto o acelerômetro instalado no conector nesse segundo teste se encontrava em cima da conexão, como pode ser visto nas Figuras 3.11 e 3.12. Isso possibilita uma fácil instalação do sensor em campo e indica um ponto preferencial para monitoramento. Mais à frente, os testes seguintes corroboram essa afirmação.

A Tabela 3.3 apresenta todos os resultados dos máximos de aceleração durante o rompimento dos arames e a carga cíclica envolvida. Devido à saturação dos sensores, tornou-se difícil uma análise de comparação nos pontos medidos, pois apenas o sensor 01 apresentou um sinal quantitativo passível de comparação. Mas o que se pode inferir é que o sinal de ruptura dos arames é facilmente discriminado por amplitude, não ocorrendo nenhum evento durante o teste que afete o grau de certeza do momento da ruptura do arame.

Tabela 3.3-Resumo dos resultados registrados. Aceleração máxima em g (m/s²).

ROMPIMENTO	DATA / HORA	CICLO NA RUPTURA (Ton.)	ACELERAÇÃO MÁXIMA			
			SENSOR 00	SENSOR 01	SENSOR 02	SENSOR 03
1°	20/10 - 15:42:47	165 +/- 55	> 50g	> 50g	> 50g	> 50g
2°	20/10 - 19:33:33	80 +/- 20	> 50g	> 50g	> 50g	> 50g
3°	20/10 - 19:34:32	80 +/- 20	> 50g	38	> 50g	48g
4°	21/10 - 10:59:01	120 +/- 40	> 50g	122	> 50g	> 50g
5°	21/10 - 18:43:41	160 +/- 40	> 50g	60	> 50g	> 50g
6°	21/10 - 19:00:51	160 +/- 40	> 50g	80	> 50g	> 50g
7°	22/10 - 11:29:15	140 +/- 20	> 50g	60	> 50g	> 50g
8°	22/10 - 14:52:05	190 +/- 30	> 50g	110	> 50g	> 50g
9°	22/10 - 16:54:25	170 +/- 50	> 50g	70	> 50g	> 50g
10°	22/10 - 19:16:10	100 +/- 50	> 50g	140	Queda sensor 02	> 50g
11°	22/10 - 19:29:08	140 +/- 80	> 50g	100	Queda sensor 02	> 50g
Média		140 +/- 40	> 50g	80	>50	>50

Em observação as análises dos sinais de ruptura, não foram identificadas nenhuma relação de atenuação ou perda de sinal associado aos sensores 02 e 03 instalados na seção do duto que apresentava um duplo revestimento da capa polimérica.

3.3.3. Ruídos e Acomodações

Foi observada uma forte diferença entre o sinal de possíveis acomodações dos arames tracionados, com os transientes gerados durante a ruptura. O sensor 00, acoplado no conector foi o mais sensível a ruídos quando comparado com sensores instalados na capa, e com isso detecta uma quantidade maior de ruídos.

Isso é justificado pelo fato do sensor 00 no conector estar mais próximos da terminação dos arames, onde os níveis de acomodações são mais intensos.

Esses ruídos registrados pelo sensor 00 parecem estar relacionados a possíveis acomodações dos arames no interior do conector e não podem ser associados a um sinal de rompimento, pois a assinatura do sinal gerado é extremamente inferior aos sinais de falha.

A Figura 3.15 corresponde a um sinal característico de acomodações registradas no conector, captado pelo sensor 00. É possível verificar as baixas amplitudes no valor de pico, alcançando cerca de 5g. Na imagem, fica claro que apenas um sensor identifica o transiente e que a amplitude é consideravelmente menor.

A análise do ruído é importante para dimensionar o nível de vibração a ser programado no equipamento para registro do apenas do evento ruptura. O *trigger* do sistema de vibração é um parâmetro que sofreu alterações ao longo do teste, a fim de estudar o sinal de ruído em relação ao sinal de ruptura. Durante todos os testes, foi utilizado o *threshold* com níveis entre 1g a 10g, para identificar não só os eventos de ruptura como os ruídos de teste e acomodações da amostra em tração.

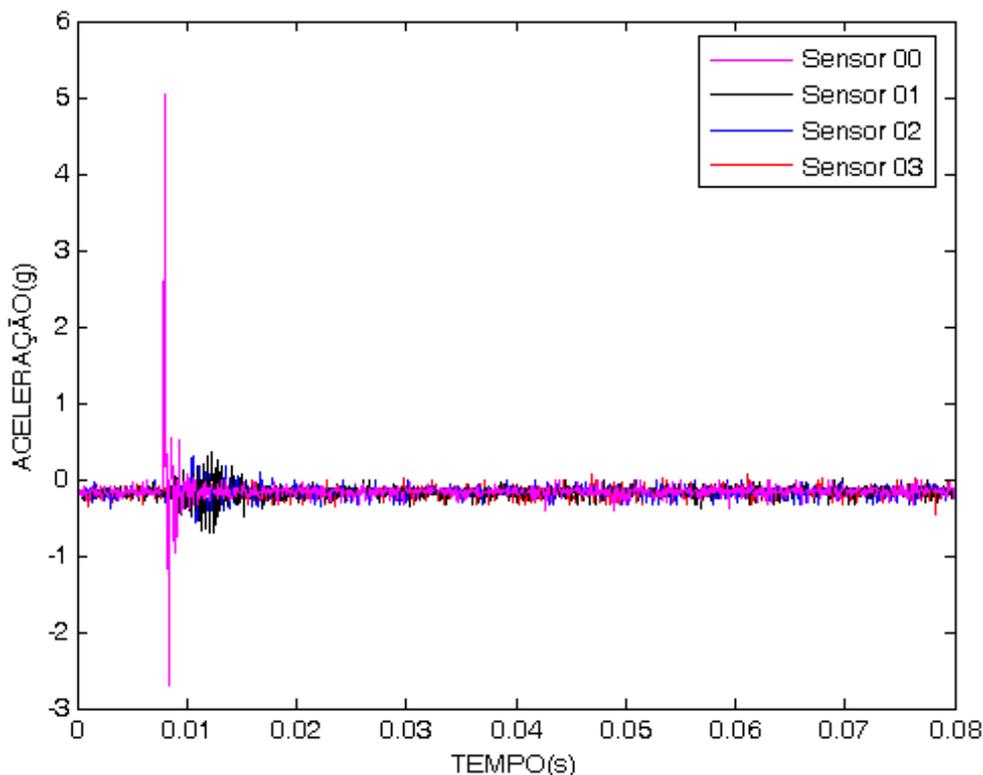


Figura 3.15-Sinal no conector identificado pelo sensor 00.

3.3.4. Análise das Frequências

Após a análise no domínio do tempo, foi estudada a resposta dos sensores no domínio da frequência, com o intuito de verificar a faixa de frequência do sinal. Para essa análise, foram escolhidos apenas os sinais não saturados, em que o espectro estivesse em toda a janela de amostragem, para fazer a transformada de Fourier (FFT) e examinar as frequências envolvidas durante o rompimento dos arames.

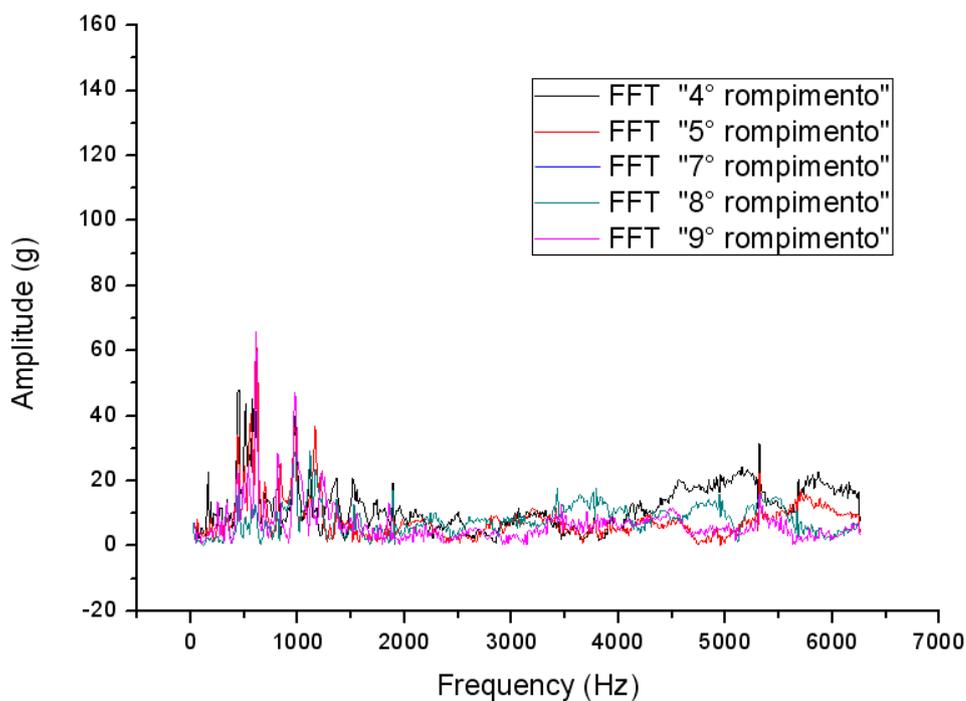


Figura 3.16- Análise no domínio da frequência dos sinais durante a ruptura do 4º até o 9º arame.

Na Figura 3.16, o eixo das ordenadas apresenta a amplitude de aceleração em g e no eixo das abscissas à frequência em Hertz. Verifica-se que a faixa de frequência relacionada com as maiores amplitudes está em torno de 0 e 1600 Hz. A partir de 4000 Hz picos de amplitudes voltam a aparecer no sistema, mas com intensidades menores, caracterizando ruído.

Em seguida, como forma de comparação, foi feita a FFT do ruído, como mostrado na Figura 3.17, proveniente do atrito e acomodações nos arames, captado pelo sensor 00 acoplado ao conector. Os dados tratados informam que a FFT do ruído, não apresenta picos em nenhuma faixa de frequência, aproximando-se muito de um ruído do tipo branco. Quanto à amplitude, esse sinal ruidoso,

apresenta valores bem menores quando comparado com o sinal de ruptura. Indicando assim, grandes diferenças entre os sinais, facilitando a distinção.

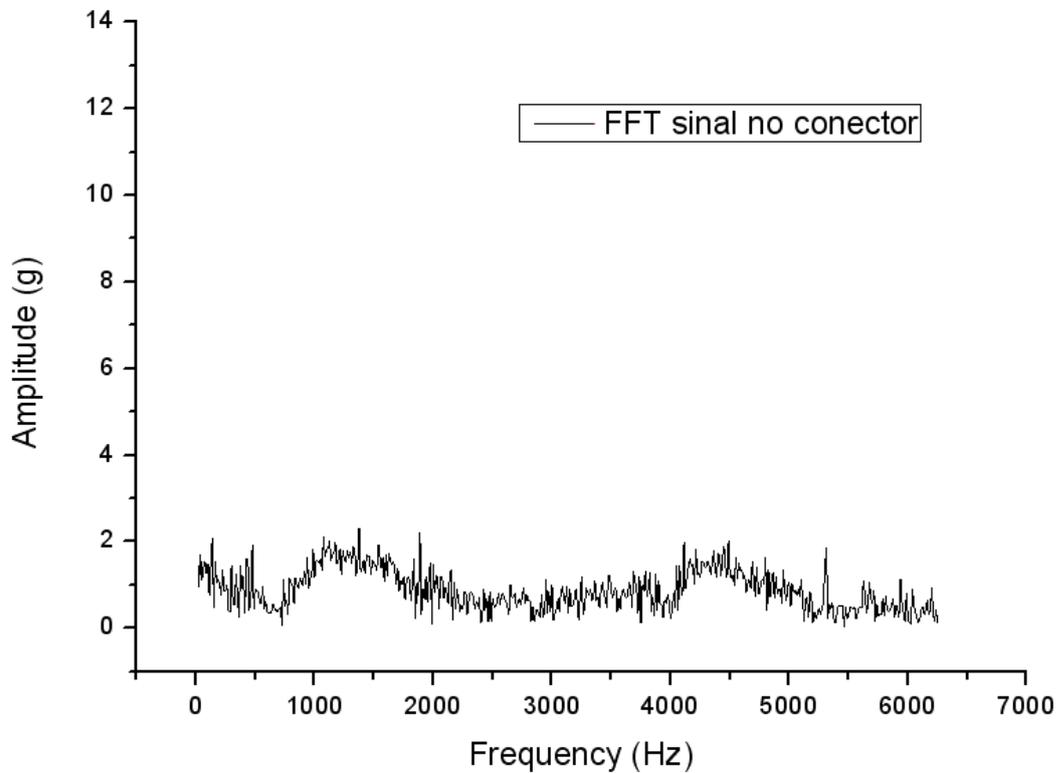


Figura 3.17-Sinal de ruído no conector no domínio da frequência.

3.3.4.1. Efeito *Aliasing*

Foi utilizada uma frequência de amostragem para aquisição do sinal de 10 kHz. A partir da análise dos resultados obtidos durante os ensaios, chegou-se a suposição de estar ocorrendo algum efeito de *aliasing* do sinal. Esta suposição depende do fato de que as frequências de ressonância dos acelerômetros utilizado no ensaio estarem na faixa de 20 kHz e o sistema não possui nenhum filtro *anti-aliasing* antes do conversor A/D. Considerando-se ainda que a frequência de ressonância do sistema composto pela amostra de duto flexível seja significativamente inferior à frequência de amostragem.

Sendo o evento de rompimento do arame estrutural um sinal de natureza impulsiva e, portanto de conteúdo espectral de banda larga, é de se esperar que este fosse excitar as frequências de ressonância dos sistemas envolvidos. Porém, o conteúdo espectral do sinal adquirido não corresponde nem a frequência de ressonância do acelerômetro, nem a frequência de ressonância esperada para a

amostra. Assim supõe-se a ocorrência do fenômeno de *aliasing* ou sub-amostragem do sinal de ressonância do acelerômetro.

Para confirmar tal hipótese, foi realizado uma simulação em MATLAB na qual um sinal transiente, semelhante ao observado nos ensaios, com frequência normalizada de 1Hz, foi amostrado com diferentes frequências, 10, 5, 0.9, 0.75, 0.6, 0.55, 0.45 e 0.35 Hz. Observa-se que os sinais amostrados com frequência acima de 2 Hz produzem picos espectrais em 1Hz. Já os sinais sub-amostrados, erroneamente indicam frequências menores.

O resultado desta simulação é apresentado na Figura 3.18 a seguir. Podemos observar que existe um efeito de “rebatimento” da frequência de ressonância do sinal original para frequências inferiores, quando a amostragem é realizada abaixo da frequência de *Nyquist*, em que a frequência de amostragem deve ser duas vezes ou maior que a frequência do sinal.

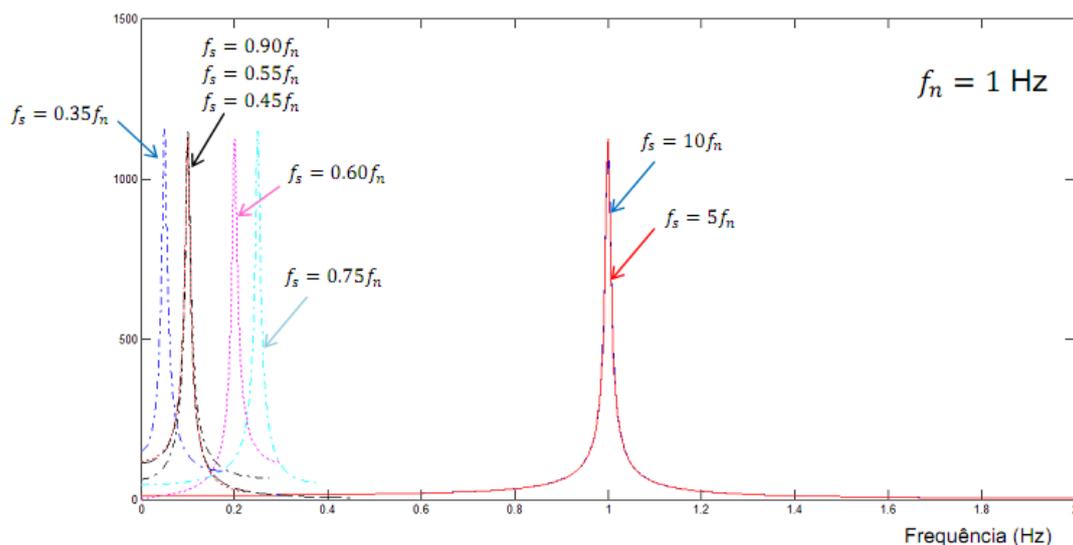


Figura 3.18-Simulação em MATLAB do efeito de *aliasing*.

Pode-se inferir, a partir dos resultados da simulação, que sendo a frequência de ressonância do acelerômetro usado de cerca de 20 kHz (pequenas variações são admissíveis inclusive em consequência da montagem), quando realizada amostragem com frequência de 10kHz (conforme configurado), resultaria em um sinal de cerca de 10% desse valor, ou seja em sinais abaixo de 2kHz. O que observamos no domínio da frequência seria então o *aliasing* da resposta "natural" do acelerômetro.

Essa característica de sinal foi observada nos resultados obtidos no ensaio. Deve-se considerar que o atual sistema que não contempla nenhum filtro “anti-aliasing”.

Apesar desse levantamento da análise de *aliasing* no sinal, não foi alterado a taxa de amostragem nos testes seguintes.

3.4. Terceiro Teste / LAMEF – UFRGS

Com a experiência adquirida nos dois testes anteriores, abriu-se uma nova frente de pesquisa com a finalidade de dotar a técnica de monitoramento baseada em vibrações uma maior confiabilidade na detecção das falhas dos arames da armadura de tração.

Para isso foram monitorados dois testes de fadiga de longa duração com amostras em escala real no intuito de qualificar o monitoramento por vibrações. Estes testes foram realizados dentro do contexto “*blind test*”, teste cego. Isto é, os dados foram coletados via internet, sem acesso às informações locais do ensaio. De forma a simular condições reais de instalação em campo, foram utilizados *softwares* de acesso remoto para controlar e acessar todos os dados.

No teste de fadiga, a ruptura dos arames ocorre de forma aleatória, sem distinção entre as camadas externa e interna da armadura de tração. Esse detalhe se difere bastante dos testes anteriores, em que o método aplicado se baseava na ruptura induzida, com a realização de entalhes ou ataques químicos em arames conhecidos. Isso poderia alterar de forma direta a amplitude do sinal registrado pelos sensores no momento da ruptura, como será visto mais a frente.

O terceiro teste que também ocorreu no LAMEF-UFRGS e teve duração de três meses de monitoração contínua (de 4/12/2009 a 15/3/2010). A amostra utilizada durante o teste apresentava 6 polegadas de diâmetro interno e estrutura idêntica à utilizada no teste 2.

Para simular condições de corrosão interna, foi injetada no interior do espaço anular do *riser* uma solução de água do mar sintética com CO₂, como apresentado na Figura 3.19, enquanto a pressão interna do duto era mantida a 275 bar. A mistura era injetada pela conexão do *riser* e contava com um controle de temperatura através de um sensor tipo PT100.



Figura 3.19- Injeção de água salgada saturada com CO₂ e o controle de temperatura.

Para tracionar o corpo de prova foi utilizado um quadro de tração com capacidade de carga de aproximadamente 2000kN. A Figura 3.20 apresenta o sistema pronto para o início dos testes.

Durante o teste toda a parte de aquisição e tratamento dos dados foi realizada remotamente pelo Laboratório de Sensores a Fibra Óptica na PUC-Rio. Foi utilizado um *software* comercial de acesso remoto (*Logmein*) para garantir a comunicação com o equipamento de aquisição presente no LAMEF.



Figura 3.20- Riser no quadro de tração para início do teste. Acelerômetros indicados com seta.

3.4.1. Instrumentação

Para a instrumentação foram dispostos na amostra os mesmos quatro acelerômetros utilizados no teste anterior. Apesar de alguns sinais saturados registrados no teste anterior, foi decidido utilizar os mesmos sensores, já prevendo um sinal de amplitude mais baixo.

Como forma de evitar a queda de sensores que ocorreu durante os testes anteriores, foi proposto um novo método de fixação. Uma resina epóxi foi empregada nos testes seguintes. A Figura 3.21 mostra a forma em que o acelerômetro foi colado no conector. Para a instrumentação na capa polimérica, a metodologia de colagem do acelerômetro foi realizada de forma idêntica ao conector.



Figura 33.21-Instrumentação do acelerômetro.

Como uma alternativa para a fixação do acelerômetro foi desenvolvida uma cinta metálica presa à base do acelerômetro como mostra a Figura 3.22. A dimensão da cinta pode ser ajustada como uma abraçadeira, podendo atender diferentes diâmetros de duto. A cinta tem como finalidade, garantir que o sistema de medição fique solidário ao corpo da estrutura. Esse sistema de fixação não chegou a ser efetivamente empregado nos testes, porém é uma alternativa para

fixação do acelerômetro ao *riser*, especialmente nos casos previstos de aplicação em campo.

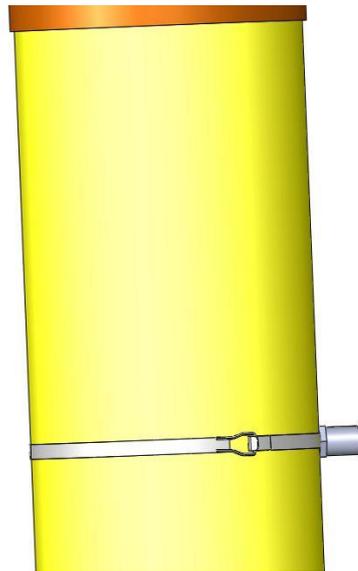


Figura 3.22-Esquemático da cinta de fixação do acelerômetro no *riser*.

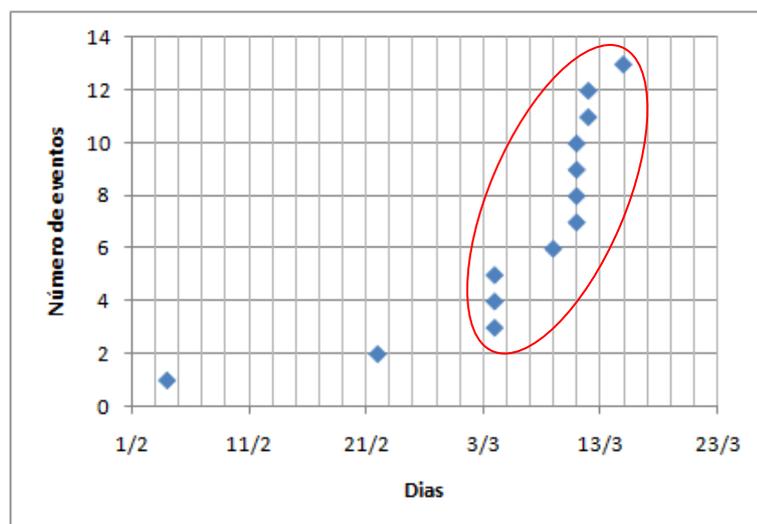
3.4.2. Resultados

Com os dados recebidos via internet foram registrados 13 possíveis rupturas na armadura de tração, ao longo de 102 dias de operação contínua. Com isso, o teste foi encerrado, pois possivelmente já teria atingido o critério de parada estipulado pelo fabricante de 10 arames rompidos.

A Tabela 3.4 e o gráfico ao lado apresentam os eventos em ordem cronológica de acontecimento.

Tabela 3.4-Ordem cronológica dos eventos

Número do Evento	Data
1	04/02/2010
2	22/02/2010
3	04/03/2010
4	04/03/2010
5	04/03/2010
6	09/03/2010
7	11/03/2010
8	11/03/2010
9	11/03/2010
10	11/03/2010
11	12/03/2010
12	12/03/2010
13	15/03/2010



É possível observar a concentração de rupturas durante a fase final do teste em destaque no gráfico acima.

As figuras que serão apresentadas são referentes aos sinais detectados durante o teste, que evidenciam o momento da falha do arame. Detalhe que, apesar das mudanças no método de teste, comentadas acima, os resultados gráficos são semelhantes aos analisados no primeiro teste no LAMEF, citado no tópico anterior.

Com as modificações na metodologia do teste, os sinais não sofreram grandes alterações. Mantiveram suas propriedades de resposta no tempo e características de amortecimento. Pode-se afirmar que as amplitudes encontradas nesse terceiro teste são semelhantes às encontradas no teste anterior. Foram verificados picos de sinal em torno de $\pm 50g$, alguns ultrapassando o limite e apresentando saturações de pico, como apresentado na Figura 3.23. Por opção, não foram trocados os sensores, uma vez que mesmo com pequenas saturações nos picos os resultados de ruptura eram bem identificados e com características bem próprias.

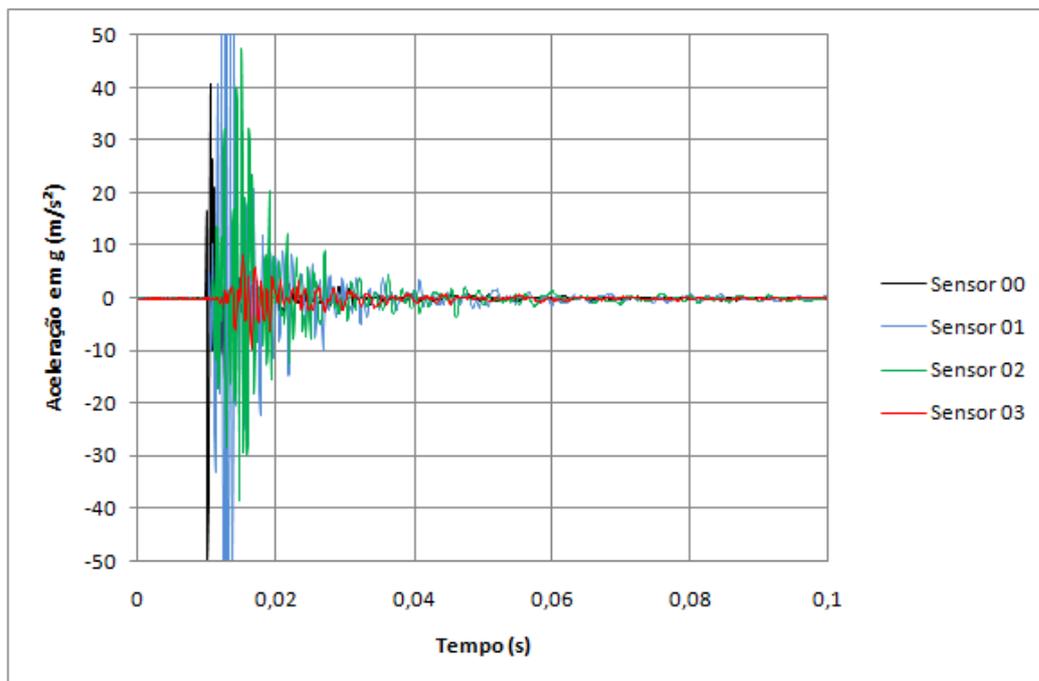


Figura 3.23 – Sinal da quarta ruptura

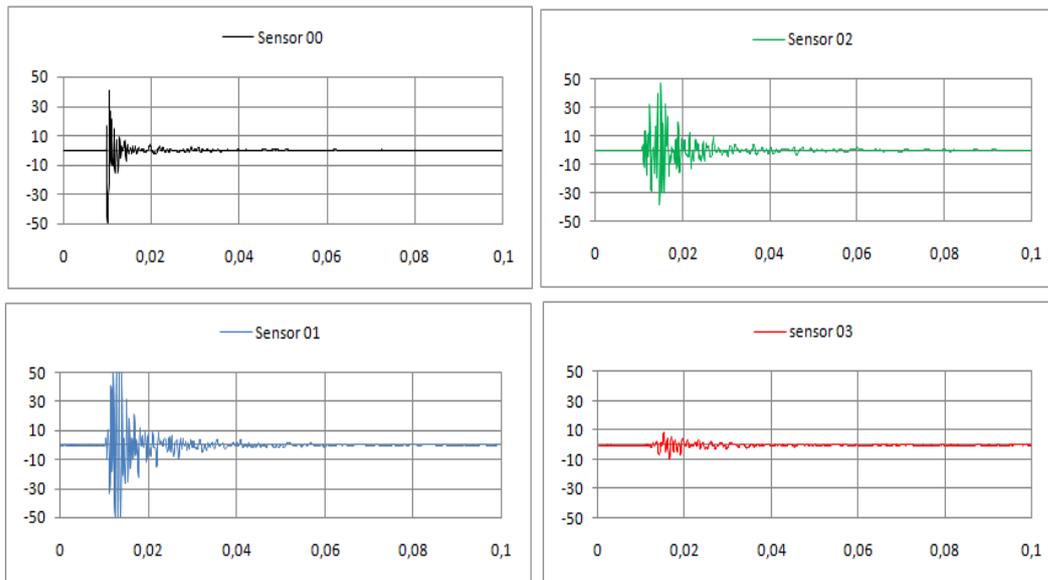


Figura 3.24-Sinal de cada sensor registrado durante a quarta ruptura

Um estudo importante do sinal, que pode ser verificado em todos os sinais de rompimento, é detalhado na Figura 3.24 e 3.25, referente à ruptura do nono arame. Onde é possível identificar o local da falha mediante a análise temporal dos dados, assim como a verificação das amplitudes geradas por cada sensor.

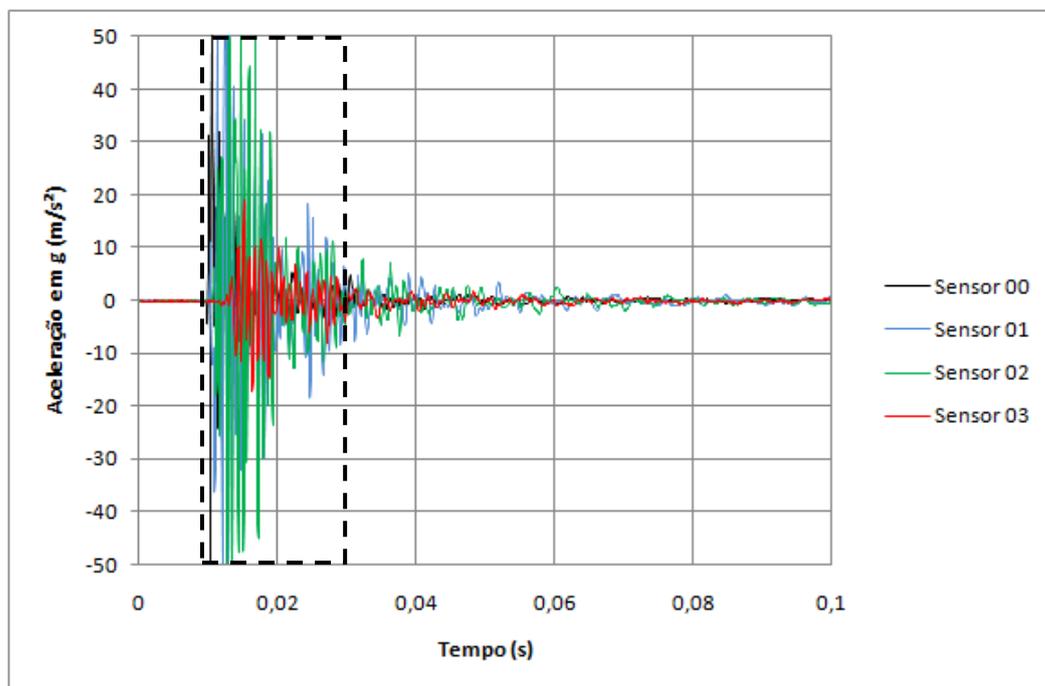


Figura 3.25-Rompimento do nono arame. Janela em destaque para análise do tempo e amplitude do sinal.

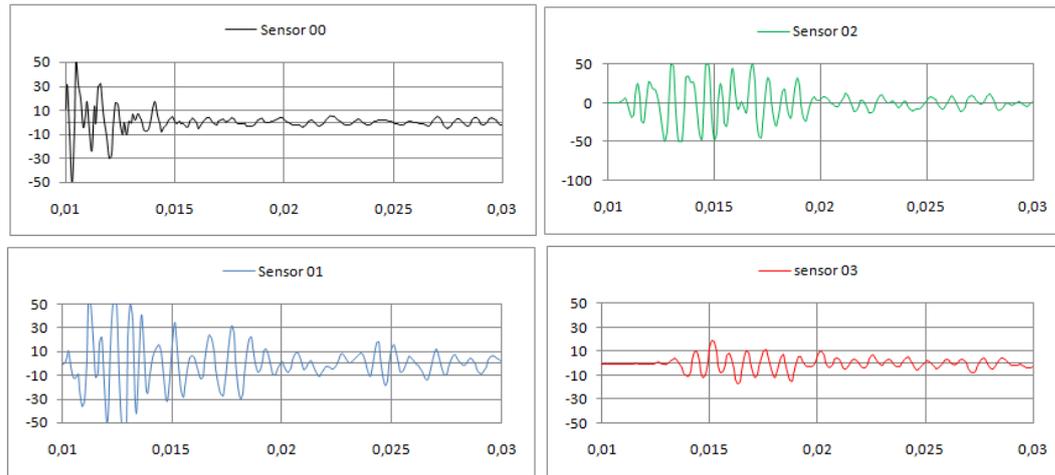


Figura 3.26- Detalhe de cada sensor. Com uma escala mais aproximada é possível verificar o local de ruptura dos arames. As amplitudes maiores no sensor 00 e no sensor 01 indicam que a falha ocorreu perto desses sensores. É perceptível a variação no tempo de resposta de cada sensor, auxiliando também na identificação.

No momento da falha, o sensor mais próximo a fonte de ruptura responde primeiramente ao transiente gerado e também essa resposta apresenta uma maior amplitude quanto aos outros sensores. Como ilustrado na Figura 3.26, o sinal em propagação atinge primeiro os sensores mais próximos ao local de ruptura. Em exemplo, uma falha na posição “A” indicada na Figura 3.26, resulta em uma resposta mais rápida e de maior intensidade no sensor S0 e no S1 quando comparado com o sinal no sensor S2 e principalmente no S3. O mesmo acontece aos outros sensores quando o local de ruptura é na posição “B” e “C”.

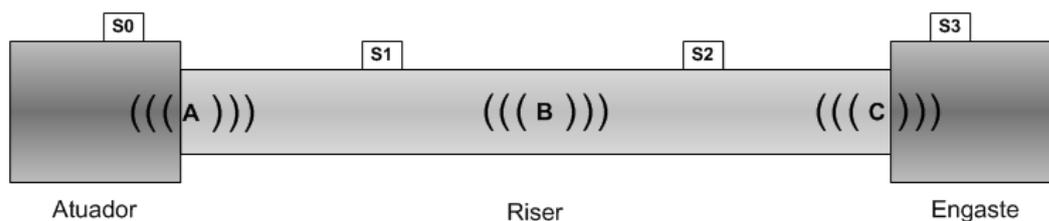


Figura 3.27- Tempo de resposta de cada sensor.

3.5. Quarto Teste / LAMEF – UFRGS

A técnica de vibração, conforme utilizado neste trabalho, é voltada para a detecção do evento de ruptura dos arames. Este tipo de evento ocorre em intervalos curtos de tempo e a monitoração de sistemas críticos como os *risers* necessitam de uma grande confiabilidade na emissão de laudos. Neste contexto e procurando dotar o sistema de redundância na detecção, um segundo método de

monitoração foi instalado, para trabalhar de forma complementar. Utilizou-se neste caso, o colar óptico 3D, descrito no item 1.3.1.1.2 deste trabalho.

Com isso, o sistema de detecção seria um sistema misto, trabalhando em conjunto com duas técnicas de monitoramento distintas, medindo grandezas físicas diferentes, porém com a mesma finalidade, Figura 3.27.

Sensores a fibra óptica, instalados ao longo do corpo tubular do duto medem continuamente sinais de deformação. A ruptura de arames das armaduras de tração gera um desbalanceamento de cargas no duto, que pode ser traduzido em deformações. A ideia é monitorar os sinais de vibrações juntamente com as deformações aplicadas no duto. A compilação destes dois sinais gerou indicações muito mais confiáveis dos eventos de ruptura.

O quarto teste empregado para qualificar o sistema de monitoramento baseado em vibrações apresentou características muito semelhantes ao terceiro teste, tanto na forma de execução e procedimento de carregamento, quanto nas dimensões físicas da amostra ensaiada.

A estimulação a corrosão também foi mantida nesse quarto teste, com o anular do duto flexível alagado para acelerar o processo corrosivo.



Figura 3.28-Riser no quadro de tração. Acelerômetros e os sensores ópticos instrumentados para início do 4º teste. Acelerômetros em círculo vermelho são indicados na figura e as setas indicam o local dos sensores ópticos.

3.5.1. Instrumentação

3.5.1.1. Vibração

Para a aquisição dos eventos, foram utilizados quatro acelerômetros de especificações idênticas, já descritos anteriormente, e distribuídos linearmente ao longo do duto flexível. Os sensores foram instalados tanto na capa quanto nos conectores. A disposição dos sensores é mostrada na Figura 3.28.

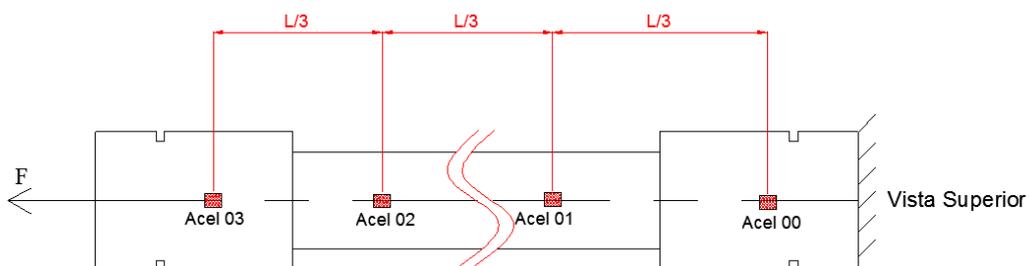


Figura 3.29-Disposição dos acelerômetros no duto flexível.

3.5.1.2. Fibra Óptica

A configuração dos sensores ópticos é distribuída em quatro canais de modo semelhante ao sistema de vibrações. Cada canal óptico contém um conjunto de sensores colados diretamente na capa polimérica da amostra que detectam as deformações segundo a orientação longitudinal, circunferencial e angular conforme ilustra a Figura 3.29.

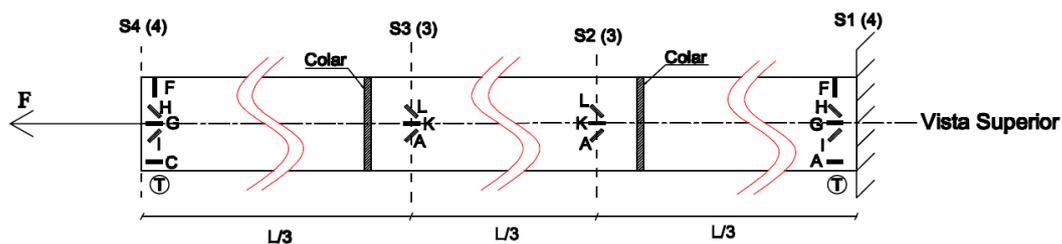


Figura 3.30-Disposição dos sensores de fibra óptica no duto flexível.

A Figura 3.30 apresenta os sensores ópticos instalados diretamente na capa. O sensor 1 em conjunto com o sensor 3, através da subtração de seus resultados, são responsáveis por medir a torção do duto, enquanto o sensor representado pelo número 2 mede a deformação longitudinal. Por sua vez, o colar óptico no número 4, solidário ao duto, é capaz de identificar alterações no diâmetro da amostra. Os conjuntos de sensores foram distribuídos de forma equidistante, fazendo com que os dois grupos de sensores ficassem no meio da amostra e outros dois nas extremidades da amostra, próximos aos conectores.

Importante mencionar que como cada rede de *Bragg* sofre influência da temperatura na medição de deformação, cada canal apresentava uma rede de *Bragg* dedicada a medir a temperatura local, de forma a compensar seus efeitos e evitar erros de medição no sistema óptico.

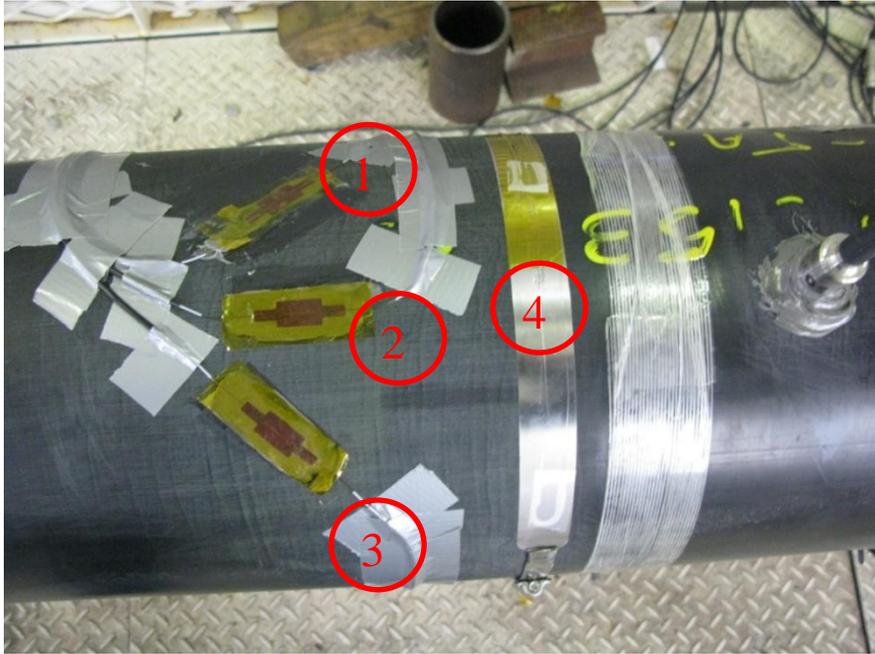


Figura 3.31-Sensores ópticos instrumentados na capa do *riser*.

Devido ao rompimento dos arames, as deformações geradas, como no caso de uma torção, podem ser identificadas através dos dados como um “degrau” na resposta do sensor. Estes resultados ópticos somados ao de vibrações aumentam a confiabilidade na identificação de uma ruptura. O gráfico da Figura 3.31 corresponde à deformação do sensor angular, em unidades de comprimento de onda (nm), durante a ocorrência de um evento típico. O sensor óptico apresenta uma senóide, que é a resposta ao carregamento cíclico. Ao ocorrer uma ruptura, esta senóide se desloca, devido às alterações ocorridas na capa polimérica.

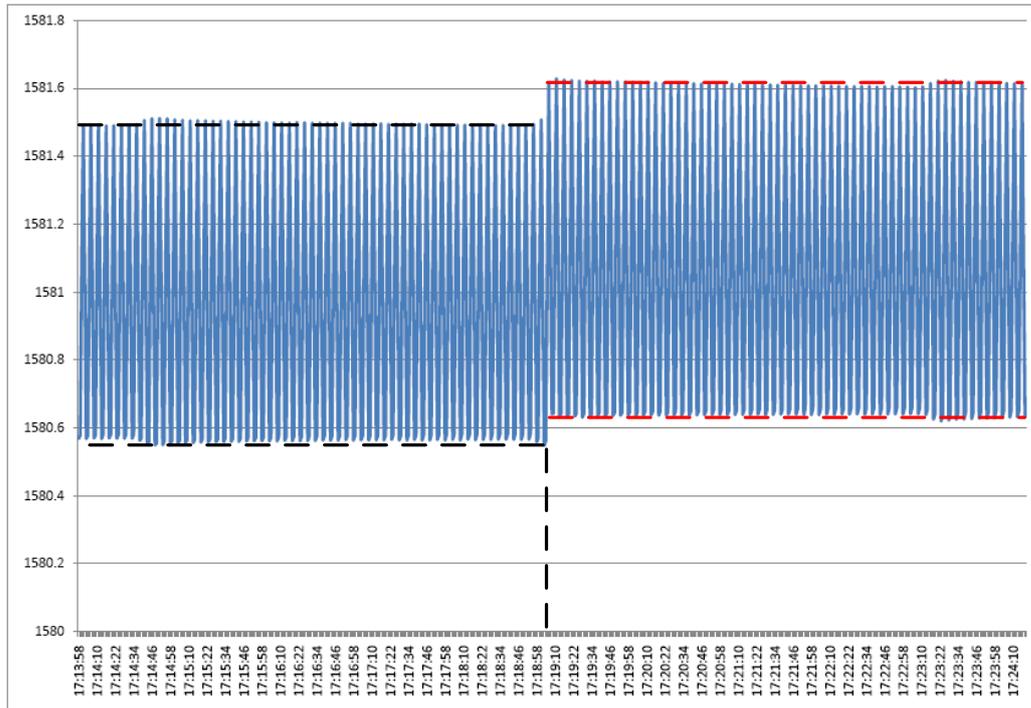


Figura 3.32-Sinal de ruptura medido pelo colar óptico 3D. O degrau corresponde ao momento da ruptura.

3.5.2. Resultados

Os resultados desse teste foram bastante positivos e garantiram com que o conjunto de monitoramento com as duas tecnologias fosse qualificado para ser futuramente testado em campo.

No total foram registrados 13 possíveis rupturas de arames. Ambas as técnicas de monitoramento apresentaram resultados semelhantes quanto à detecção de eventos. Os sinais produzidos pelos sensores de ambas as técnicas foram classificados conforme sua intensidade em fraco, médio ou forte. Como já mencionado nesse trabalho, essa classificação possibilita estimar o local onde ocorreu a ruptura. Com esta análise concluiu-se que ocorreram 8 rupturas no atuador, 4 no engaste e 1 no meio da amostra. A Figura 3.32 ilustra os locais dos rompimentos no *riser*. Este resultado é coerente com a estimativa teórica de que as extremidades são os locais onde ocorrem as maiores concentrações de tensões provenientes do carregamento.

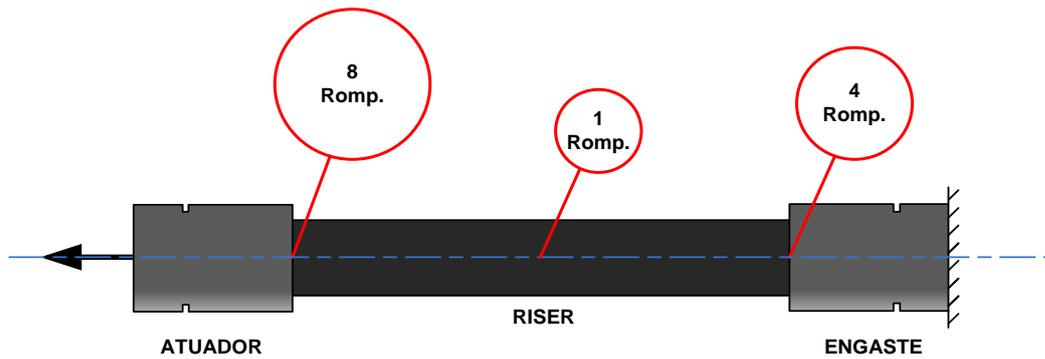


Figura 3.33-Disposição dos rompimentos.

Tanto pelo sistema de vibração quanto pelo sistema óptico, foi possível identificar o local da ruptura. Como os sensores estavam distribuídos ao longo da amostra, foi possível analisar as intensidades entre os sensores instalados e estimar o local onde ocorreu a falha. Nos sensores ópticos o indicativo é a diferença entre as intensidades de deformação, já nos acelerômetros, além da amplitude das vibrações, o tempo de propagação das perturbações também serviu com indicativo. Conhecendo o tempo entre o início do registro de cada acelerômetro no momento da ruptura e a distância entre os sensores verifica-se que a velocidade de propagação do sinal na amostra é de cerca de 2700 m/s.

Nas Figuras 3.34, 3.35 e 3.36, apresentadas abaixo, são referentes ao primeiro, terceiro e último evento de ruptura. Nota-se que o primeiro rompimento apresentado na Figura 3.34 apresenta uma amplitude menor quando comparado ao sinal do terceiro evento, Figura 3.35. E como sequência, ao comparar o terceiro sinal com o último sinal de ruptura nota-se um aumento na amplitude gerada, Figura 3.36.

O tempo médio de 2700 m/s de propagação do sinal na amostra indica que o meio mais provável de propagação do transiente de ruptura seja a capa polimérica, uma vez que essa velocidade de propagação registrada se assemelha com aos resultados obtidos na literatura de 2600 m/s a propagação do som em poliamida (*Nylon*) [36].

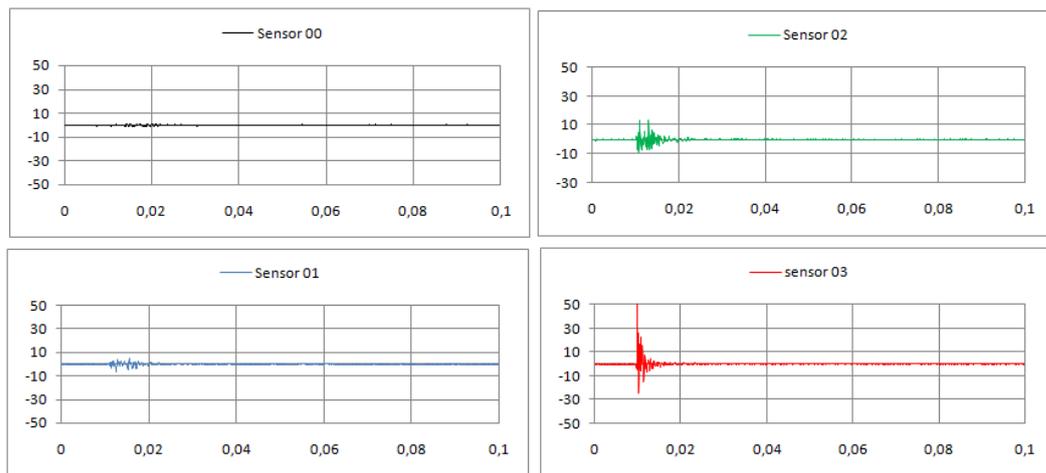
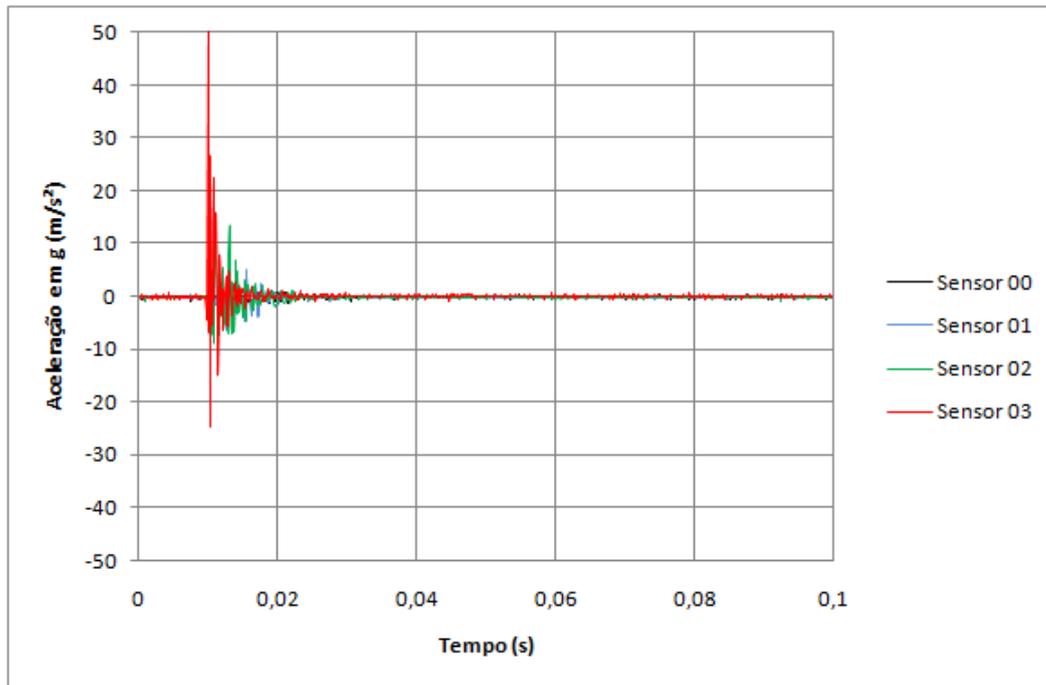


Figura 3.34-Sinal no atuador e referente à primeira ruptura.

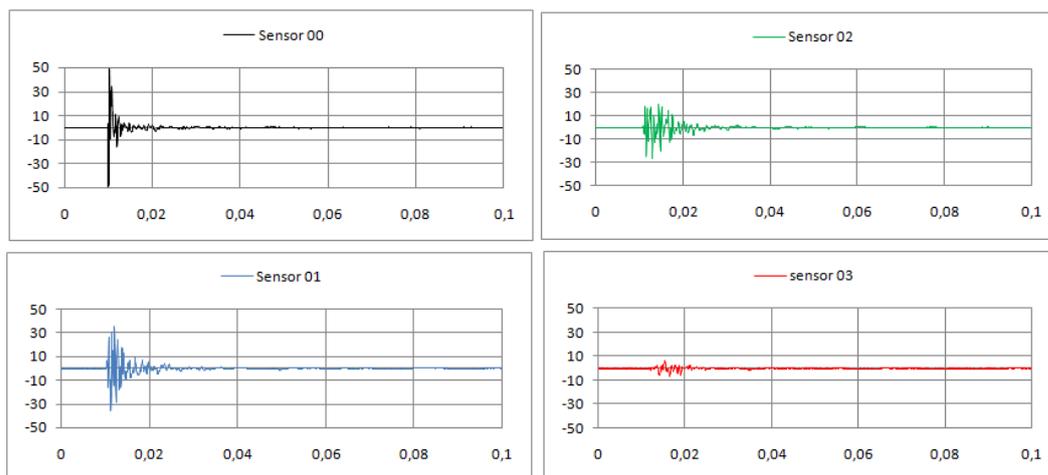
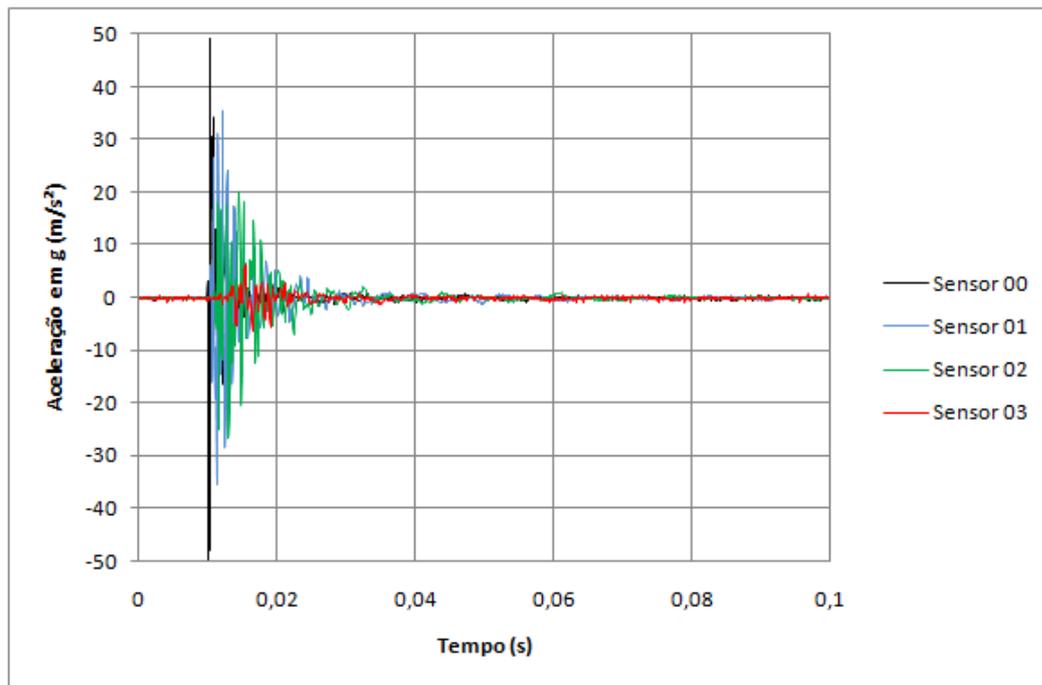


Figura 3.35- Sinal no lado engastado referente à terceira ruptura.

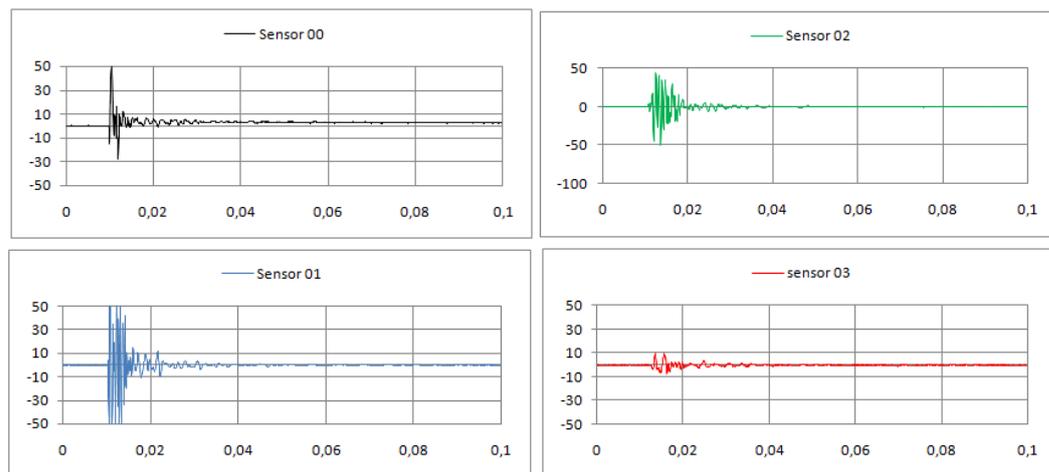
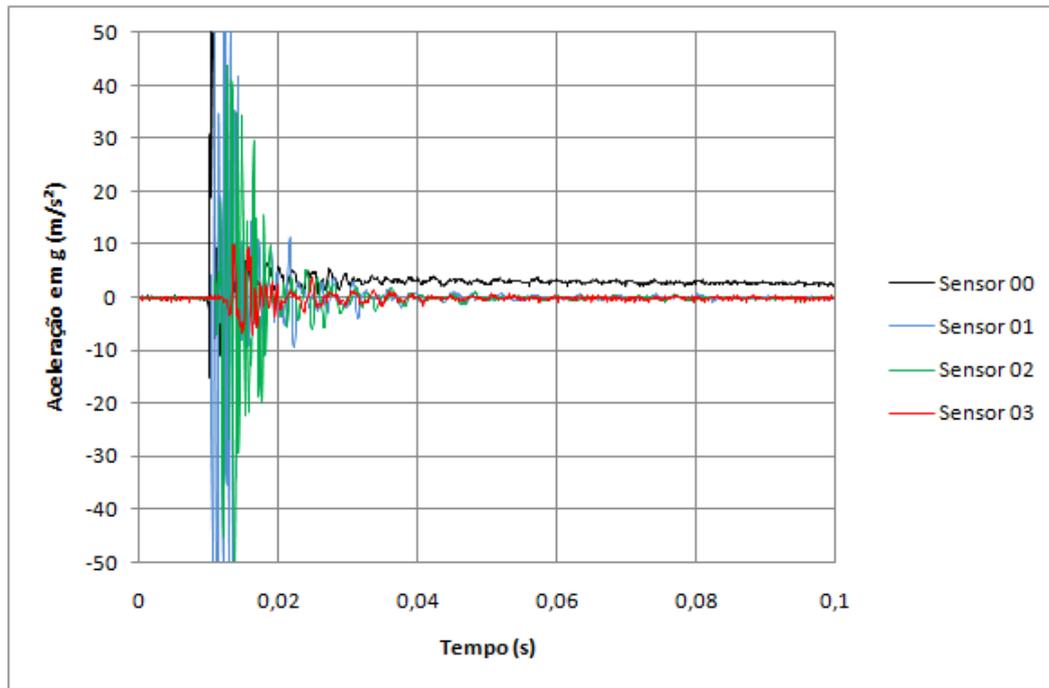


Figura 3.36-Sinal no lado engastado da amostra e referente à décima terceira ruptura (último rompimento).

São visíveis as diferenças entre os valores de amplitude dos sinais, na comparação com o primeiro, terceiro e último evento. Demonstrando que a progressão de eventos é acompanhada de maior amplitude de vibração. O gráfico na Figura 3.37 corrobora essa afirmação, onde o eixo das ordenadas apresenta o somatório da amplitude máxima dos quatro sensores em cada evento e nas abscissas os rompimentos ordenados. Estima-se que esse comportamento é devido à maior tensão atuante nos arames à medida que progridem as rupturas.

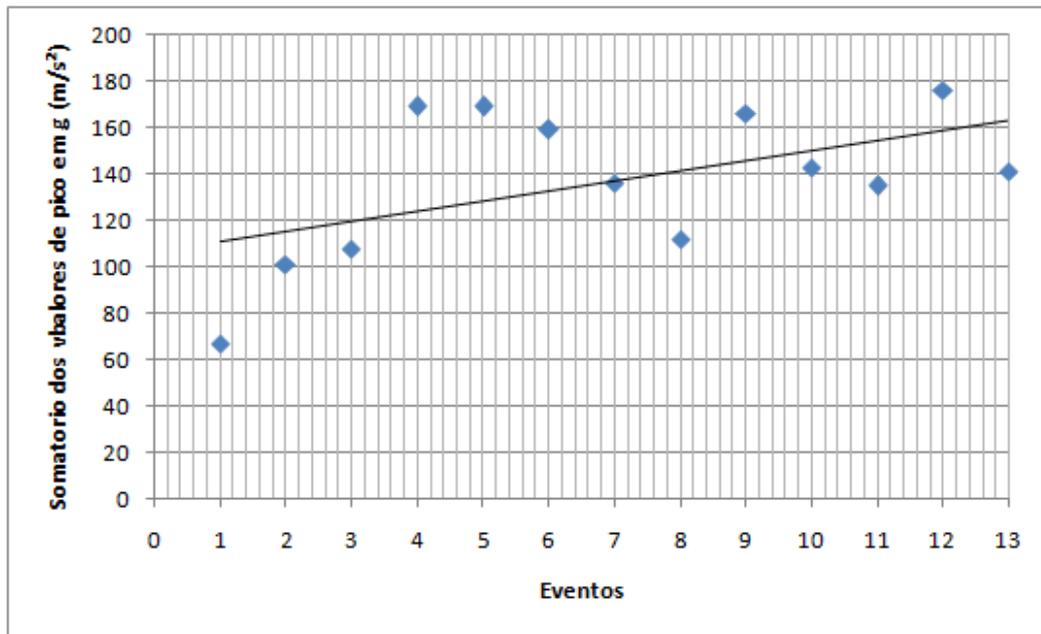


Figura 3.37- Aumento da amplitude dos sinais com o decorrer das rupturas.

A tabela 3.5 abaixo apresenta os valores máximos de cada sensor durante um registro de ruptura dos arames em ordem cronológica. Detalhe que os sensores 00 e 03 estão instrumentados nos conectores metálicos e detectaram altas amplitudes de sinal, como visto anteriormente no teste 2 (1º teste LAMEF).

Tabela 3.5- Cronologia de rupturas do quarto teste.

	Engaste → Atuador				
	Sensor 00*	Sensor 01*	Sensor 02*	Sensor 03*	
1 25/08/2010	1	6	15	48	Atuador
2 02/09/2010	6	25	35	35	Atuador
3 04/09/2010	46	35	20	7	Engaste
4 08/09/2010	25	45	50	49	Atuador
5 09/09/2010	25	45	50	49	Atuador
6 10/09/2010	20	40	49	50	Atuador
7 10/09/2010	19	49	48	20	Meio
8 10/09/2010	48	31	28	5	Engaste
9 13/09/2010	28	40	48	50	Atuador
10 13/09/2010	49	41	37	16	Engaste
11 13/09/2010	50	45	30	10	Engaste
12 14/09/2010	30	48	50	48	Atuador
13 14/09/2010	50	50	30	11	Engaste

* valores de aceleração expressos em g (9,8 m/s²)

Com os valores da tabela 3.5 acima é possível converter os valores em dB/m para uma análise da perda de potência entre os sensores e verificar a atenuação ao longo da propagação do sinal.

Para isso foi retirado à média entre as razões dos sensores 01 e 02, para os casos onde os sinais de ruptura ocorreram mais próximos do sensor 01. Ou seja, os sinais oriundos do lado engastado da amostra geraram perturbações diferentes no sensor 01 que está mais próximo da fonte quando comparado com o sensor 02, por estar mais distante. Para entender a atenuação entre os sensores foi calculada (3.1) a média entre as relações dos sensores 01 e 02, transformado em dB e dividido por 2 metros para que o valor de atenuação seja expresso em dB/m, como indicado na Tabela 3.6 e na expressão 3.1 abaixo.

Tabela 3.6 – Atenuação da potência entre os sensor 01 e 02.

Valores S01/S02	3º Evento	35/20	1,750
	8º Evento	31/28	1,107
	10º Evento	41/37	1,108
	11º Evento	45/30	1,500
	13º Evento	50/30	1,667
média			1,426
dB/m			-1,542

$$N(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{1,426}{2m} \right) = -1,542 \text{ dB} / m \quad (3.1)$$

Com essa relação de perda do sinal de -1,542 dB/m é possível estimar a distância em que será possível registrar os eventos tendo como parâmetro essa taxa de atenuação. Estipula-se que em 10 metros com 4 sensores separados por 2 metros de distância é possível registrar o sinal por todos os sensores. Quando o sensor mais próximo do evento registrar o sinal, o que se encontra a 10 metros de distância identificará uma amplitude já muito atenuada. A expressão 3.2, indica uma perda de -15,420 dB ao longo dos 10 metros de distância, com isso, o sinal registrado pelo sensor mais distante será de 3,24g ($50\text{g}/-15,420 = 3,24\text{g}$).

$$10 \text{ m} \times \frac{-1,542 \text{ dB}}{\text{m}} = -15,420 \text{ dB} \rightarrow \frac{50\text{g}}{15,420} = 3,24 \text{ g} \quad (3.2)$$

A distância de 10 metros é o limite de propagação do sinal que poderá ser registrado pelo sensor.

O sistema de vibração proposto tem como objetivo monitorar a região do duto flexível perto da conexão com a plataforma, pois é o local preferencial para a ocorrência de falha na armadura de tração. Para cobrir essa região que em média apresenta 20 metros de altura seriam necessários 8 sensores espaçados por 2 metros de distância para atender toda região da conexão de topo sem que aja perda de registro do sinal de ruptura. A Figura 3.38 ilustra uma instalação em campo onde ocorrem dois eventos indicados pelos pontos 1 e 2 nas extremidades do sistema de monitoramento.

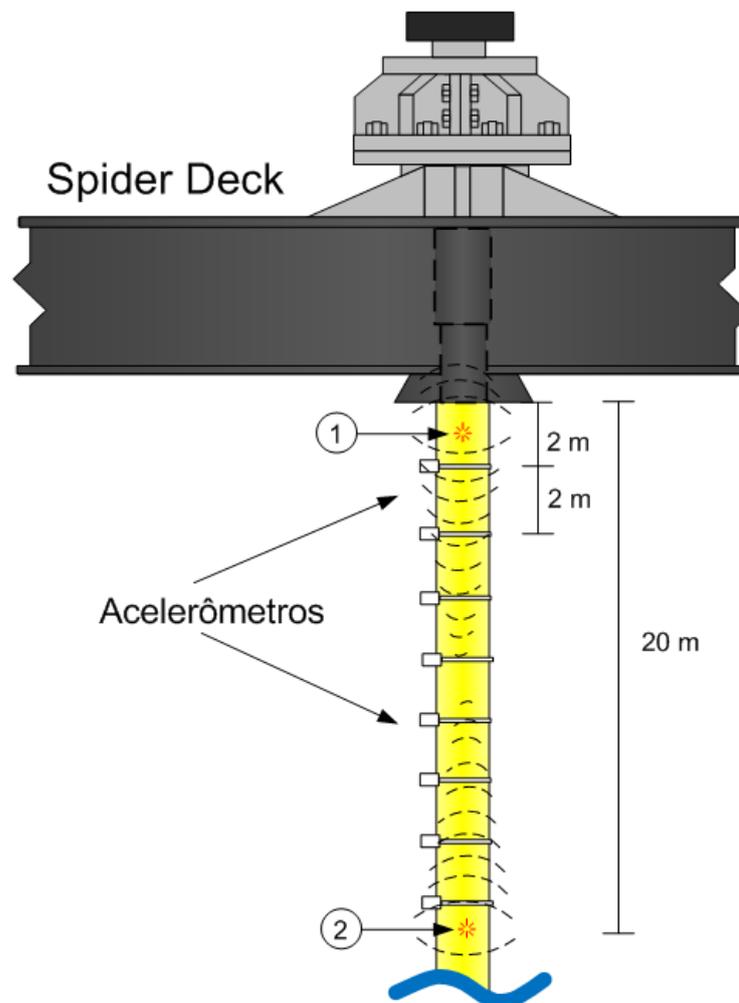


Figura 3.38-Esquemático de propagação do sinal em campo.

Ainda utilizando os dados da Tabela 3.5, obtém-se o gráfico da Figura 3.39 dos eventos em função do tempo (dias), onde é possível notar-se a maior concentração de rupturas na parte final do teste.

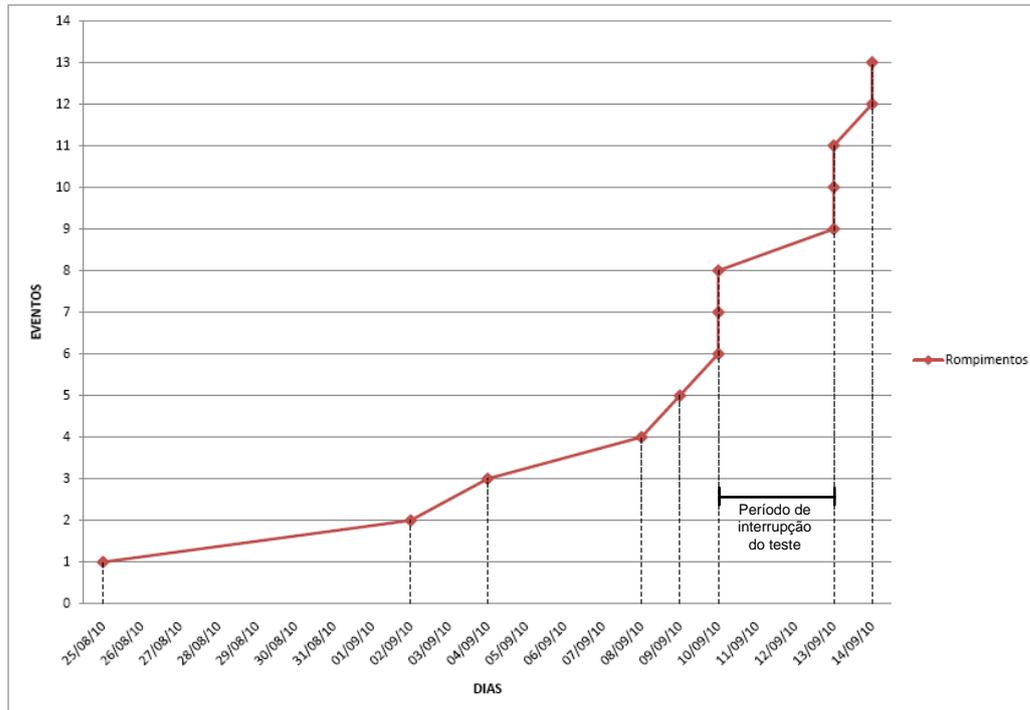


Figura 3.39-Rupturas dos arames no tempo.

Mesmo com alguns problemas operacionais o monitoramento foi considerado bastante positivo. Os maiores problemas estavam relacionados à interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Após o oitavo evento houve uma paralisação por falta de energia elétrica fazendo com que o teste só fosse reiniciado dois dias depois. Uma falha de comunicação não permitiu reprogramar os sistemas de aquisição de dados ópticos a tempo, e por conta disto, no dia 13/09/2010, os eventos 9 e 10 não foram registrados pelos sensores ópticos. Depois de contornado este problema todos os sistemas de monitoramento passaram a detectar normalmente os eventos.

A Tabela 3.7 detalha o momento em que os eventos ocorreram e a intensidade da resposta dos sensores, tanto ópticos quanto de vibrações. Uma escala de cor que vai do vermelho (forte) até o azul (fraco) foi utilizada para facilitar a visualização. Alguns sensores ópticos, no momento da ruptura, não detectaram o sinal e foram classificados com a sigla N.D. (Não Detectado). Isto

ocorreu em alguns eventos, pois os sensores ópticos dependem de deformações na camada polimérica, que normalmente apresenta valores significativos nas regiões próximas ao rompimento.

Tabela 3.7-Registro dos eventos

Número do evento	Data / Hora	Técnicas que detectaram o evento	Detecção dos sensores ópticos				Detecção dos sensores de vibração				Local de rompimento do arame
			Canal 01	Canal 02	Canal 03	Canal 04	Sensor 00	Sensor 01	Sensor 02	Sensor 03	
1º	25/08/2010 03h:51min	Óptica/Vibração	Fraco	N.D.	Fraco	Forte	Fraco	Fraco	Médio	Forte	Atuador
2º	02/09/2010 05h:07min	Óptica/Vibração	N.D.	N.D.	N.D.	Forte	Fraco	Médio	Forte	Forte	Atuador
3º	04/09/2010 20h:30min	Óptica/Vibração	Forte	Médio	N.D.	Fraco	Forte	Médio	Médio	Fraco	Engaste
4º	08/09/2010 17h:08min	Óptica/Vibração	N.D.	N.D.	Forte	Forte	Médio	Forte	Forte	Forte	Atuador
5º	09/09/2010 23h:52min	Óptica/Vibração	Fraco	Forte	Forte	Forte	Médio	Forte	Forte	Forte	Atuador
6º	10/09/2010 04h:45min	Óptica/Vibração	Fraco	Fraco	Forte	Forte	Médio	Forte	Forte	Forte	Atuador
7º	10/09/2010 09h:03min	Óptica/Vibração	Médio	Forte	Forte	N.D.	Médio	Forte	Forte	Médio	Meio
8º	10/09/2010 14h:50min	Óptica/Vibração	Forte	N.D.	Forte	N.D.	Forte	Forte	Médio	Fraco	Engaste
9º	13/09/2010 13h:32min	Vibração *	-	-	-	-	Médio	Forte	Forte	Forte	Atuador
10º	13/09/2010 14h:30min	Vibração *	-	-	-	-	Forte	Médio	Médio	Fraco	Engaste
11º	13/09/2010 17h:15min	Óptica/Vibração	Forte	Forte	Forte	N.D.	Forte	Forte	Médio	Fraco	Engaste
12º	14/09/2010 17h:02min	Óptica/Vibração	Médio	Médio	Forte	Forte	Médio	Forte	Forte	Forte	Atuador
13º	14/09/2010 09h:27min	Óptica/Vibração	Forte	Forte	N.D.	N.D.	Forte	Forte	Médio	Fraco	Engaste

Com os dados da dissecação foram confirmadas as 13 rupturas e o local das falhas previamente indicadas. Dessas falhas, verificou-se que 8 rompimentos ocorreram na camada externa da armadura de pressão e 5 rompimentos foram provenientes da camada interna. Com esses resultados, foi feita uma reanálise dos dados para identificar algum indicativo no sinal que poderia relacionar o registro de falha com a armadura interna ou externa. Mas em ambas as técnicas não foram possíveis encontrar indicativos dessa relação.

4 Conclusões

Na presente dissertação foi estudado um método de monitoramento indireto baseado no princípio físico de vibração para identificar o momento da ruptura de arames da armadura de tração de *risers* flexíveis. Foi desenvolvido um sistema capaz de detectar a vibração induzida durante essa falha. Os resultados obtidos mostraram uma grande potencialidade do emprego de técnicas baseadas em vibração para monitorar o rompimento dos arames das camadas da armadura de tração de uma linha flexível. A partir dos testes e dados obtidos é possível um bom entendimento do comportamento do sinal no instante da ruptura do arame, e principalmente, foi verificado que os sensores e o sistema de aquisição utilizado são adequados e bem dimensionados para o tipo de sinal encontrado durante a falha da armadura de tração.

Durante a execução dos testes e evolução da pesquisa, foram realizadas diversas melhorias nos procedimentos de ensaio, seleção de sensores e ajustes no equipamento de medição. Com os resultados obtidos, pode-se comprovar que o sistema de medição garante boa confiabilidade na detecção do sinal de ruptura.

No primeiro teste na COPPE, os sensores foram posicionados em seções circulares ao longo do perímetro do *riser*, com o objetivo de analisar a resposta de cada sensor ao longo da seção circular. No decorrer do ensaio da amostra, com alguns dados de ruptura já adquiridos e analisados, foi visto que a resposta vibratória à ruptura em uma seção transversal da amostra é bastante regular ao longo da circunferência, independentemente da posição radial onde ocorre a falha. A partir de então, nos ensaios seguintes os acelerômetros passaram a ser posicionados ao longo da direção axial da amostra de tubo flexível sob teste, garantindo que o sinal de ruptura fosse bem registrado dessa forma.

Verificou-se também que o rompimento produz sinais de vibração que se propagam pela estrutura do *riser*, inclusive através da capa plástica. Notou-se que os sinais de aceleração do rompimento dos arames podem ser bem representados com taxas de aquisição na ordem de 10 kHz. Contudo, o sistema utilizado nesse

primeiro teste adquiria os sinais de forma contínua, gerando uma quantidade muito grande de dados, o que para uma operação em campo é inviável. Foi desenvolvido então um equipamento de operação remota via rede, dedicado, com capacidade de registrar eventos quando um valor mínimo de vibração for ultrapassado. Este sistema nos seus componentes de *Hardware* e *Software* foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção (CPTI - PUC-Rio). Durante a pesquisa dessa dissertação, teve-se como foco a verificação quanto ao desempenho e confiabilidade, bem como no auxílio das especificações do sistema.

Ao contrário do que ocorrera no primeiro teste no LTS-COPPE, nos três ensaios seguintes realizados nas instalações do LAMEF-UFRGS, as amplitudes de resposta dos acelerômetros associadas a rupturas dos arames atingiram valores superiores dos que haviam sido registrados no primeiro teste. Isso se deve a diferença da amostra utilizada em cada teste e a carga de tração aplicada. Nos ensaios no LAMEF, os arames da armadura de tração apresentavam uma seção transversal 60% maior e um carregamento mais alto. Explicando assim, as diferenças das amplitudes dos sinais gerados.

Diferentes seções transversais dos arames da armadura de tração podem influenciar na amplitude do sinal. Arames com seções muito pequenas podem dificultar a aquisição do sinal de ruptura, pois sua amplitude pode ser muito baixa.

Mesmo com amplitudes diferentes os sinais apresentavam espectros semelhantes e as análises no domínio da frequência apresentaram assinaturas de sinal parecidas.

Não foram identificadas significativas alterações nas respostas dos sensores instalados sob os revestimentos duplos na capa polimérica, a possível atenuação do sinal não gerou uma resposta significativa nos acelerômetros durante os eventos de ruptura. Em estudo de atenuação verificou-se que para a monitoração de 20 metros de trecho de linha flexível deverão ser instalados oito acelerômetros separados por 2 metros de distância, atendendo assim, a região crítica de falha presente no *riser*.

O mecanismo de falha também está diretamente relacionado com a amplitude de resposta do transiente de ruptura. Falhas geradas por trincas e fadiga geram uma ruptura forte, boa para o sistema de aquisição, enquanto falhas de corrosão, onde se perde muito material na seção transversal, podem gerar sinais de

baixa amplitude durante a falha, podendo assim, dificultar a identificação do sinal de rompimento.

A análise no domínio da frequência concluiu que o sinal detectado pelos acelerômetros seria um *aliasing* da resposta “natural” do acelerômetro, uma vez que estamos amostrando o sinal com uma taxa de 10 kHz, onde os acelerômetros possuem frequências naturais próximas a 20 kHz e os sinais de ruptura medidos apresentam frequências na faixa de 1,5 kHz.

Os sensores instalados nos conectores identificam o sinal de ruptura com altas amplitudes, sendo portanto uma região preferencial para o posicionamento dos sensores.

Nos testes sob o regime de ensaio fadiga e corrosão, o sinal de ruptura característico não sofreu grandes alterações em seu espectro.

O sistema desenvolvido foi capaz de indicar com acerto de 100% as rupturas e o local onde as falhas ocorreram. Tanto o número de arames partidos quanto a posição das rupturas indicadas pelo sistema foram comprovadas após a dissecação da amostra testada. Apesar de não ser possível discriminar em qual camada da armadura de tração ocorreu a falha, o sistema se mostrou bem sensível a identificação das rupturas em ambas as camadas das armaduras. A fim de entender melhor o sinal da ruptura interna, os dados foram revistos. Porém, devido à similaridade entre os sinais de falha, não foi possível discriminar se a ruptura é proveniente da camada externa da armadura de tração ou da interna.

Com análise no domínio do tempo de cada sensor e a quantificação da amplitude, é possível identificar o local em que ocorre a falha.

O uso do sistema de vibrações em conjunto com o colar de fibras ópticas 3D se mostrou muito eficiente. Os sensores ópticos mostraram-se capazes de identificar todas as rupturas, no mesmo momento em que o sistema de vibração as detectava. Cabe chamar a atenção para o fato de que o sistema óptico é uma técnica de monitoramento baseada em estado, oferecendo continuamente e em tempo real, medidas de deformação em pontos da capa do *riser*. A utilização do sensoriamento óptico em conjunto com a técnica de medição de vibrações proposta neste trabalho, agrega uma maior confiabilidade ao sistema de monitoramento como um todo, ao combinar dois métodos indiretos baseados em estado e detecção de eventos. O uso do colar de fibras ópticas foi restrito ao último ensaio, não tendo sido o foco desta pesquisa.

4.1. Trabalhos Futuros

Para o futuro estão previstas instalações em campo do sistema onde serão identificados os tipos de ruídos inerentes de uma unidade de produção *offshore* que poderiam afetar a confiabilidade do sistema. A partir dos resultados que serão obtidos em campo, novos filtros e valores para o *trigger* de vibração serão estudados e desenvolvidos buscando reduzir a probabilidade de ocorrência de falsos alarmes.

Como continuidade deste trabalho, propõe-se o estudo de *risers* que apresentam mais de duas camadas de armadura de tração e uma análise mais aprofundada sobre os sinais oriundos de rupturas das camadas mais internas.

Um desenvolvimento de uma braçadeira metálica que contenha um sistema híbrido de medição onde esteja o acelerômetro e o colar óptico é um protótipo que está em desenvolvimento para aplicação e qualificação nos seguintes testes.

Além disso, o desenvolvimento de um novo sistema baseado em sensores sem fio (*wireless*), cuja facilidade de instalação e operação, particularmente no que tange à redução do cabeamento, são atrativos para aplicações em unidades marítimas de produção.

Por fim, com a finalidade de atender a demanda por sistemas de monitoramento em *risers* em que a terminação de topo encontra-se submersa, sugere-se que a técnica de monitoramento por vibração aqui proposta seja adaptada para operar sob a lâmina d'água.

5 Referência Bibliográfica

- [1]. Agencia Nacional de Petróleo , Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, “Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis” 2011.
- [2]. Hill, T., Zhang, Y., and Kolanski, T., “The future for flexible pipe *riser* technology in deepwater: Case study”, in 2006 Offshore Technology Conference, 17768, 2006.
- [3]. Simões, T. B., Braga, A. M. B., Morikawa, S. K, de, “Monitoramento de *risers* flexíveis com sensores a fibra óptica”, Tese de Mestrado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [4]. Marinho, M. G., Santos, J. M. dos, and Carneval, R. O., “Integrity Assessment and Repair Techniques of Flexible *Risers*”, 25th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, Hamburg, Germany, paper OMAE2006-92467.
- [5]. Out, J. M. M., Kronemeijer, D. A., Van de Loo, P. J., and Sterke, A. de, “*The integrity of flexible pipe: search for an inspection strategy.*” Engineering Structures, Vol 17, N°4, pp. 305-314, 1995. Copyright © 1995 Elsevier Science Ltd.
- [6]. Geraldo Spinelli Ribeiro, Curso ministrado na PUC-Rio “Sistema de Produção Offshore”, Equipamentos Submarinos IBP.
- [7]. Bryant, M.J., “Umbilical Failure – Mechanisms and Avoidance,” Subsea Control and Data Acquisition, Vol. 22, pp. 177-193, 1990.
- [8]. Freire, J. L. F, Dolinski, A, “Engenharia de Dutos”, Cap 17-Projeto de Dutos Flexíveis Para Aplicação Submairna.

- [9]. Lemos, C. A. D. de, “Análise de Fadiga em *Risers* Flexíveis”, Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [10]. Martins, C. O. D., “Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de *Risers* Flexíveis Através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensão”, Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [11]. Jacques, R.C., Flores, J.V., Strohaecker, T.R., and Reguly, A., “Acoustic emission testing in wires from the tensile armor of flexible *risers* under load,” *Insight* (Northampton), v. 51, p. 504-507, 511, 2009.
- [12]. Ribeiro, G. S., “Curso Gestão nos negócios de exploração e produção e gás.” IBP Nov/2008.
- [13]. Camerini, C. S., Costa, L. C. S., Rodrigues, J. M. and Silva, J. A. P., “Monitoring Device for Underwater Flexible *Riser*”, PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS, BR PI0601923-4, Brazil (in Portuguese).
- [14]. Morikawa, S.R.K., Camerini, C.S., et al, ‘Monitoring of Flexible Oil Lines Using FBG Sensors’, 19th International Optical Fiber Sensors Conference, Perth-Australia, April 2008.
- [15]. Soares, S.D., Camerini, C.S., and Santos, J.M.C., “Development of Flexible *Risers* Monitoring Methodology Using Acoustic Emission Technology,” paper OTC 19863 presented at the 2009 Offshore Technology Conference, Houston, 2009.
- [16]. Smith, R., “*Advance in Real-Time Flexible Riser Monitoring*” Scandinavian Oil and Gas Magazine Nº 11/12, 2009.
- [17]. Leroy, J. M., Perdriet, and T., Corre, V. Le, “Stress Assessment in Armour Layers of Flexible *Risers*” paper OMAE 20932 presented at the 2010, Shanghai, China, 2010.

- [18]. Marinho, M.G., Camerini, C. S., Santos, J. M. dos, and Pires, G. P., “Surface Monitoring Techniques for a Continuous *Riser* Integrity Assessment,” paper OTC 18946 presented at the 2007 Offshore Technology Conference, Houston, 2007.
- [19]. Merino, H. E. M., Sousa, J. R. M. de, Magluta, C., and Roitman, N., “Na Experimental and Numerical Study on the Axial Compression Response of Flexible Pipes” paper OMAE 208856 presented at the 2010, Shanghai, China, 2010.
- [20]. Langer, R. A. D., Freitas, M., Camerini, S. C., Emmendoerfer, G. de, “Desenvolvimento de um veículo autônomo para inspeção profundas utilizando LabVIEW e NI-CVS”, NI Case-Study.
- [21]. Steinkjer, O., Sødahl, N., and Grytøyr, G., “Methodology for Time Domain Fatigue Life Assessment of *Risers* and Umbilicals” paper OMAE 20119 presented at the 2010, Shanghai, China, 2010.
- [22]. HSE - OTO 98019: “Guidelines for Integrity Monitoring of Unbonded Flexible Pipe,” 1998.
- [23]. Out, J. M. M., Kronemeijer, D. A., van de Loo, P.J., and de Sterke, A., “The Integrity of Flexible Pipe: Search for an Inspection Strategy,” *Engineering Structures.*, Vol. 17, No. 4, pp. 305-314, 1995.
- [24]. Chezhian, M., Mørk, K., Meling, T.S., Makrygiannis, C., and Lespinasse, P., “NDP Review of State-of-the-Art *Riser* Monitoring: Lessons Learned and Experiences Gained,” paper OTC 17810 presented at the 2006 Offshore Technology Conference, Houston, 2006.
- [25]. Leroy, J. M., Perdrizet, and T., Corre, V. Le, “Stress Assessment in Armour Layers of Flexible *Risers*” paper OMAE 20932 presented at the 2010, Shanghai, China, 2010.
- [26]. Merino, H. E. M., Sousa, J. R. M. de, Magluta, C., and Roitman, N., “Numerical and Experimental Study of a Flexible Pipe Under Torsion” paper OMAE 20902 presented at the 2010, Shanghai, China, 2010.

- [27]. Merino, H. E. M., Sousa, J. R. M. de, Magluta, C., and Roitman, N., “Na Experimental and Numerical Study on the Axial Compression Response of Flexible Pipes” paper OMAE 208856 presented at the 2010, Shanghai, China, 2010.
- [28]. Marinho, M.G., Camerini, C. S., Santos, J. M. dos, and Pires, G. P., “Surface Monitoring Techniques for a Continuous *Riser* Integrity Assessment,” paper OTC 18946 presented at the 2007 Offshore Technology Conference, Houston, 2007.
- [29]. McCarthy, J.C. and Buttle, D.J., ‘Non-Invasive Magnetic Inspection of Flexible *Riser*’, paper OTC 20004 presented at the 2009 Offshore Technology Conference, Houston, 2009.
- [30]. Corrigan, H., Ramos, R.T., Smith, R.J., Kimminau, S., and El Hares, L., “New Monitoring Technology for Detection of Flexible Armor Wire Failure,” paper OTC 20121 presented at the 2009 Offshore Technology Conference, Houston, 2009.
- [31]. Weppenaar, N., and Kristiansen, M., “Present and Future Possibilities of Optical Condition Monitoring of Flexible Pipes,” paper OTC 19427 presented at the 2009 Offshore Technology Conference, Houston, 2009.
- [32]. Guaita, P., “Development of a New Fiber-Optic-Based Offshore Structural Monitoring System,” paper SPE 56435 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October 1999, Houston, Texas, 1999.
- [33]. Braga, A. M. B., Valente, L. C. G., Llerena, R. W. A., and Regazzi, R. D., “Optical Fiber Sensing Technology in the Pipeline Industry”, Rio Pipeline Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- [34]. Hill, O., and Meltz, G., “Fiber *Bragg* Grating Technology Fundamentals and Overview,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, pp. 1263-1276, 1997.

- [35]. Morikawa, S. R. K., Camerini, C. S., Braga, A. M. B., and Llerena, R. W. A., “Real time continuous structural integrity monitoring of flexible *risers* with optical fiber sensors” paper OTC 20863 presented at the 2010 Offshore Technology Conference, Houston, 2010.
- [36]. *Class Instrumentation Ltd Ultrasonic Sound Velocity Table, website www.classltd.com*