

3 Testes e resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os testes realizados com os sistemas de monitoramento desenvolvidos. Cada um dos ensaios possui uma característica distinta e nem sempre foram utilizadas as mesmas técnicas de monitoramento. Muitos dos testes foram realizados utilizando, além dos sensores ópticos, equipamentos de monitoramento de outras empresas e universidades, com outras tecnologias embarcadas. Isto permitiu gerar uma base de dados que facilitou certificar a ocorrência de eventuais rupturas de arames.

Todos os experimentos tiveram como objetivo detectar a falha dos arames nas armaduras de tração de dutos flexíveis. Para isso diversas amostras de *risers* foram posicionadas em máquinas de tração e submetidas a ciclos de carregamento. Em alguns testes o rompimento do arame foi forçado através da introdução de concentradores de tensão (entalhes) e em outros a amostra foi sujeita a um processo de aceleração da corrosão dos arames.

3.1. Teste 1 – Colar Óptico em Campo

No primeiro teste de campo utilizou-se apenas o monitoramento óptico indireto por meio de um colar instrumentado, descrito na seção 4.1. Após dois testes em laboratório que não apresentaram resultados conclusivos, foi realizada uma instalação deste sistema em uma plataforma de produção da Petrobras que opera na Bacia de Campos. Este teste de campo foi acompanhado por uma equipe de engenheiros do CENPES – Petrobras e por uma equipe de engenheiros da PUC-Rio. O sistema permaneceu operacional por um período de testes de três meses até ser retirado. Os dados foram armazenados em um computador e posteriormente tratados para gerar resultados utilizando um software de análise.

O *riser* utilizado no teste já operava por muitos anos de forma que não havia registros sobre sua estrutura interna. Existia apenas um documento de inspeção visual que estimava o número de arames na camada externa. Foram

anotados 70 arames, com um ângulo de hélice de 35 graus. O diâmetro externo medido do duto foi de 278 mm.

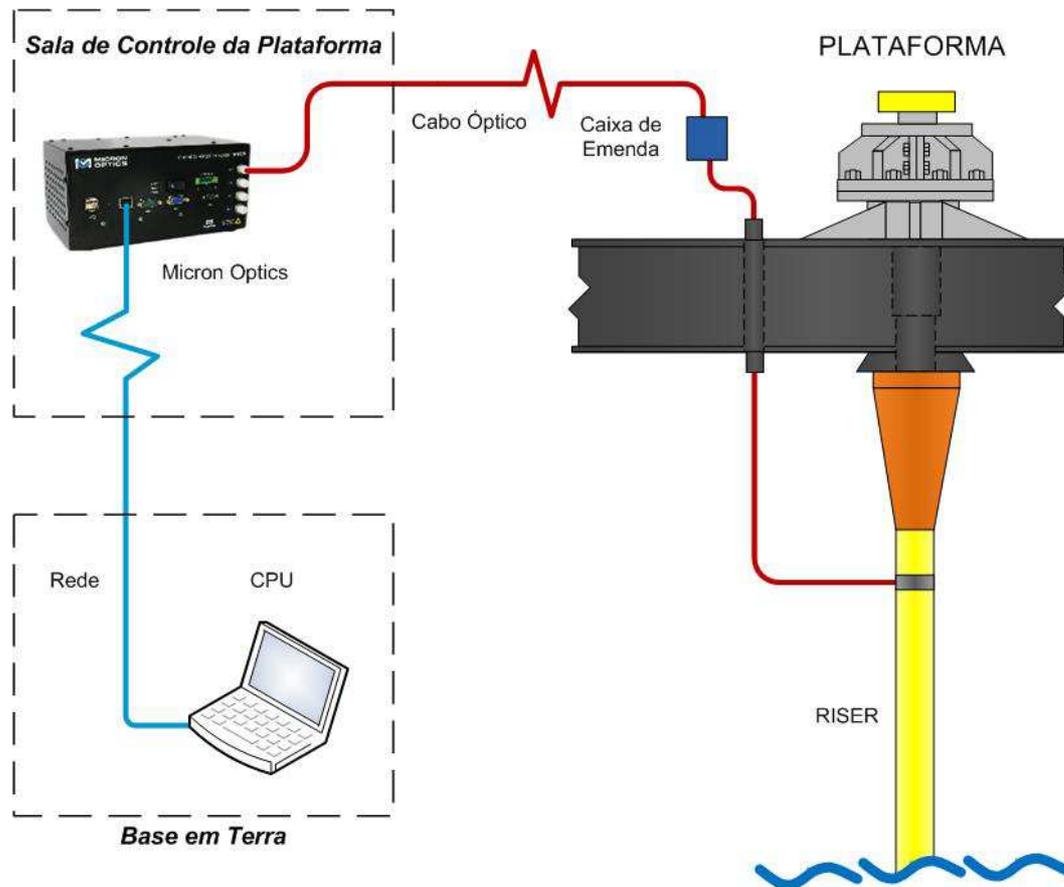


Figura 3. 1 - Fluxograma de instalação do Colar Óptico na Plataforma.

A Figura 3.1 representa o fluxograma de instalação do Colar Óptico na plataforma. O Colar Óptico foi posicionado logo abaixo do conector. Um cabo óptico foi utilizado pra transmitir sinais dos sensores até o equipamento de interrogação posicionado na sala de controle da plataforma. Como esta distância era longa, para facilitar a passagem do cabo na plataforma, foram utilizadas duas seções de cabos unidos por meio de uma emenda óptica, protegida em uma caixa de emenda. A leitura do equipamento junto com o tratamento de sinal foi feito em terra, no centro de pesquisa da Petrobras (CENPES), por meio de transmissão de dados pela rede interna de empresa.

Na Figura 3.2 observam-se os dois colares instalados no *riser*, na região próxima ao conector. Os sensores ópticos colados na lamina metálica do colar foram protegidos com uma fita adesiva de poliimida (Fita Kapton[®]) que apresenta bons resultados quando submetida a ambientes agressivos com altas temperaturas.



Figura 3. 2 - Colar instalado no *riser*.

Assim como nos ensaios de laboratório, o tempo em que este equipamento ficou instalado monitorando o comportamento do *riser* não foi o suficiente para registrar nenhuma variação significativa no diâmetro externo. Concluindo-se assim que durante este período de tempo não ocorreu nenhuma ruptura de arame. O sistema ficou instalado por três meses, tendo sido retirado quando o trecho do duto flexível foi reterminado. Após a dissecação da amostra retirada verificou-se que de fato não havia ocorrido nenhum rompimento de arame.

Ao analisar a curva de produção do *riser*, notou-se que a curva de variação do diâmetro está em sintonia com o histórico de pressão no duto. A Figura 3.3 apresenta o gráfico de resposta dos colares ópticos com relação ao tempo. Na imagem nota-se a curva de pressão de operação do duto. Os picos de pressão são sentidos pelos sensores instalados. Outro aspecto importante é a análise da oscilação de período maior, presente neste mesmo gráfico. Isto ocorre devido ao período de variação da maré, que altera a distribuição de cargas na estrutura do *riser*. Estes resultados indicam que o cruzamento dos sinais do sistema de monitoramento com os de operação da plataforma pode ser uma estratégia eficiente para detectar a ocorrência de defeitos nos sensores ópticos.

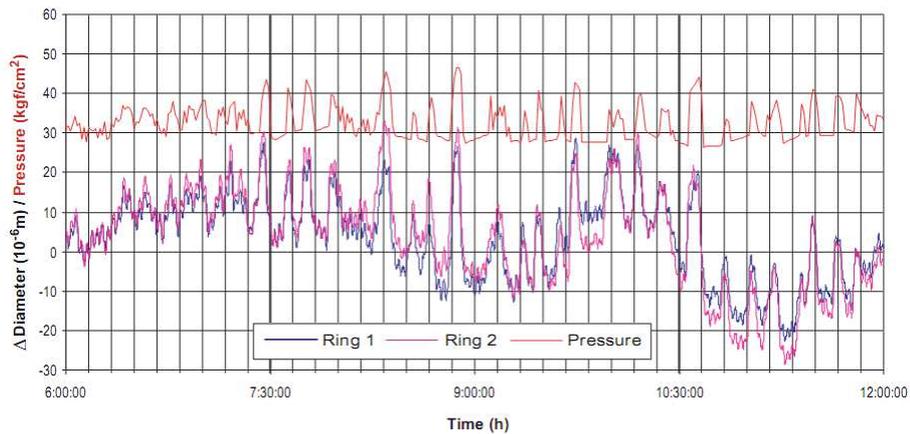


Figura 3. 3 - Gráfico do comportamento do colar óptico acompanhando a curva de pressão interna no riser.

3.2. Teste 2 - LTS

O Teste 2 foi realizado no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) na COPPE/UFRJ. Foi utilizada uma seção de riser de seis polegadas de diâmetro interno, com 73 e 71 arames nas camadas externa e interna, respectivamente. Esta amostra havia sido retirada do campo onde operou por vários anos; com isso apresentava uma significativa oxidação na camada de arames externa.

Para produzir o carregamento trativo sobre a amostra de duto, foi utilizada uma máquina de tração com capacidade máxima de 1.000 kN, limitada pela faixa de operação da sua célula de carga, Figura 3.4. Em alguns arames da camada de tração foram criados concentradores de tensão artificiais na forma de entalhes para acelerar o processo de ruptura.



Figura 3. 4 - Máquina de tração utilizada no teste da COPPE/UFRJ.

Posteriormente foram retirados dois pedaços da capa polimérica de aproximadamente 200 mm de comprimento e a 2 m de distância do conector,

visando assim obter um acesso a todos os arames da armadura externa de tração do *riser* e instalar o *MODA*. Como todos os arames estavam em um estado avançado de corrosão, antes da instrumentação com os sensores ópticos, teve que ser realizado um trabalho de preparação da área de colagem. Os arames tiveram sua superfície preparada para a colagem, com a remoção de vestígios de oxidação e contaminantes (graxa, óleo e outros). Cada um dos arames foi instrumentado com uma rede de Bragg medindo deformação transversal, que representa aproximadamente 30% da deformação longitudinal. Os sensores a rede de Bragg foram inscritos ao longo de quatro diferentes fibras: duas fibras com 18 sensores e as outras duas com 19, totalizando 73 redes para medir deformação e uma para fazer a compensação da temperatura. As redes foram gravadas em uma fibra fotosensível de baixa atenuação. Os sensores foram colados na superfície dos arames com um adesivo a base de cianoacrilato e posteriormente protegidos com uma resina de silicone, como mostra a Figura 3.5.



Figura 3. 5 - Primeira configuração do monitoramento direto.



Figura 3. 6 - Amostra com o reparo após a instrumentação.

Depois de todos os arames instrumentados foi realizado o reparo da capa polimérica de acordo com o procedimento recomendado pela PETROBRAS. Neste teste utilizou-se duas camadas de fita anti-corrosiva sobre os arames expostos, como mostra a Figura 3.6.

O procedimento de teste consistiu em fornecer uma pré-carga de tração à amostra e criar um entalhe em determinados arames. Posteriormente o *riser* foi submetido a um ciclo de carregamento até ocorrerem os rompimentos. O monitoramento foi contínuo durante todo o teste e teve como objetivo principal definir o momento exato onde ocorreram falhas nos arames. Inicialmente se esperava detectar a ruptura através de alterações no sinal de deformação do arame rompido. Entretanto, logo após a primeira ruptura nenhuma alteração no sinal de deformação foi notada. Em seguida o carregamento foi interrompido.

Somente depois de alguns ciclos no reinício do teste que começou a ser perceptível o comportamento do sinal de deformação do arame rompido.

O fato de não ter detectado imediatamente a falha do arame possivelmente ocorreu devido ao estado de corrosão que se encontravam os arames. O atrito entre os arames pode ser considerado um fator relevante neste caso. Dados experimentais presentes na literatura indicam valores de 0,1 para o coeficiente de atrito entre arames de um *riser* novo [33]. Assim, com o estado de corrosão desta amostra, provavelmente os valores do coeficiente são muito acima do valor encontrado na literatura.

Na maioria dos casos a detecção das rupturas ocorreu depois que a amostra foi submetida a carregamentos cíclicos e o arame rompido venceu o alto atrito provocado pela corrosão e começou a deslizar em relação aos arames íntegros. Ao final do teste haviam sido rompidos um total de 30 arames, sendo 3 deles pertencentes a camada interna da armadura de tração. Os resultados de dois momentos do monitoramento do teste são apresentados nas Figuras 3.7 e 4.8. A Figura 3.7 mostra o momento que foi possível identificar o primeiro arame rompido, que estava livre e não mais respondia aos carregamentos cíclicos. A Figura 3.8 apresenta o sinal de deformação durante o carregamento com quatro arames rompidos. Fica evidente pelos resultados que os arames rompidos não acompanham o comportamento mecânico dos arames íntegros, permanecendo com baixas deformações durante os carregamentos cíclicos.

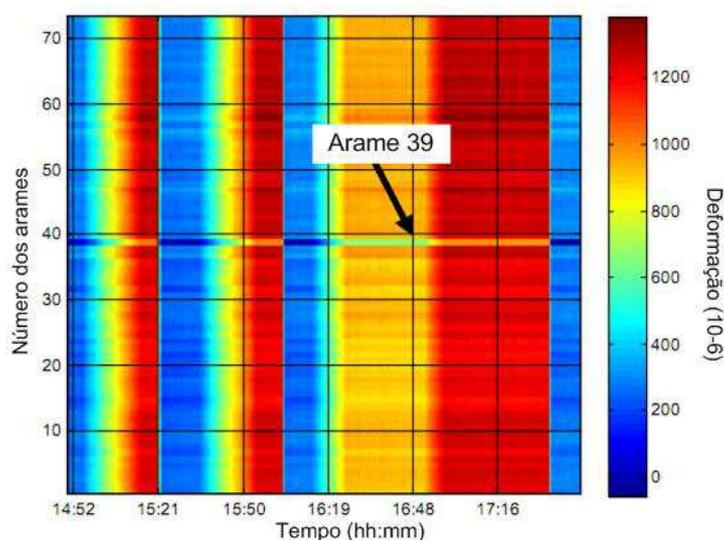


Figura 3. 7 - Momento em que o arame 39 passa a ter um comportamento diferente dos demais.

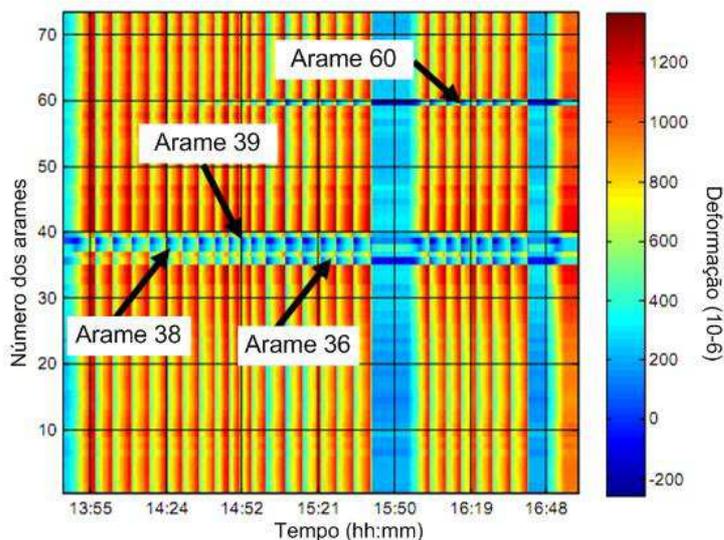


Figura 3. 8 - Momento em que quatro arames forma rompido no teste.

3.3. Teste 3 - LTS- 2

O segundo teste, ocorrido apresentou características semelhantes ao primeiro. A amostra utilizada era do mesmo tipo da utilizada no teste anterior, com 71 e 73 arames nas camadas interna e externa, respectivamente e 30° de ângulo de hélice. Este *riser* também havia sido utilizado em campo, desta forma apresentava corrosão nas camadas metálicas, porém o estado dos arames não se encontrava tão comprometido quanto na amostra utilizada no teste anterior. O corpo de prova foi tracionado pela mesma máquina de tração do primeiro teste. Os carregamentos chegaram a níveis próximos de 100 toneladas de tração.

Porém, neste teste, o acesso aos arames de deu de forma diferente. No ensaio anterior, uma seção circular da capa polimérica foi arrancada para a colagem das fibras ópticas. Este é um método ruim de abertura da capa, pois compromete toda uma seção circunferencial da amostra. Chegou-se então a conclusão que a abertura da capa deveria ser feita de modo que parte da área da seção transversal da capa se mantivesse íntegra. Com isso foi realizado um estudo em um software de modelagem 3D, onde foi elaborado o modelo do *riser* em questão. Foram dimensionadas quatro janelas de corte, distribuídas simetricamente em uma seção do *riser*, de modo que todos os arames da armadura externa de tração ficassem expostos.

A Figura 3.9 mostra uma das janelas já com os sensores instalados. Foi realizado todo o procedimento padrão para a colagem das redes, já descrito neste trabalho. Em todos os 73 arames foram colados redes de Bragg,

posicionadas no sentido longitudinal do arame. As dimensões das janelas foram projetadas de forma que em cada uma delas ficassem expostos aproximadamente 19 arames aptos a receber a colagem dos sensores. Na primeira e na segunda janela foram utilizadas 20 redes em cada, sendo 19 para medir deformação e uma para medir temperatura. Na terceira janela foram colados 17 sensores sobre os arames. Nesta janela não havia monitoramento de temperatura. A correção dos valores pôde ser feita utilizando os valores de temperatura de qualquer uma das outras três janelas, pois se admitiu que não haveria um gradiente de temperatura nesta região. Na última janela havia 18 sensores de deformação e uma rede medindo temperatura.



Figura 3. 9 - Janela de instrumentação aberta no *riser* de teste.

O teste consistiu em fazer entalhes nos arames e submeter o *riser* a ciclos de carregamentos, esperando assim o momento da ruptura. Uma parte da capa polimérica, de aproximadamente 30 mm, foi retirada junto ao conector de engaste para realizar os cortes e entalhes nos arames. As incisões foram feitas com uma ferramenta tipo esmerilhadeira. Um exemplo de entalhe pode ser visto na Figura 3.10. Nota-se a significativa redução na espessura do arame neste ponto. Para facilitar a identificação dos sinais de ruptura foi desenvolvida uma numeração dos arames. O teste foi acompanhado presencialmente e cada um dos eventos foi registrado em um relatório contendo o número do arame cortado e o momento do rompimento. As falhas nos arames foram acompanhadas em tempo real com o auxílio dos mapas de deformação do software Fibrax. Foram salvos arquivos contendo o valor da variação do comprimento de onda de cada sensor durante o ensaio. Depois, já no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio os dados foram analisados com o software Excel para a obtenção dos gráficos do carregamento com o sinal característico de uma ruptura.



Figura 3. 10 - Detalhe do tipo de entalhe realizado sobre os arames.

Durante o teste foram forçadas 12 rupturas de arames. Algumas vezes o corte do arame foi feito com a máquina de ensaio travada em um determinado patamar de carregamento. Em outros momentos foi feito um entalhe no arame para o mesmo romper durante o carregamento. A Tabela 3.1 apresenta de forma detalhada todos os rompimentos com suas respectivas características, observadas durante o decorrer do ensaio e presentes no relatório do teste. A Tabela 3.1 apresenta também a forma como foi executada a ruptura do arame. O corte do arame ocorreu com a amostra carregada e travada na carga de rompimento.

Tabela 3. 1 - Eventos ocorridos durante o teste.

Rompimento	Número do arame	Data	Hora	Forma da ruptura	Carga de rompimento
1º	25	31/10/07	10:30	Corte	0 ton
2º	26	31/10/07	11:19	Entalhe	91,6 ton
3º	71	31/10/07	15:45	Corte	20,8 ton
4º	24	31/10/07	15:45	Corte	20,8 ton
5º	10	01/11/07	16:11	Corte	80 ton
6º	11	05/11/07	12:37	Entalhe	80 ton
7º	71	05/11/07	13:11	Entalhe	62,4 ton
8º	70	05/11/07	15:14	Entalhe	99,12 ton
9º	30	05/11/07	16:51	Entalhe	92,7 ton
10º	29	05/11/07	17:30	Entalhe	92,2 ton
11º	28	05/11/07	18:02	Entalhe	90,6 ton
12º	27	05/11/07	20:04	Entalhe	67 ton

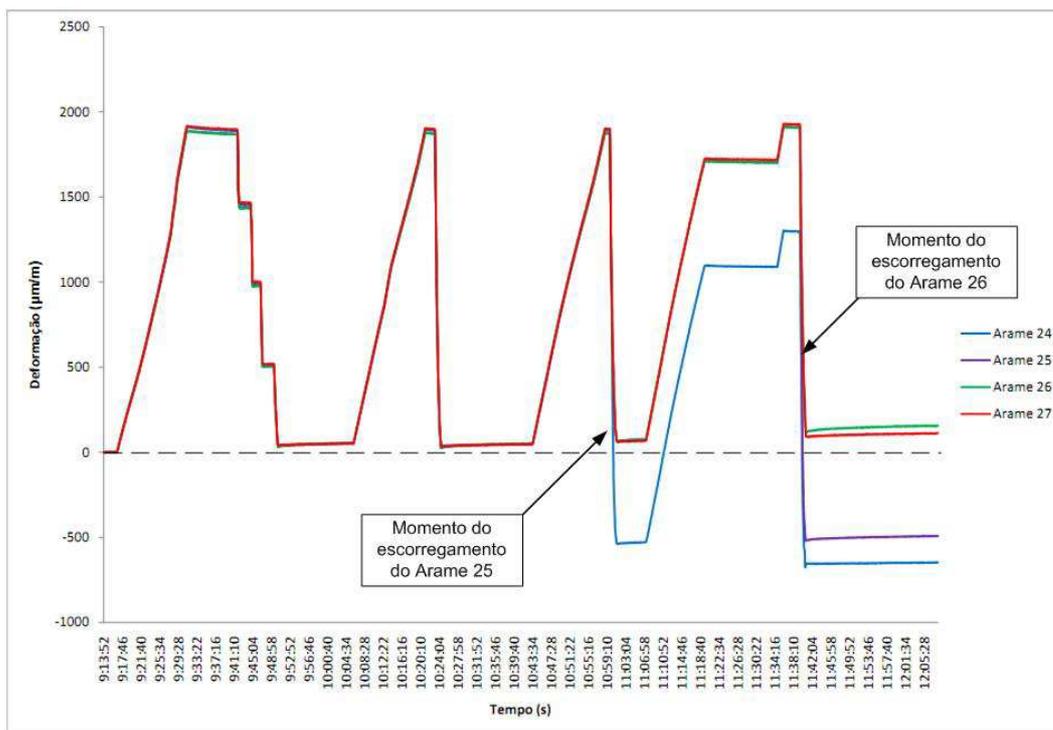


Figura 3. 11 - Gráfico do instante que o sensor do arame rompido passou a não responder ao carregamento.

A Figura 3.11 apresenta o gráfico contendo os dados obtidos na manhã do dia 31/10/2007. Para facilitar a visualização gráfica, foram traçadas apenas as curvas de quatro sensores. Estas redes de Bragg estavam posicionadas nos arames 24, 25, 26 e 27. Durante este período dois arames, 25 e 26, vieram a romper. Observado a Tabela 3.1 nota-se que o corte do arame 25 ocorreu às 10h:30min, momento que o sistema não estava carregado. Logo após a amostra foi tracionada e todos os arames, incluindo o arame rompido, apresentaram um carregamento uniforme atingindo um valor de deformação próximo de 2000 µm/m. O alívio de tensão no arame 25 só foi percebido por volta de 11h:00 min, quando o mesmo escorregou em relação aos demais. Este arame seguiu respondendo ao carregamento, porém com um nível de deformação (cerca de 600 µm/m) abaixo dos arames íntegros. O mesmo ocorreu no segundo rompimento exposto no gráfico.

A Figura 3.12 apresenta o mapa de deformação gerado, no mesmo dia 31/10/2007, pelo software Fibrax. O intervalo de tempo deste gráfico foi o mesmo do presente no gráfico da Figura 3.11. Notam-se os instantes que os arames rompidos (25 e 26) escorregaram e apresentam um nível de deformação menor que os demais.

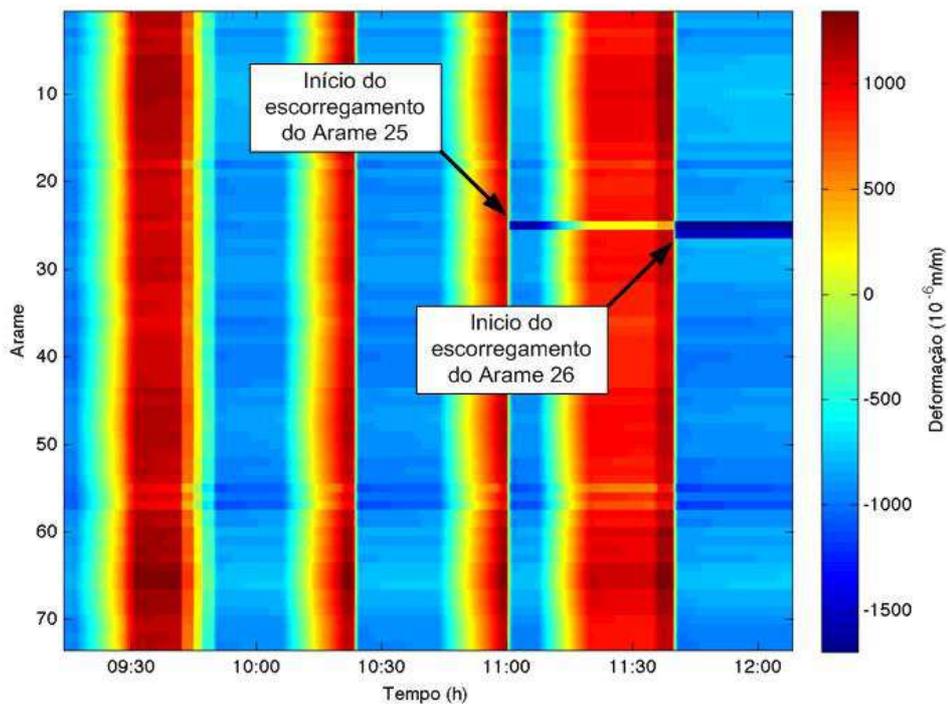


Figura 3. 12 - Mapas do nível de deformações no instante que os arames rompidos escorregam.

Assim como no teste anterior, o elevado nível de corrosão presente nos arames influenciou diretamente o resultado. O elevado coeficiente de atrito proveniente da superfície corroída do arame não permite o escorregamento do arame rompido fazendo com que o mesmo mantenha a resposta ao carregamento. Porém notou-se que com o passar do tempo a tendência do arame é aliviar cada vez mais. Assim conclui-se que o sistema de monitoramento óptico direto nos arames, quando instalado em um *riser* com presença de corrosão na armadura de tração, necessita de um tempo maior para detectar eventuais falhas na estrutura dos arames. Acredita-se que este comportamento seja o mais comum encontrado em situações reais de trabalho, pois muitos dos dutos flexíveis operam por anos a fio em ambientes agressivos contendo assim um nível elevado de corrosão nos arames da armadura de tração.

3.4. Teste 4 - LTS-3

O terceiro teste também foi realizado no Laboratório de Tecnologia Submarina da UFRJ (LTS-COPPE/UFRJ). O equipamento de tração utilizado foi o mesmo, apenas mudando a célula de carga, permitindo atingir cargas axiais de 1.600 kN. Neste ensaio foi utilizado um *riser* novo, obtido diretamente da fábrica,

sendo assim, não apresentava sinais de corrosão. Este era um duto de seis polegadas de diâmetro interno, com 45 e 43 arames nas camadas externas e interna respectivamente. Os arames estavam dispostos com um ângulo de hélice de 30° com relação ao eixo longitudinal da amostra. As dimensões de cada arame eram de 12 mm de largura e 4 mm de espessura.

A primeira técnica de monitoramento óptico aplicada neste teste foi o *MODA*. Posteriormente foi executada uma segunda etapa deste experimento onde foi aplicado um Band-Aid óptico. Inicialmente será apresentado o teste com o *MODA* e posteriormente os resultados do Band-Aid. Na Figura 3.13 observa-se um diagrama esquemático do teste. Foram utilizados dois sistemas de interrogação independentes para cada uma das técnicas de monitoramento.

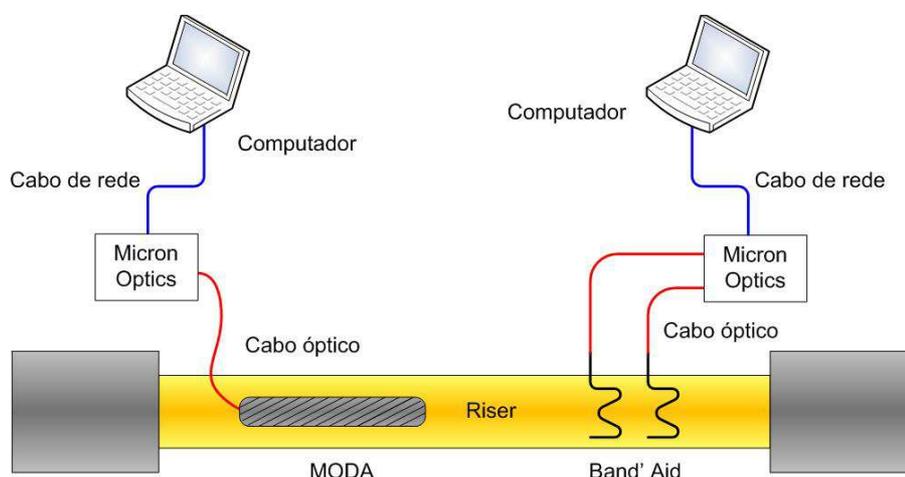


Figura 3. 13 - Esquemático do teste.

A instrumentação dos arames, com o sistema *MODA*, se deu por meio da retirada de quatro pedaços, da camada polimérica, simetricamente distribuídas em torno de uma seção do duto como mostra a Figura 3.14. A dimensão destas janelas foi projetada de forma que todos os 45 arames da camada externa de tração ficassem acessíveis. Cada abertura possuía 80 mm de largura e 250 mm de comprimento. Esta dimensão de janela foi desenvolvida de forma otimizada para garantir a integridade da camada polimérica durante a tração da amostra.

Desta forma todos os arames da camada externa de tração foram instrumentados com redes de Bragg. Porém, diferentemente do primeiro teste, as redes foram posicionadas no sentido longitudinal dos arames. Os sensores foram divididos em quatro conjuntos, sendo três com 11 sensores e um com 12 redes medindo deformação. Todos os quatro conjuntos de sensores possuíam uma rede de Bragg medindo temperatura para realizar a compensação do sinal.

O detalhe da acomodação da fibra sobre os arames pode ser observado na Figura 3.15.

Assim como nos ensaios anteriores o procedimento de teste consistiu em retirar parte da capa polimérica e realizar entalhes nos arames. Foi desenvolvido um padrão de carregamento para os arames entalhados viessem a falhar com a amostra carregada. Porém em alguns dos casos os arames tiveram de ser cortados com o auxílio de uma esmerilhadeira.



Figura 3. 14 - Janelas de instrumentação abertas sobre o duto de teste.



Figura 3. 15 - Detalhe da janela com o posicionamento da fibra óptica.

Durante o teste, foi elaborado um relatório dos acontecimentos. Nele foram registrados todos os rompimentos de arames assim como eventuais ocorrências que poderiam influenciar o sinal de resposta dos sensores.

Um total de 15 arames foram rompidos durante os carregamentos cíclicos do teste. Os sensores número 5 e 34 e 38 apresentaram problemas de funcionamento durante boa parte do ensaio. A Figura 3.16 apresenta o mapa de deformação gerado pelo Fibrax nos instantes iniciais do teste no dia 10/09/2008. Nota-se que neste instante os sensores de 5 e 34 já apresentavam problemas de funcionamento por isso foram desconsiderados.

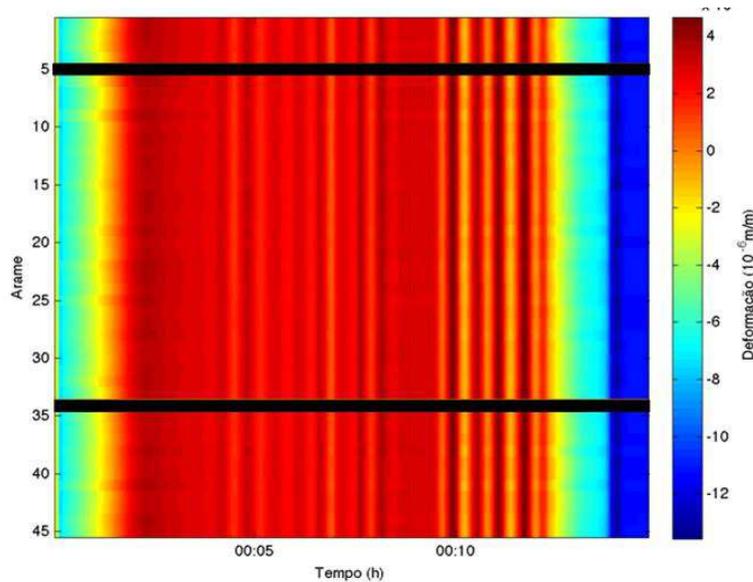


Figura 3. 16 - O gráfico mostra a presença de dois sensores defeituosos no sistema.

A Figura 3.17 apresenta um gráfico do carregamento que indica, claramente, o momento em que os arames 6 e 7 foram rompidos simultaneamente. No momento do corte estes dois arames escorregam e aliviam a tensão instantaneamente, caindo de um nível de aproximadamente 2000 $\mu\text{m/m}$ para abaixo de zero. Este gráfico mostra o nível de deformação no arame inteiro.

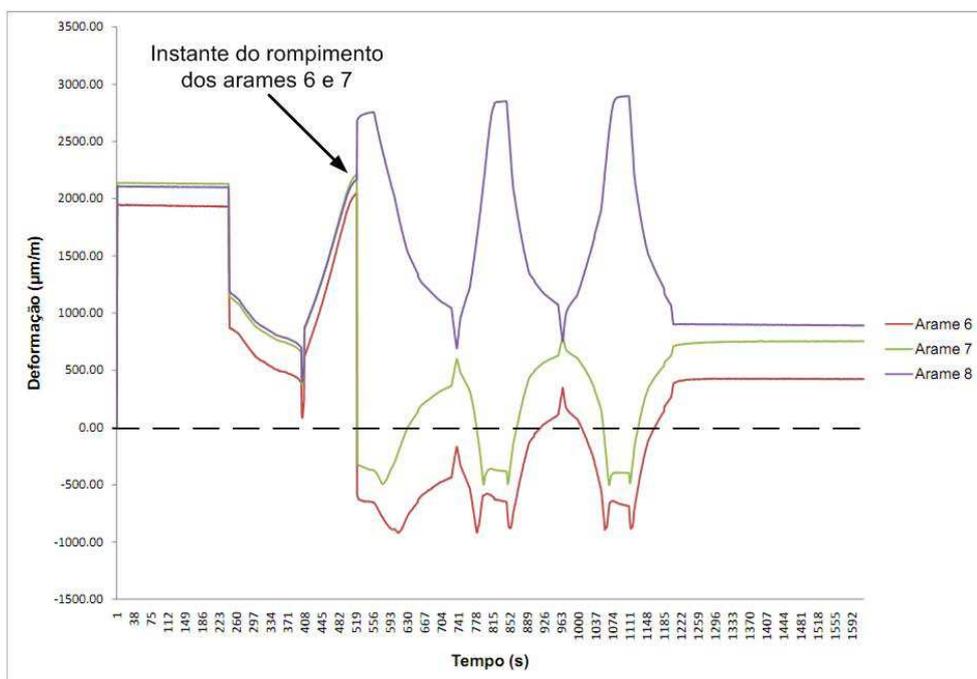


Figura 3. 17 - Momento em que o rompimento dos arames 6 e 7 foram registrados.

A utilização de uma amostra de *riser* nova, sem sinais de corrosão nos arames, mostrou que é possível se fazer a detecção instantânea do rompimento.

Com o baixo coeficiente de atrito entre os fios ficou claro que no momento da falha o arame rompido desliza em relação aos arames íntegros, não respondendo mais ao carregamento. Este fato pode ser facilmente monitorado com os sensores ópticos.

A Figura 3.18 mostra o mesmo instante de Figura 3.17 e nota-se o momento do rompimento nos arames de número 6 e 7. Assim como no gráfico do carregamento, o alívio no arame ocorre de forma imediata. Outro aspecto importante que pode ser observado na Figura 3.18 é o aumento significativo do carregamento nos arames ao lado dos fios 6 e 7. O mapa de deformação retrata de maneira clara este aspecto, mostrando que os arames número 8 e 9 apresentam uma tonalidade de vermelho mais escuro indicando um nível mais alto de deformação. Este valor cai gradativamente ao observar arames mais distantes da falha. Nos fios próximos aos arames 25 o nível de deformação se encontra uniforme. A Figura 3.18 mostra também que os arames 4 e 11 aparecem cortados, fato que pode ser confirmado acompanhando o relatório de teste produzido no dia do ensaio.

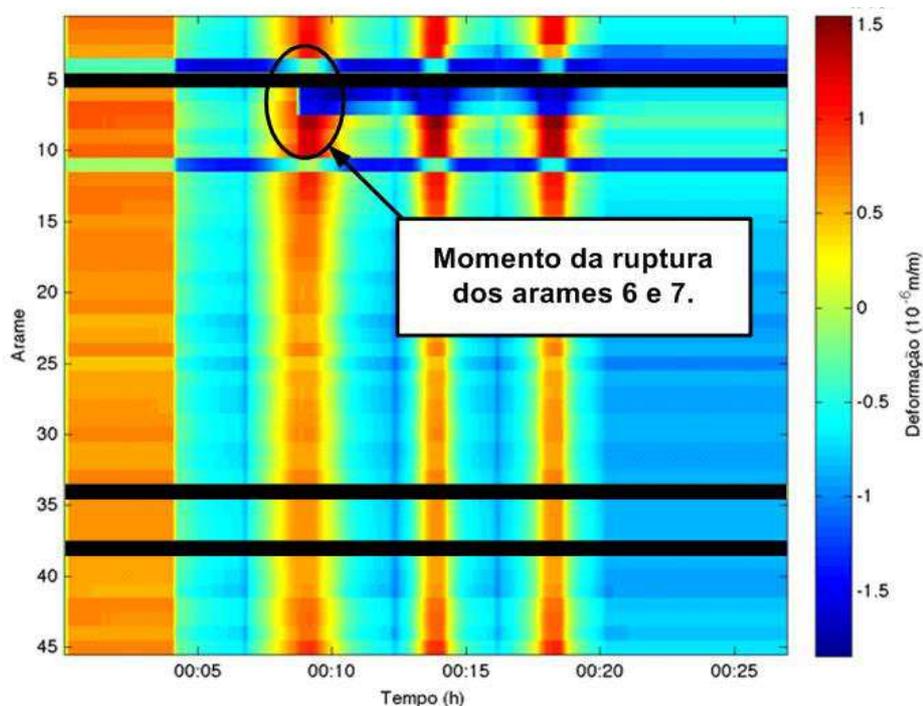


Figura 3. 18 - Mapa de deformação registrado no instante da ruptura dos arames 6 e 7.

Após o ensaio com os sensores do sistema *MODA*, foi realizado o primeiro teste com o sistema *Band-Aid*, onde se colocou-se em prática o conceito de colagem direta dos elementos sensores na capa polimérica do *riser*. Foram utilizados dois diferentes procedimentos de colagem dos conjuntos. Na superfície da amostra foi aplicada uma solução chamada primer 770, fornecida

pela Loctite, que teve como finalidade melhorar a aderência do adesivo utilizado na colagem das redes de Bragg. No primeiro sistema os elementos sensores foram colados diretamente na capa polimérica por meio de um adesivo a base de cianoacrilato e posteriormente cobertos com uma camada de resina de silicone para dar proteção. Como pode ser notado na Figura 3.19, no segundo Band-Aid foram utilizadas fitas Kapton entre os sensores e a superfície da amostra, Figura 3.20. A colagem foi realizada com o mesmo adesivo.

Os resultados foram excelentes para o primeiro sistema, pois demonstrou ser possível monitorar as deformações presentes no *riser* durante o teste, assim como o momento de ruptura do arame. O sistema com a fita Kapton, não produziu resultados satisfatórios. Provavelmente ocorreu o escorregamento da fita sobre a superfície do corpo de prova alterando assim a resposta dos sensores. Para futuras instalações foram desenvolvidas outras técnicas de colagem, que ainda se encontram em fase de testes no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio.



Figura 3. 19 - Sensores colados direto sobre a capa.



Figura 3. 20 - Sensores colados na capa com a utilização de uma película de Kapton.

O objetivo do teste foi determinar o comportamento do sinal óptico no momento da ruptura de um arame. Logo após as duas primeiras rupturas notou-se uma alteração na resposta de um dos sensores. O sinal que monitorava a deformação axial da capa polimérica não sofreu nenhuma alteração.. O sensor de deformação circunferencial apresentou uma descontinuidade no momento da ruptura. Esta descontinuidade se dá na forma de um degrau na curva do carregamento como pode ser observado na Figura 3.21.

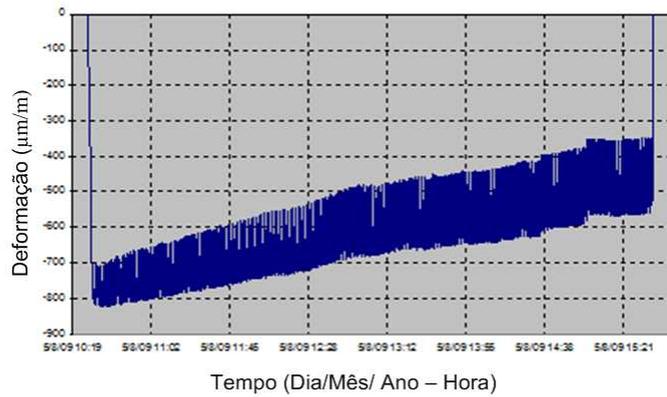


Figura 3. 21 - Gráfico do sensor de deformação circunferencial.

A curva com deformações torsionais na capa do flexível, obtidas a partir da subtração dos sinais de deformação dos dois sensores posicionados em ângulos de 45° com relação às geratrizes do tubo, apresentou este mesmo comportamento de forma mais acentuada, como pode ser visto nas Figuras 3.22 e 3.23.

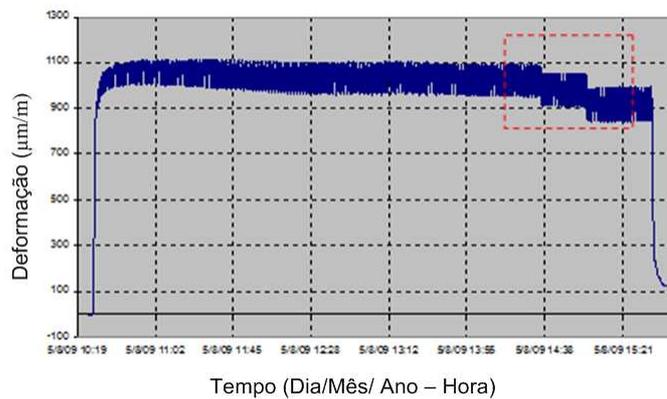


Figura 3. 22 - Gráfico da torção do duto.

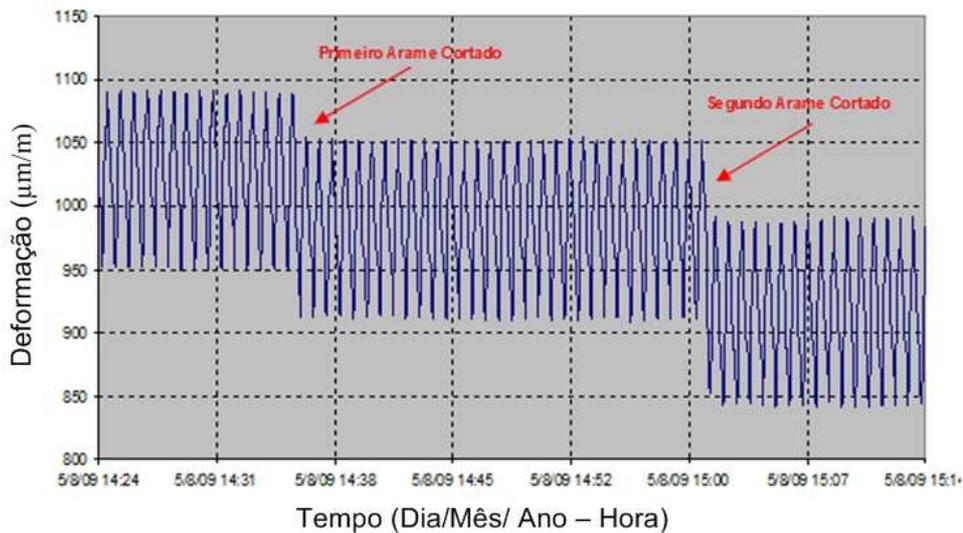


Figura 3. 23 - Detalhe do momento do rompimento do arame.

Como foi explicado anteriormente, este comportamento no sinal óptico no instante da ruptura ocorre devido às deformações na capa provocadas pela torção da amostra. A amplitude de deformação provocada pelo ciclo de carregamento permanece praticamente a mesma variando apenas o valor da deformação média.

3.5.

Teste 5 - LAMEF-UFRGS

O quinto teste em laboratório ocorreu nos dias 24 e 25 de junho de 2009, no Laboratório de Metalurgia e Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF – UFRGS/RS). Foi utilizada uma amostra de *riser* novo, com seis plegadas de diâmetro interno e contendo 37 e 34 arames nas camadas externa e interna de tração, respectivamente. Os arames possuíam 15mm de largura, 5mm de espessura e um ângulo de hélice de 30° com relação ao eixo longitudinal do tubo. A máquina de tração utilizada possuía uma capacidade de carga de até 2000 kN.

A amostra ensaiada foi instrumentada com o sistema *MODA* e aplicaram-se dois tipos de sensores Band-Aid. Para a instalação do *MODA*, foram abertas 4 janelas de aproximadamente 460 mm de comprimento e 80 mm de largura. Assim como no teste anterior, a amostra era de um duto novo e seus arames da camada externa da armadura não apresentavam sinais de corrosão. A Figura 3.24 mostra o sistema *MODA* instalado na amostra de teste.

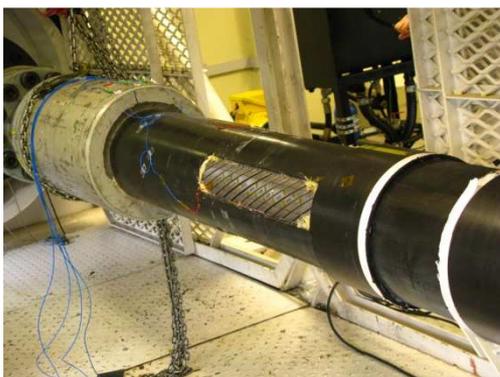


Figura 3. 24 - Sistema *MODA* instalado no *riser*.

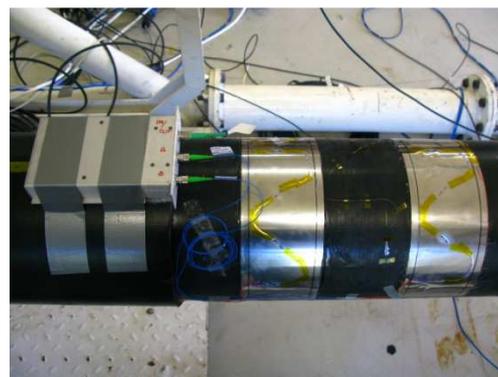


Figura 3. 25 - Sistemas Band - Aid instalados.

Foi instalado também um sistema Band-Aid diretamente na capa polimérica e outros dois sistemas colados em uma fina chapa metálica de 0,5 mm de espessura. As chapas foram coladas na capa do *riser* com adesivo epóxi. A utilização desta chapa visa testar novas formas de aplicação deste sistema.

Na Figura 3.25 observam-se três conjuntos Band-Aid instalados. Dois com chapa metálica e, entre eles, um colado direto na capa com adesivo a base de cianoacrilato. A Figura 3.26 apresenta o esquema de teste com o posicionamento dos sistemas de monitoramento e os equipamentos de aquisição de dados utilizados.

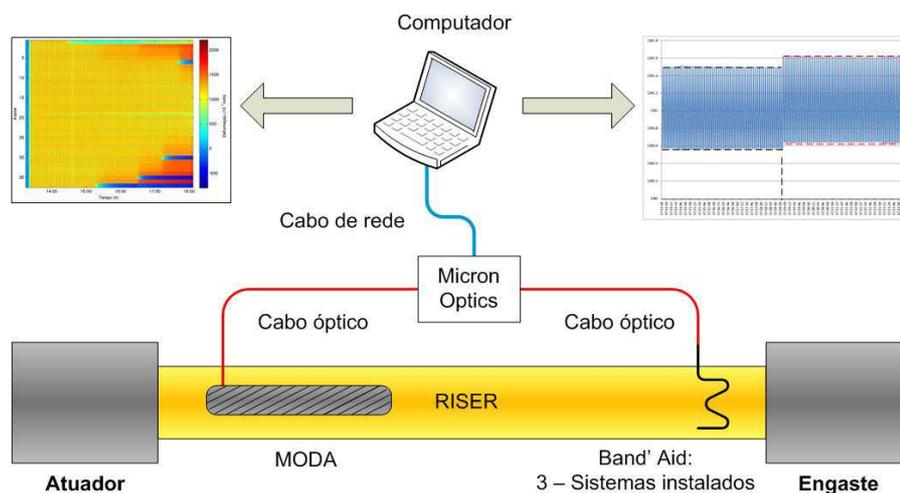


Figura 3. 26 - Esquema de instalação e teste dos sistemas de monitoramento.

O teste consistiu em rupturas forçadas de determinados arames, por meio de trincas de fadiga induzidas, durante os ciclos de carregamento. Foi feita uma numeração dos arames para facilitar a visualização dos sinais durante o teste. Inicialmente foi aberta uma parte da capa polimérica para o acesso aos arames da armadura de tração, porém, nem todos ficaram expostos nesta janela. Assim durante o teste outras partes da capa polimérica tiveram de ser cortadas. No total foram 4 cortes na capa e 9 rompimentos de arames, 4 no primeiro dia e 5 no segundo. A Tabela 3.2 apresenta o cronograma de eventos executados sobre o riser no dia 24/06/09.

Tabela 3. 2 - Sequência de eventos ocorridos no primeiro dia de teste.

Dia	24/06/09	
Hora	Evento	Nº do arame
15:15	1º Rompimento	37
16:30	2º Rompimento	35
17:10	3º Rompimento	30
17:25	Corte da capa	-
17:38	4º Rompimento	6
18:00	Fim do teste	-

De acordo com a numeração dos arames, observou-se que os três primeiros rompimentos ocorreram nos arames expostos na janela de número quatro. Desta forma na Figura 3.27 é apresentado um gráfico de resposta dos sensores. Para ilustrar melhor o comportamento do sinal, o gráfico contém os três arames rompidos e apenas um arame íntegro. Observa-se claramente que no momento da ruptura o arame alivia a tensão e passa a apresentar uma resposta próxima de zero. O arame rompido ainda continua respondendo ao ciclo. Isto ocorre, provavelmente, devido ao atrito entre os fios.

Outro ponto importante a ser observado é o aumento de tensão nos demais arames no momento da ruptura. Isso acontece, pois, uma vez que um menor número de arames sofre o mesmo carregamento, a tensão proporcional sobre cada fio aumenta. Esse comportamento fica claro no sinal do arame 34 (vermelho) presente na Figura 3.27.

O corte na capa, ocorrido não foi sentido por nenhum dos 37 sensores instalados nos arames, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.27. O rompimento do arame de número 6 foi registrado com as mesmas características de sinal das demais rupturas. Este arame estava sendo monitorado pela janela de número 1.

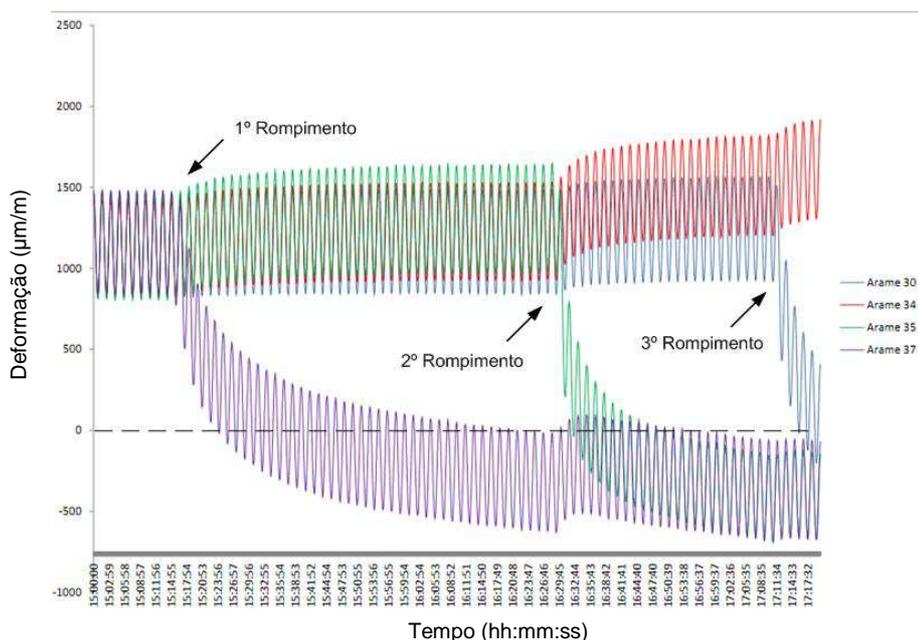


Figura 3. 27 - Gráfico dos primeiros rompimentos ocorridos no teste.

A Figura 3.28 mostra o mapa de deformação do software Fibrax. Percebe-se claramente o momento do rompimento dos 4 primeiros arames. Comparando com o gráfico da Figura 3.27 nota-se que o horário do registro da ruptura é compatível, mostrando assim que as duas análises são capazes de registrar este

evento de forma confiável. Nesta imagem pode-se notar também o aumento da deformação nos arames próximos ao rompimento, representados pela coloração vermelha. Assim como no gráfico do carregamento o corte da capa não foi sentido pelos sensores.

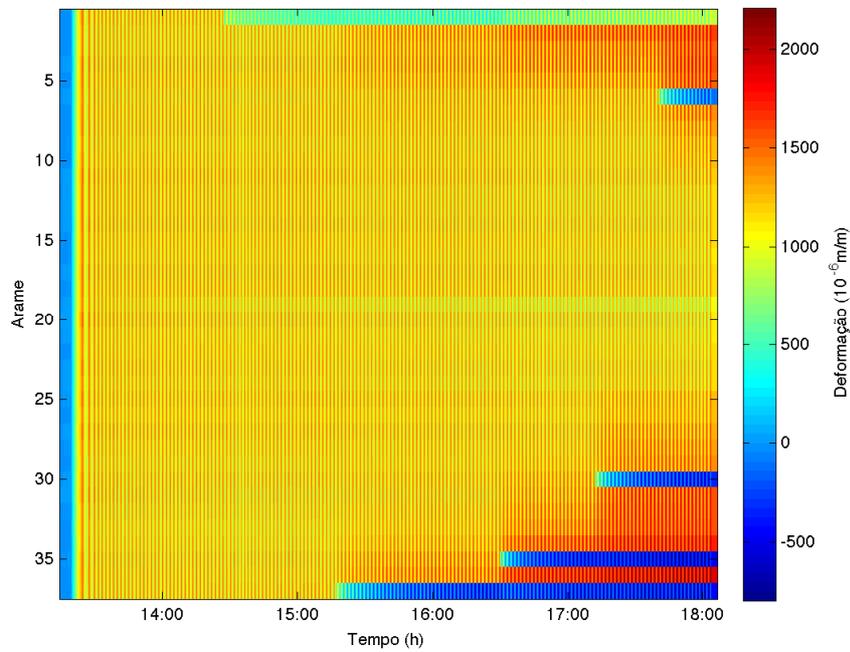


Figura 3. 28 - Mapa de deformação do primeiro dia de teste.

Na Figura 3.29 observa-se um sensor angular de um do sistema Band-Aid colado em uma chapa metálica. Todos os quatro rompimentos foram registrados no horário exato. Notou-se também que o corte da capa polimérica provocou uma alteração no sinal similar ao do rompimento do arame. Isto ocorreu, pois abertura de uma janela altera a distribuição de tensão sobre a capa polimérica alterando assim a resposta dos sensores. Os outros dois sistemas Band' Aid também registraram com sucesso os rompimentos, porém nem todos foram capazes de registrar o corte na capa, provavelmente por causa da posição dos sensores.

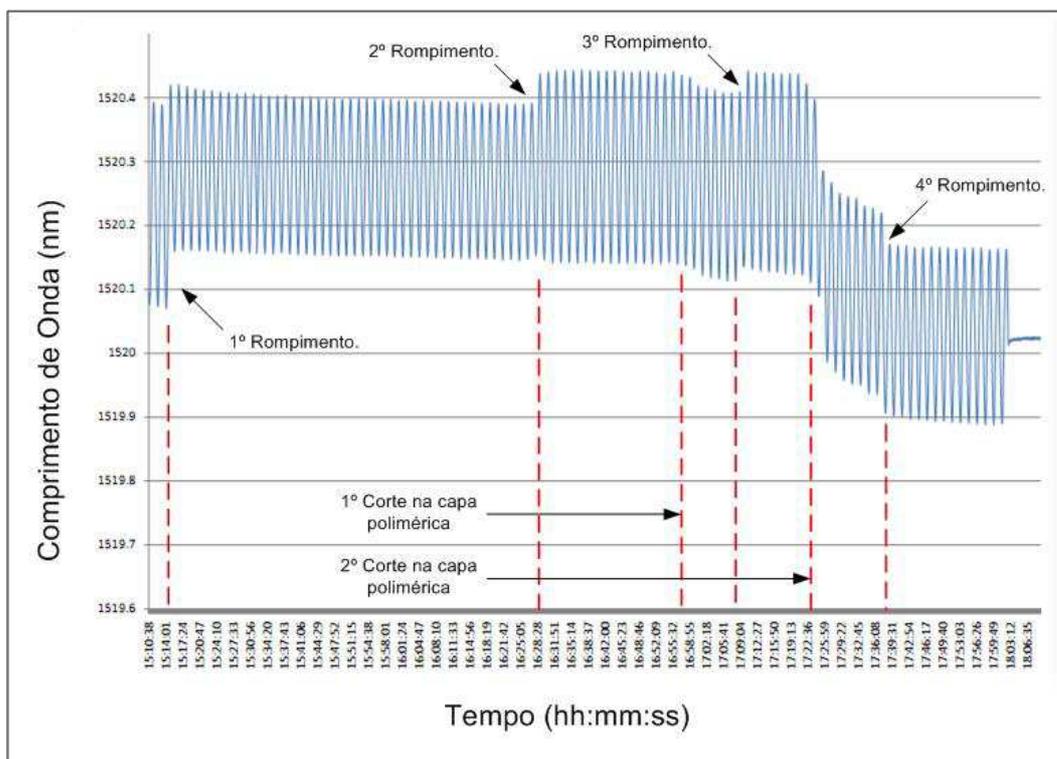


Figura 3. 29 - Gráfico do comportamento do sensor Band' Aid no primeiro dia de teste.

O teste do dia 25/06/2009 ocorreu também na parte da tarde. Todos os cinco rompimentos foram devidamente registrados em tempo real. O sinal óptico das rupturas seguiu o padrão de resposta já esperado. A Tabela 3.3 apresenta o cronograma de eventos executados no teste.

Tabela 3. 3 - Eventos registrados no segundo dia de teste.

Dia	25/06/09	
Hora	Evento	Nº do arame
13:30	5º Rompimento	5
13:50	Impacto	-
14:00	Corte da capa	-
14:35	6º Rompimento	17
16:15	7º Rompimento	7
17:50	8º Rompimento	13
18:00	Corte da capa	-
18:20	9º Rompimento	27
19:00	Fim do teste	-

O MODA apresentou o mesmo comportamento do dia anterior. A cada corte os sensores correspondentes aos arames rompidos descarregavam

imediatamente e os arames íntegros apresentavam um aumento na carga. Assim como no teste da tarde anterior os cortes na capa polimérica também não foram sentidos pelo sistema de monitoramento de arames.

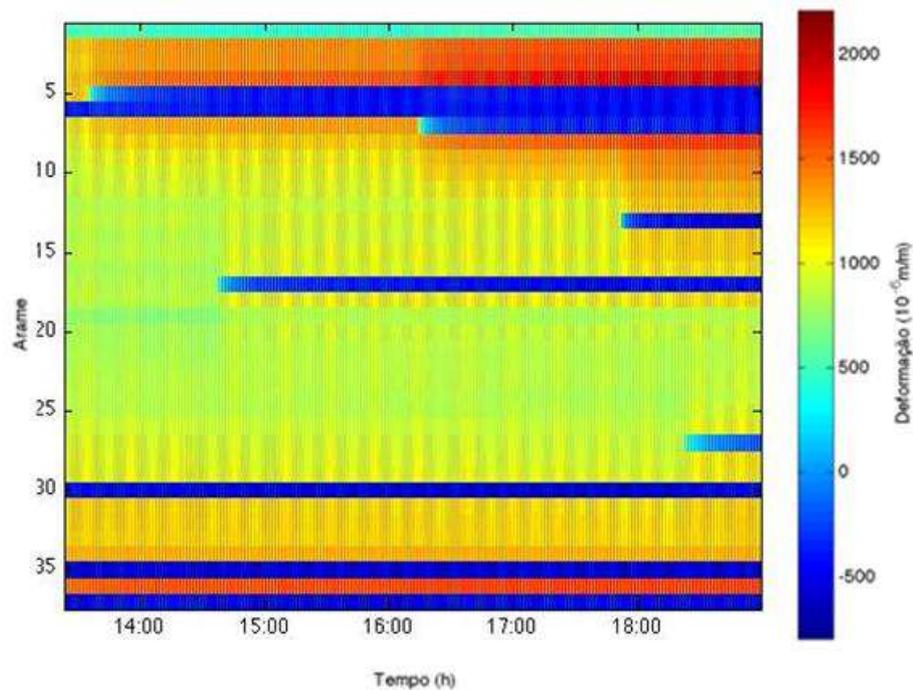


Figura 3. 30 – Mapa de deformação do segundo dia de teste.

A Figura 3.30 apresenta o mapa de deformação do segundo dia de teste, nota-se que os arames rompidos permaneceram descarregados e que os outros cinco rompimentos foram verificados. Por esse gráfico fica nítido que os sensores instalados diretamente nos arames não são capazes de detectar os impactos sobre a capa polimérica. Pelo gráfico observa-se também que, ao final do dia, próximo aos arames rompidos 5, 6 e 7, o nível de deformação se encontra bem elevado, indicado pela cor vermelha.

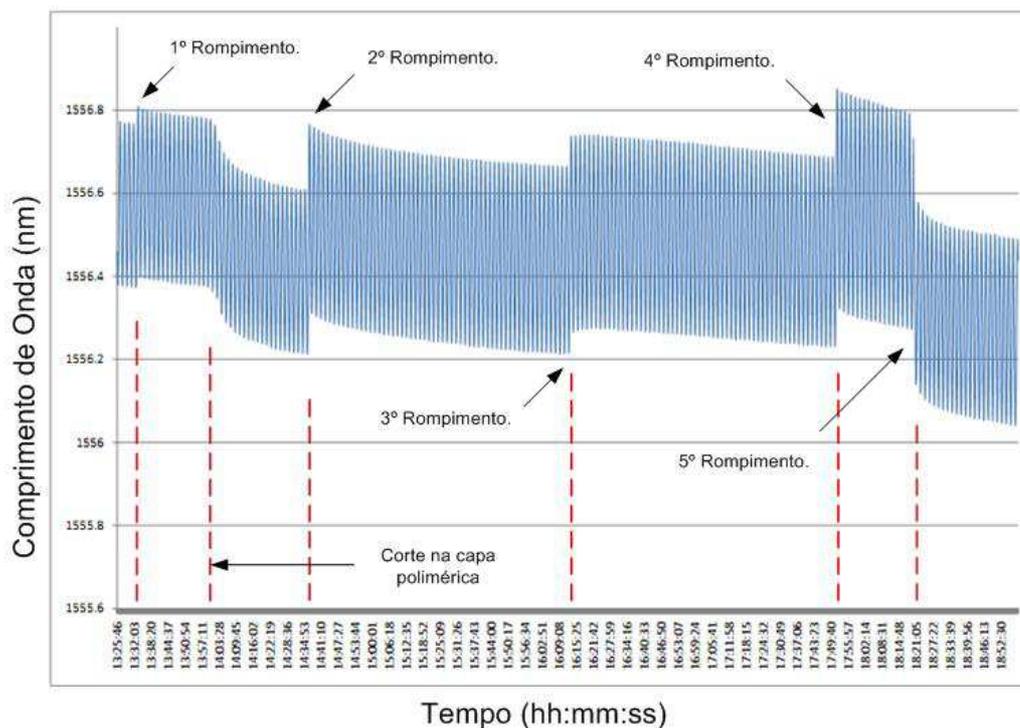


Figura 3. 31 - Gráfico do Band' Aid no segundo dia de teste.

Na Figura 3.31 observa-se o sensor angular do sistema Band-Aid colado diretamente na capa polimérica. Durante esta etapa do teste a capa foi cortada em dois momentos. O primeiro corte ocorreu por volta das 14 horas e foi registrado pelos sensores. O segundo corte não foi sentido por nenhum dos sistemas instalados e ocorreu por volta das 18 horas.

Ao final deste teste e da análise dos dados obtidos, pode-se comprovar mais uma vez a confiabilidade do sistema *MODA*. Todos os rompimentos foram registrados, de forma clara e imediata, com os dois métodos de análise. Assim como no ensaio anterior, o fato da amostra em teste ser nova facilitou a detecção das rupturas.

Os sinais dos sensores dos sistemas Band-Aid, com e sem a chapa metálica, foram bastante satisfatórios, pois apresentaram um comportamento padrão durante a ruptura dos arames. Outro ponto positivo observado no decorrer do teste foi o fato do sistema ser capaz de detectar falhas na capa polimérica, tais como corte e abertura de janelas. Porém os conjuntos de Band-Aid colados em substratos metálicos apresentaram problemas ao longo do teste. Isto ocorreu, pois a resina epóxi utilizada para fixar a chapa metálica não resistiu aos constantes ciclos de carregamento, impostos à amostra. Assim a chapa descolou em alguns pontos. O surgimento de zonas descoladas torna o sensor

menos confiável uma vez que o mesmo passa a não monitorar o real comportamento da superfície polimérica.

3.6.

Teste 6 – LAMEF-UFRGS - 2

O quarto teste realizado teve como finalidade registrar e reportar os eventos de ruptura dos arames da armadura de tração do duto flexível em teste corrosão-fadiga. O teste em escala real foi realizado no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF-UFRGS). A amostra em teste possuía 6 polegadas de diâmetro interno contendo 34 e 37 arames nas camadas interna e externa de tração, respectivamente. Cada arame apresentava 15 mm de largura, 5 mm de espessura e um ângulo de hélice de 30° com o eixo longitudinal do duto flexível.

Os sensores ópticos ficaram permanentemente ligados por três meses e registraram 13 rompimentos nas armaduras de tração da amostra. Com isso, o teste foi finalizado, pois o critério de parada de 10 arames rompidos foi atingido. Posteriormente, quando a amostra foi cortada e aberta, verificou-se que de fato todas as rupturas foram monitoradas.

Durante os quase quatro meses de 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 para garantir a comunicação com os equipamentos de aquisição presentes no LAMEF.

O teste consistiu na aplicação de carregamentos cíclicos seguindo um padrão estipulado pela Petrobras em conjunto com a empresa que forneceu a amostra de tubo flexível. Este padrão foi desenvolvido para gerar um envelhecimento acelerado da amostra em teste. Para estimular a corrosão interna e aproximar o experimento das condições reais de trabalho, foi injetada no interior do *riser* uma solução de água marinha com CO₂ dissolvido até atingir uma pressão interna de 275 bar. Toda a infra-estrutura do teste, assim como o controle operacional da máquina de tração foram administrados pela equipe técnica do LAMEF.

Para tracionar o corpo de prova (*riser*) foi utilizado uma máquina de tração com capacidade de carga de aproximadamente 2000 kN. A Figura 3.32 apresenta o sistema pronto para o início dos testes.



Figura 3. 32 - Imagem da amostra no quadro de teste no LAMEF-UFRGS.

Como este foi o primeiro teste em que o conceito de Colar 3D foi utilizado e no ensaio não havia rompimento forçado dos arames, não se sabia qual seria o comportamento do sinal no momento de uma eventual falha. Desta forma, optou-se pela instalação de quatro conjuntos de sensores ao longo do eixo longitudinal da amostra. Assim aumentaria a probabilidade de detecção de uma ruptura.

Durante o teste foram registradas 12 rupturas de arames. Na Tabela 3.4 observa-se a ordem de ocorrência das rupturas. Como esta técnica de monitoramento é instrumentada sobre a capa do *riser*, apenas são registradas as ocorrências das rupturas sem poder indicar qual arame que falhou.

Tabela 3. 4 - Cronograma de eventos no Teste 6.

Rompimento	Dia	Hora
1º	22/02/10	17:35
2º	04/03/10	0:03
3º	04/03/10	1:15
4º	04/03/10	3:52
5º	09/03/10	13:18
6º	11/03/10	15:12
7º	11/03/10	19:18
8º	11/03/10	19:41
9º	11/03/10	22:32
10º	12/03/10	10:49
11º	12/03/10	10:50
12º	15/03/10	17:28

Todas as 12 rupturas foram detectadas pelos sensores ópticos, porém a intensidade do sinal de resposta variou em cada evento. Isto ocorreu porque o local de rompimento dos arames varia e os sensores instalados próximos as

rupturas apresentam um sinal mais forte, com maior visibilidade. A Figura 3.33 apresenta o sinal óptico de um sensor angular registrando a 7ª ruptura de arame ocorrida no dia 11/03/2010 às 19:18.

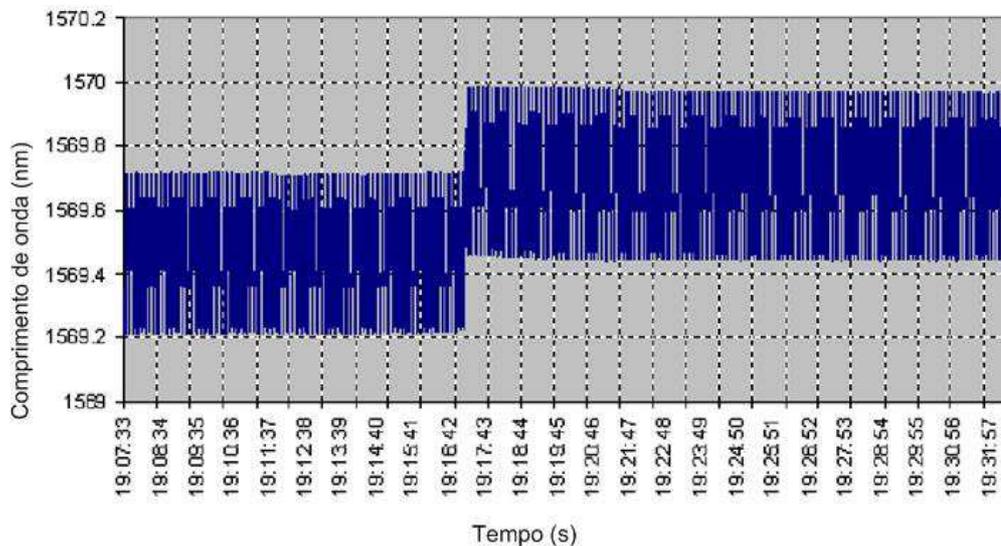


Figura 3. 33 - Sinal característico do Colar 3D no instante da ruptura.

O sinal de resposta dos sensores apresenta um nível alto de detecção quando as rupturas ocorrem por meio de corte ou por meio de rompimento devido fragilização dos arames por meio de agentes químicos. Porém não se sabia qual seria o comportamento do sinal para rompimento devido à fadiga dos arames. Um ponto importante observado neste teste foi à capacidade dos sensores ópticos de detectarem os rompimentos ocorridos espontaneamente durante o ciclo de carregamento. Diferentemente dos testes anteriores, onde os rompimentos foram forçados por meio de corte ou ataque de produtos corrosivos, neste ensaio os arames foram submetidos apenas a uma solução presente no ambiente de trabalho e a ciclos de carregamento. Notou-se também que o maior número de rompimentos se concentrou no final do teste, pois a amostra já se encontrava degradada e o nível de tensão em cada arame estava desbalanceado, como já foi observado em testes anteriores. Este fato pode ser analisado no gráfico da Figura 3.34 onde nota-se que nos últimos quatro dias de teste ocorreram sete rompimentos.

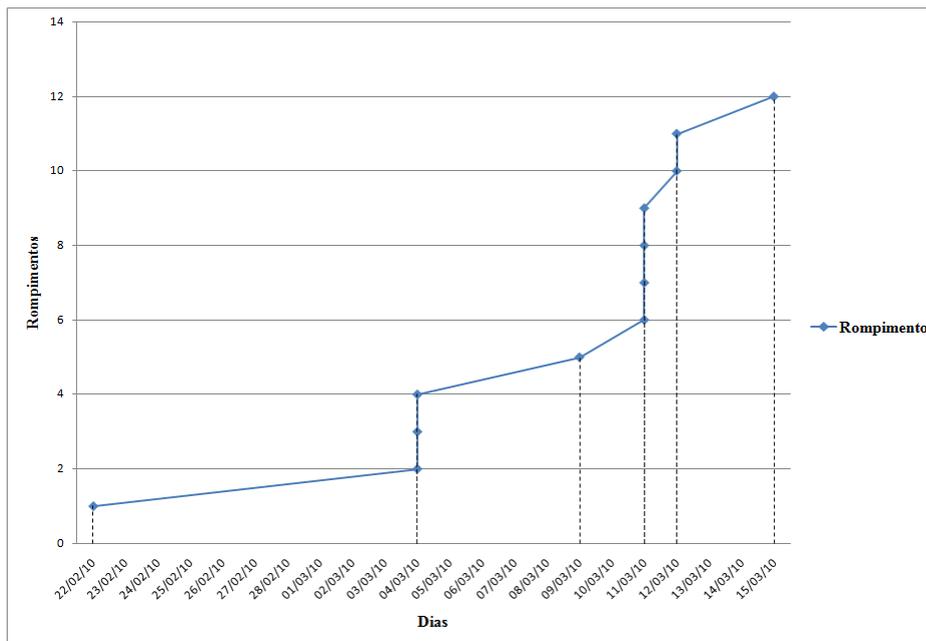


Figura 3. 34 - Linha cronologia da ocorrência de rompimentos nos arames.

3.7.

Teste 7 – LAMEF-UFRGS - 3

O sétimo teste apresentou características semelhantes ao teste anterior. Foi utilizada uma segunda amostra do mesmo modelo de *riser* e a mesma máquina de tração. O carregamento seguiu o mesmo padrão utilizado anteriormente (desenvolvido pela Petrobras em conjunto com a empresa fabricante do *riser*). Assim como no sexto teste, foi injetada no interior do *riser* uma solução de água marinha composta de CO_2 até atingir uma pressão interna de 275 bar.

Para o teste foram instalados quatro conjuntos de uma variação do sistema Band-Aid e dois colares ópticos como observa-se no esquemático do teste apresentado na Figura 3.35. Os sensores ópticos foram distribuídos em 4 canais posicionados linearmente ao longo do duto flexível. Esta estratégia teve como objetivo avaliar e comparar os níveis de deformação transmitidos na capa polimérica no momento da ruptura. Com a análise da intensidade do sinal em cada um dos canais é possível estipular o local do rompimento do arame, pois se sabe que os sinais mais fortes ocorrem mais próximos ao evento. O canal 1, localizado próximo ao atuador da máquina de tração, continha sensores que detectam deformação longitudinal, circunferencial e angular, colados diretamente sobre a capa polimérica, formando assim uma espécie de sistema Band-Aid. O canal 2 inicialmente possuía um conjunto Band-Aid, colado direto na capa e um

colar óptico. Porém durante a instalação o sensor de deformação circunferencial colado na capa do *riser* foi danificado. Assim os dados perdidos por esse sensor passaram a ser monitorados pelo Colar. O mesmo ocorreu no canal 3. O canal 4, localizado próximo ao engaste da máquina de tração apresentou a mesma configuração do canal 1.

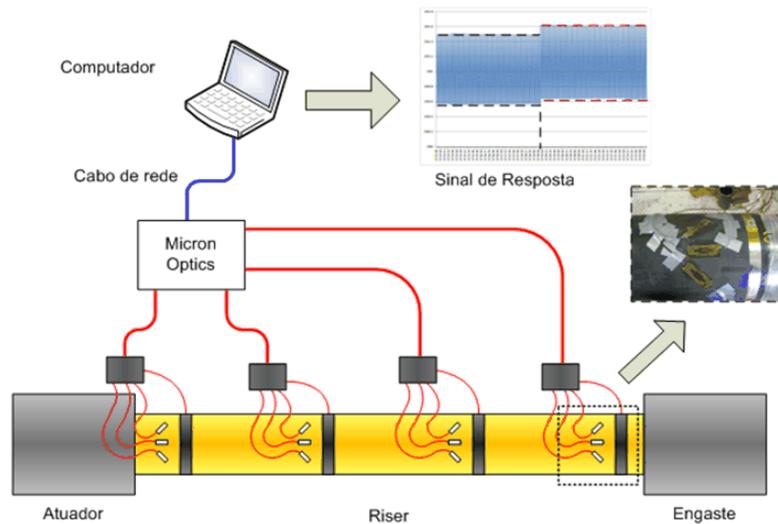


Figura 3. 35 - Esquemático do posicionamento dos sensores no teste.

No total foram registrados 13 possíveis rupturas de arames. A precisão da resposta óptica foi excelente, pois o sinal de ruptura ocorreu no mesmo instante (hora, minuto e segundo) do registro de eventos por meio de outras técnicas de monitoramento empregadas nesta amostra. A Figura 3.36 representa o sinal óptico do evento de número 5. Os demais sinais foram armazenados e ao final desta análise uma tabela classificará as intensidades dos mesmos.

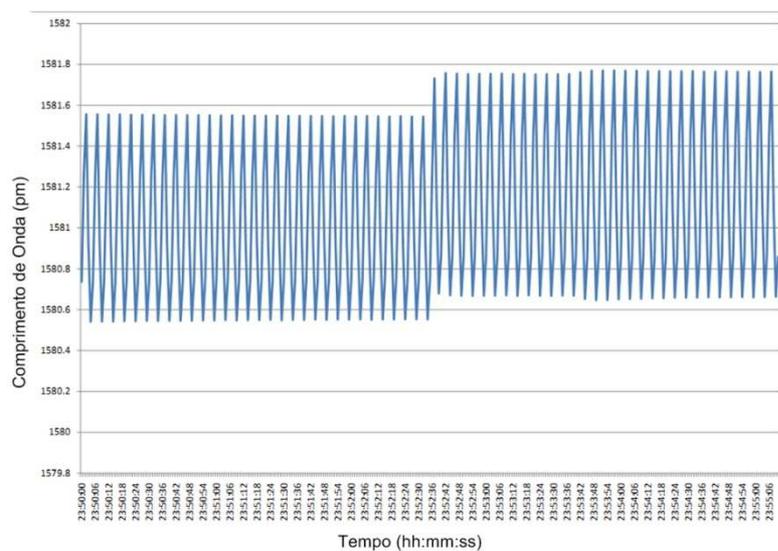


Figura 3. 36 - Sinal óptico do quinto evento.

Durante o teste, após o oitavo evento o carregamento foi paralisado e a energia do LAMEF foi desligada. Após dois dias, o teste foi reiniciado sem nenhum aviso prévio e com isso não houve tempo suficiente para reprogramar os sistemas de aquisição de dados ópticos. Por conta deste motivo no dia 13/09/2010, os eventos 9 e 10 não foram registrados pelos sensores ópticos, que permaneceram desligados durante este tempo. Depois de contornado este problema todos os sistemas de monitoramento passaram a detectar normalmente os eventos.

Tabela 3. 5 - Registro da intensidade do sinal óptico e do possível local de rompimento dos arames.

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

Uma análise mais detalhada dos dados deste teste possibilitou a criação de uma tabela (Tabela 3.5) descrevendo a hora do evento assim como a intensidade registrada por cada sensor. 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 Detectou). Isto ocorre porque os sensores ópticos dependem de deformações na camada polimérica, que somente apresentam

valores significativos nas regiões próximas ao rompimento. A comparação dos sinais ópticos permitiu estipular onde ocorreu cada uma das rupturas. Num total de 13 arames rompidos, 8 falharam próximo ao atuador, 1 no meio e 4 no conector de engaste, como mostra a Figura 3.37.

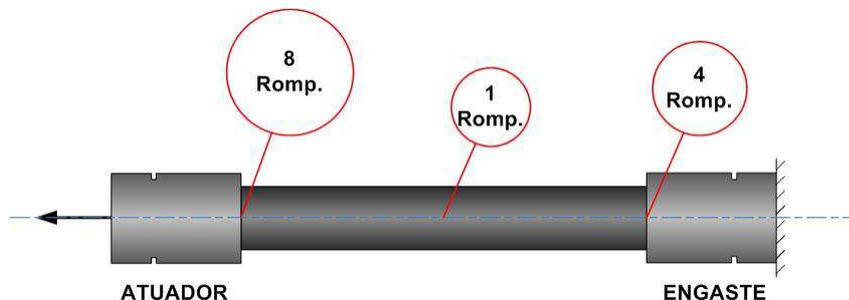


Figura 3. 37 - Registro do possível local de ocorrência das falhas.

Como já observado em testes anteriores, o processo de rompimento dos arames foi acelerado com a ocorrência dos eventos. Este fato ocorre devido ao aumento proporcional da carga nos arames ainda íntegros. A Figura 3.40 exibe o gráfico dos eventos em função do tempo (dias) e nota-se a maior concentração de ruptura na parte final do teste.

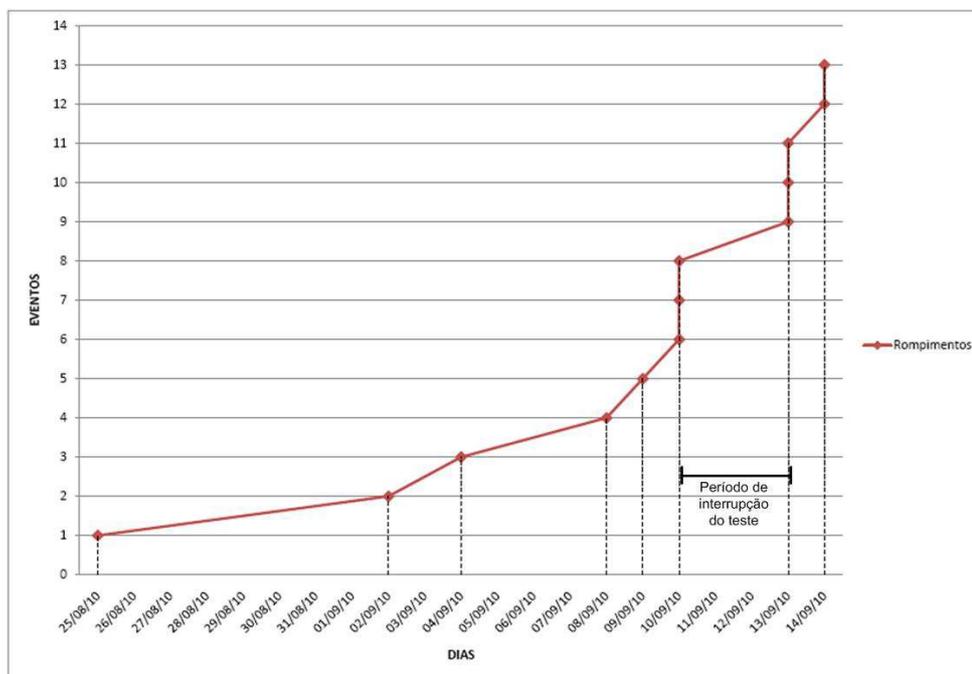


Figura 3. 38 - Ordem cronologia da ocorrência de eventos.

Após a análise de todos os dados levantados durante o teste, foram gerados relatórios contendo as informações obtidas através das respostas dos sensores. Com o final do teste o laboratório responsável pelo ensaio realizou uma dissecação na amostra de *riser* para verificar quantidade de arames e o

local onde haviam rompido. Comparando o relatório da dissecação com os dados dos sensores ópticos verificou-se que de fato todos os rompimentos haviam sido registrados no instante exato, assim como o local de falha dos arames. Confirmando assim os dados da Tabela 3.5.