

2 Técnicas de monitoramento

Este capítulo é dividido em duas partes, onde são descritos dois métodos de monitoramento óptico capazes de detectar a falha por ruptura dos arames da armadura de tração de *risers* flexíveis. O primeiro método é o monitoramento indireto, desenvolvido em três etapas descritas a seguir. No monitoramento indireto com sensores a fibra óptica, a capa polimérica do *riser* é instrumentada com sensores que monitoram deformações produzidas pela ruptura de arames nas armaduras de tração. O segundo método a ser apresentado é o monitoramento direto, onde sensores ópticos de deformação são instalados diretamente sobre os arames. Todas as técnicas foram desenvolvidas pelo Laboratório de Sensores a Fibra Óptica, no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, em parceria com a Petrobras.

O monitoramento indireto consiste na instrumentação da capa polimérica do *riser* e avaliação de possíveis alterações causadas pelo rompimento dos arames. Conforme discutido na seção 2.3, no momento da ruptura de um arame da armadura de tração, o *riser* sofre uma pequena torção e ao longo da contínua operação ocorre um escorregamento dos fios rompidos, o que por sua vez provoca deformações na capa externa. Inicialmente foi desenvolvido um sensor capaz de detectar pequenas alterações no diâmetro externo do duto, o Colar Óptico. Visando melhorar a confiabilidade deste sistema, foi desenvolvida outra técnica de monitoramento para trabalhar em paralelo e que fosse capaz de detectar a torção do *riser* provocada pelo rompimento de arames. Esta segunda técnica será descrita de forma detalhada na seção 3.2 e foi denominada de sensor Band-Aid. Por fim, analisou-se que seria possível unir estas duas técnicas e desenvolver o Colar 3D que possui elementos sensores posicionados em ângulo para detectar a torção e redes de Bragg sobre um “colar” metálico capaz de medir pequenas variações no diâmetro.

Para o monitoramento direto foi desenvolvida uma técnica chamada *MODA* (Monitoramento Óptico Direto nos Arames) que consiste na instrumentação individual de cada um dos arames da armadura de tração externa do *riser*. Na seção 3.3 esta técnica será apresentada com mais detalhe.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram realizados testes em laboratório com diversos tipos de amostras de *risers* com diferentes tipos de estrutura e estado de conservação. Todos os ensaios, assim como o desenvolvimento e aperfeiçoamento das tecnologias aqui descritas, fazem parte de um projeto, denominado MONFLEX, desenvolvido pela PETROBRAS (CENPES) em parceria com laboratórios de pesquisa, universidades e fornecedores de *risers* em todo o Brasil.

2.1. Técnicas Indiretas de Monitoramento Óptico

Nas técnicas indiretas de monitoramento aqui apresentadas, os sensores são instalados sobre a capa polimérica e registram alterações nas deformações da mesma. Estas alterações ocorrem geralmente em decorrência do rompimento de um ou mais arames das armaduras de tração. Na concepção inicial do sistema de monitoramento indireto, foram desenvolvidos duas metodologias que trabalhavam de forma independente e complementar, o sistema Band-Aid e o Colar Óptico. Testes de laboratório demonstraram que seria mais indicado unir as duas técnicas e obter um sistema final que apresentasse as melhores características destes dois, o Colar 3D. As técnicas são apresentadas a seguir na sequência em que foram desenvolvidas.

2.1.1. Colar Óptico

Em alguns casos as falhas de um arame da armadura externa de tração do *riser*, com o tempo, provocam o aparecimento de protuberâncias na camada polimérica do duto como pode ser notado na Figura 2.1. Este fato ocorre, pois o arame, após o rompimento, passa a não responder aos esforços aos quais os *risers* estão submetidos e podem vir a deslizar em relação aos demais (íntegros). Outro aspecto importante observado nos dutos danificados é o efeito de torção. Na Figura 2.2, que mostra um *riser* torcido, nota-se claramente as deformações provocadas na capa polimérica.



Figura 2. 1 - Protuberâncias na capa polimérica.



Figura 2. 2 - Torção e deformação da capa polimérica devido à ruptura de arames. [16]

O Colar Óptico é uma técnica que consiste no monitoramento contínuo das variações no diâmetro externo do *riser*. Pequenas variações podem ser percebidas devido à alta sensibilidade dos elementos sensores presentes no colar. Para fixar e proteger as redes de Bragg, junto à capa externa, foi utilizado um substrato metálico (lâmina metálica de aço mola inoxidável com 0,5 mm de espessura), especialmente projetado e construído para ser de fácil instalação em campo, como pode ser observado na Figura 2.3. O comprimento do dispositivo é da mesma ordem de grandeza do perímetro do *riser* que receberá o sistema. Como já foi dito na seção 2.3 o local de maior ocorrência de rompimento dos arames se encontra próximo ao conector. Para uma maior capacidade de detecção, o Colar deve ser instalado nesta região.

Nos protótipos desenvolvidos neste trabalho, os sensores ópticos foram fixados na superfície da lâmina por meio de um adesivo a base de cianoacrilato. Entretanto, encontra-se atualmente em estudo pela equipe do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio a utilização de adesivos epóxi que passarão a ser utilizados nas futuras versões dos sistemas de monitoramento indireto. O número de elementos sensores em cada colar óptico varia de acordo com o diâmetro do *riser*, normalmente contendo de dois a quatro, sendo pelo menos um deles utilizados para monitorar a temperatura do meio com a finalidade de realizar as devidas correções no sinal.

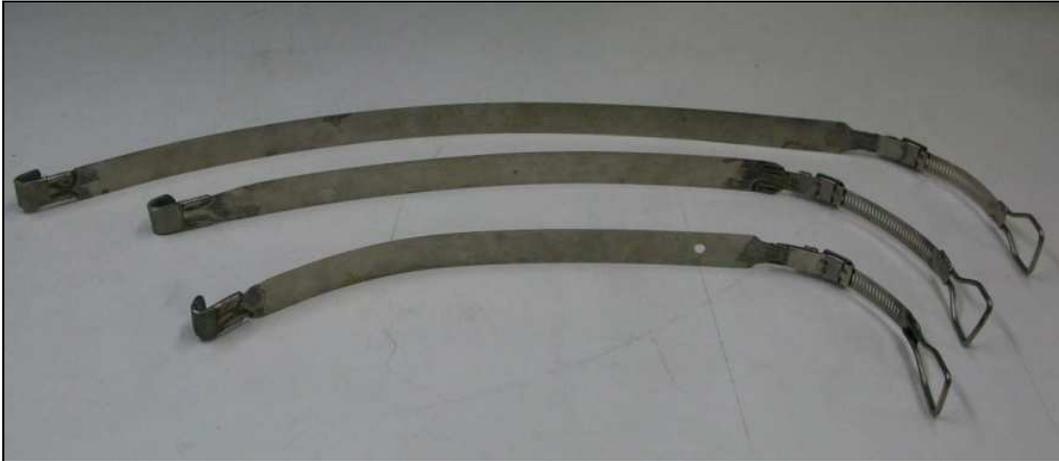


Figura 2. 3 - Modelos de Colar Óptico.

O colar é fixado no *riser* com o auxílio de uma braçadeira metálica e duas fivelas. Um parafuso sem-fim é utilizado para tencionar o sistema com uma pré-carga. Esta carga pode também ser avaliada em termos do deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg dos sensores, geralmente sendo na ordem de 1 nm a partir da posição relaxada. As deformações circunferenciais incrementais no Colar passam a ser registradas a partir deste valor pré-deformado.

Os primeiros testes com o Colar Óptico foram realizados em laboratório (COPPE-UFRJ) com dois sistemas independentes posicionados próximos aos conectores do *riser* fixados na máquina de ensaios. Entalhes eram então introduzidos artificialmente nos arames para acelerar sua ruptura durante ciclos de carregamento. A força máxima aplicada na amostra analisada foi de 100 t, limitada pela capacidade da célula de carga do equipamento de tração. O monitoramento contínuo da variação do diâmetro dos dutos flexíveis vai apresentar resultados satisfatórios quando o tempo de duração do experimento for suficiente para ocorrer o escorregamento de eventuais arames rompidos. Porém, nestes ensaios em laboratório não houve tempo suficiente para que este escorregamento ocorresse, logo não foram observadas variações abruptas no diâmetro da capa polimérica no ensaio realizado na COPPE, que, entretanto serviu para avaliar a resolução do colar óptico, que mostrou-se capaz de medir variações da ordem de 0,002% no diâmetro da capa (deformações circunferenciais de 20 $\mu\text{m}/\text{m}$).

Uma segunda etapa de testes foi executada diretamente em campo, numa plataforma de produção de petróleo operada pela Petrobras na Bacia de Campos. A descrição completa da instalação e os resultados obtidos em campo são discutidos na Seção 3.1.

O sinal característico desta técnica de monitoramento ainda não foi bem definido, pois nos dois testes realizados não houve tempo suficiente para observar variações do diâmetro do duto esperadas quando há rompimento de arames. Porém, no teste de campo comprovou-se a alta sensibilidade do equipamento quando o sinal óptico foi comparado com os dados de pressões operacionais no duto.

2.1.2. Band-Aid

Este método de monitoramento óptico tem como objetivo a análise direta e contínua das deformações da capa polimérica dos *risers*, associando estas deformações com rupturas nos arames da armadura de tração. Devido ao posicionamento dos sensores, o sistema é capaz de medir as deformações axiais, circunferenciais e torsionais. O Band-Aid é composto por cinco redes de Bragg distribuídas sobre uma mesma fibra óptica. A configuração das redes deste sistema é ilustrada na Figura 2.4.

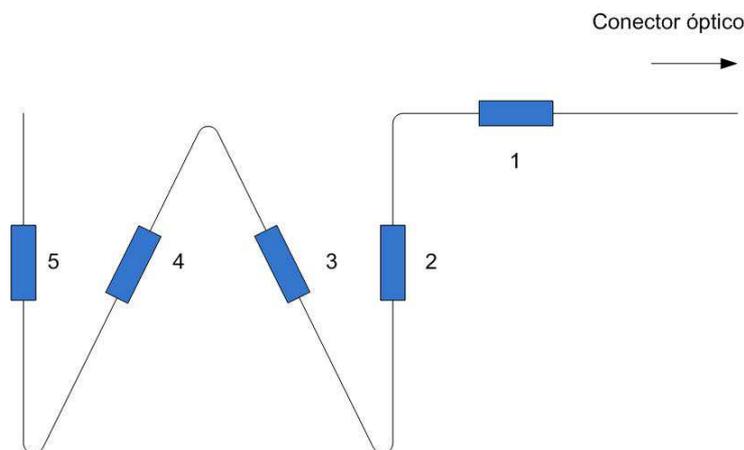


Figura 2. 4 - Esquema de sensores no Band' Aid.

As redes de número 5 e 2 têm como função registrar as deformações axiais da amostra (ϵ_x). As deformações angulares (ϵ_θ) são monitoradas pelas redes coladas a 45° (redes nº 3 e nº 4). Por fim, o sensor de número 1 mede a deformação circunferencial (ϵ_y) da capa polimérica neste ponto. Com o auxílio da equação 3.1 pode-se estimar a deformação cisalhante (γ_{xy}) sofrida pela amostra. Como se trata de uma técnica de monitoramento pontual, o melhor local para a instalação deste sistema, tanto em plataformas como em teste, é próximo ao conector, pois a experiência de campo tem mostrado que este é o local onde ocorrem os maiores níveis de torção no *riser* com arames rompidos.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} (\cos 2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2} (\sin 2\theta) \quad (3.1)$$

Esta equação é pontual, desta forma, para obter-se uma boa aproximação, os sensores foram ordenados o mais próximo possível um do outro. Cabe, entretanto ressaltar que o objetivo da técnica de monitoramento não é a medida quantitativa das deformações. O objetivo é detectar variações nos níveis de deformação da capa associadas com rupturas de arames da armadura de tração.

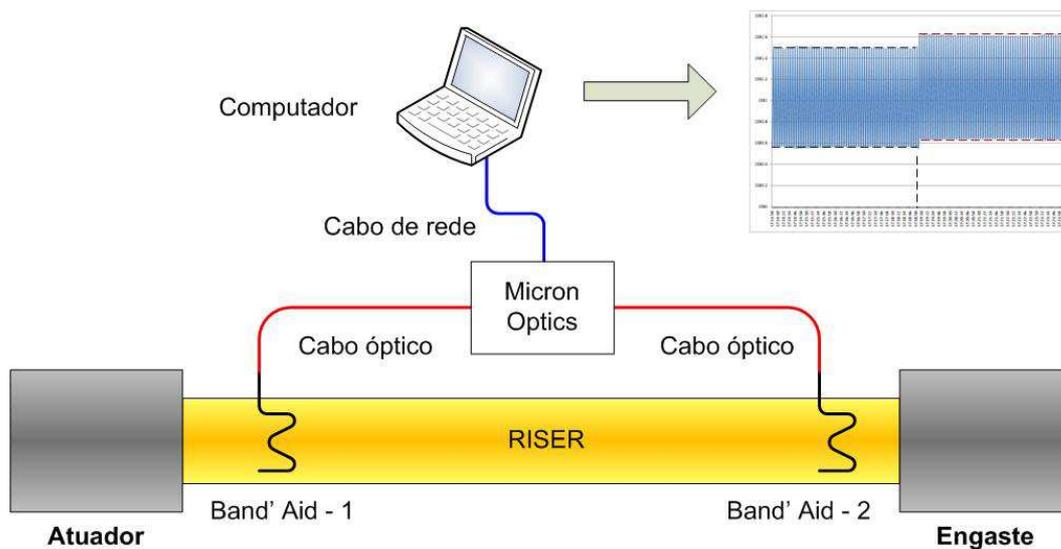


Figura 2. 5 - Esquema de teste do Band-Aid em uma amostra de *riser*.

A Figura 2.5 representa um fluxograma padrão de uma típica instalação do sistema Band-Aid. Normalmente, os sensores são instalados próximos às extremidades da amostra. O equipamento de aquisição de dados utilizado é o mesmo empregado pelos outros sistemas de monitoramento desenvolvidos neste trabalho.

Ao longo do período de desenvolvimento do Sistema Band-Aid, foram introduzidas algumas alterações nos procedimentos de colagem dos elementos sensores sobre a capa polimérica. O primeiro modelo do Band-Aid foi testado em uma amostra de flexível com seis polegadas de diâmetro externo. Os testes foram realizados no dia 06/02/2009 no Laboratório de Tecnologia Submarina da UFRJ. Neste teste foram instalados dois conjuntos do sistema, sendo um colado diretamente na capa polimérica e o outro colado sobre uma fita adesiva de poliimida. Os resultados detalhados serão apresentados na seção 3.3. Os sensores colados sobre a fita adesiva de poliimida não apresentaram resultados satisfatórios devido à alta histerese. O outro conjunto teve um desempenho

melhor durante o teste, respondendo bem às rupturas dos arames. Porém, devido à fragilidade das fibras ópticas, a colagem dos elementos sensores diretamente na superfície da capa polimérica sem uma proteção adequada não é recomendada.

No segundo teste, realizado no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF – UFRGS/RS), o sistema sofreu uma pequena mudança. Para dar mais resistência aos sensores, as redes de Bragg foram coladas sobre uma lâmina metálica de 0,5 mm de espessura. Foram instalados dois sistemas com a chapa metálica e um direto na capa para comparar os resultados. Os três conjuntos podem ser observados na Figura 2.6. Os resultados deste teste serão apresentados de forma mais detalhada na seção 3.4. Todos os três sistemas foram capazes de monitorar as deformações na capa polimérica durante as rupturas dos arames. Porém os dois Band-Aids com a lâmina metálica apresentaram problemas com o decorrer do teste. A resina utilizada na colagem não resistiu aos carregamentos e com o passar do tempo sofreu descolamento levando os sensores a falharem.

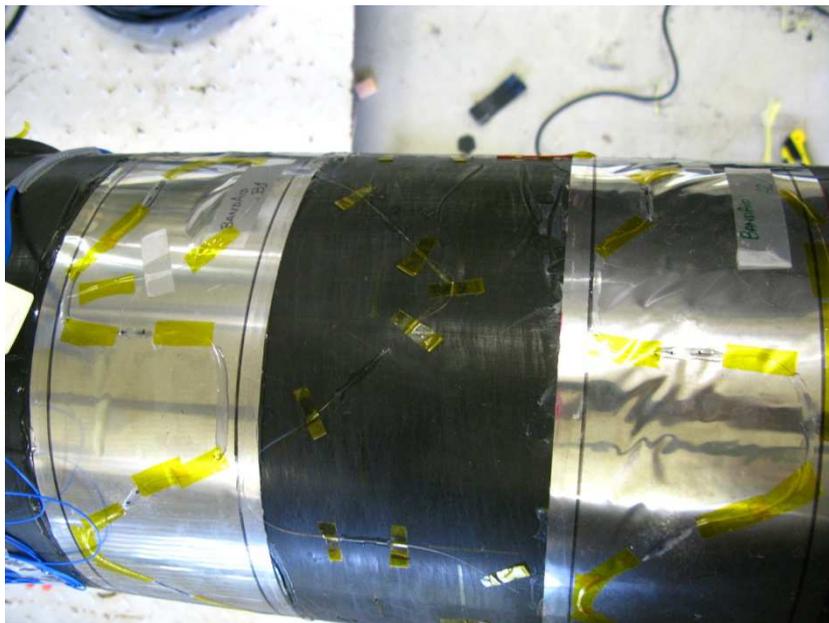


Figura 2. 6 - Instalação do sistema Band' Aid no teste realizado no LAMEF-UFRGS.

O terceiro teste, também realizado no LAMEF/UFRGS, apresentou características bem distintas dos dois testes anteriores. A configuração dos sensores foi mantida, porém ocorreu uma redução de escala. Isto se deu, pois, como foi explicado no início desta seção, a equação 3.3 é válida somente para as deformações de um elemento infinitesimal. A nova disposição das redes foi elaborada procurando aproximar todos os sensores de um mesmo ponto.

Obviamente isto não foi possível e a Figura 2.7 apresenta a melhor configuração que foi capaz de ser implementada.

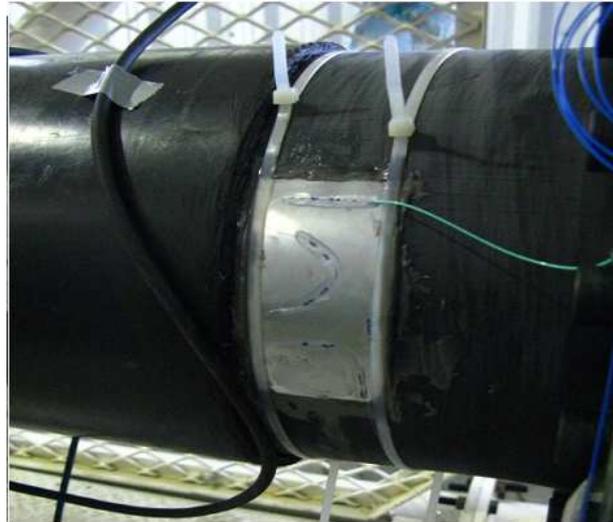


Figura 2. 7 - Segundo protótipo do sistema Band' Aid.

O sinal de resposta apresenta características bastante singulares. Durante os ensaios notou-se que a ruptura dos arames provoca uma descontinuidade em forma de degrau no sinal dos sensores. Este degrau aparece devido à deformação torsional a qual o *riser* foi submetido após a ruptura do arame. Dependendo do referencial ocorre o decaimento no nível do sinal, como na Figura 2.8, ou o incremento do mesmo. Nota-se que a amplitude de deformação provocada pelo carregamento da amostra é mantida constante variando apenas o patamar da deformação média.

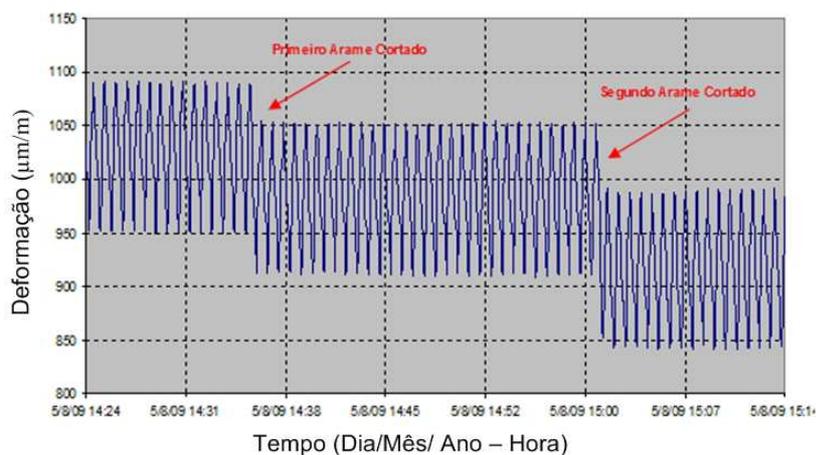


Figura 2. 8 - Exemplo de sinal característico obtido pelo sistema Band' Aid no instante da ruptura do arame

2.1.3. Colar 3D

Nesta seção será apresentado o último método indireto de monitoramento desenvolvido. Esta técnica começou a ser concebida em meados de agosto de 2009 e consiste na união dos melhores aspectos das duas técnicas anteriores (Colar Óptico e Band-Aid). Trata-se de sensores ópticos instalados sobre a capa polimérica que monitoram as deformações axiais, circunferenciais e angulares. As redes de Bragg que monitoram as deformações circunferenciais são posicionadas sobre uma lâmina metálica, seguindo o mesmo conceito do Colar Óptico (seção 3.1), de forma que seja possível o monitoramento de variações no diâmetro da amostra. Sobre a capa do duto foram colados os sensores de monitoramento longitudinal e angular. Para estes sensores foram utilizadas redes de Bragg inseridas em uma fina camada de poliimida colada diretamente sobre a capa polimérica utilizando a resina epóxi, Araldite AV 138 com o Endurecedor HV 998.

Na Figura 2.9 observa-se o fluxograma deste sistema de monitoramento, com a amostra de *riser* instalada na máquina de tração. Esta configuração de instalação foi utilizada nos dois últimos testes. Normalmente nos experimentos são instalados mais de um conjunto de sensores, avaliando o sinal de resposta do sistema em cada ponto da amostra. Os principais locais de instalação são próximos aos conectores da máquina de tração, pois é o local onde o corpo de prova sofre maior esforço e com isso, os principais pontos de falhas dos arames. O conjunto é composto de três redes coladas na capa polimérica, sendo duas inclinadas monitorando principalmente o efeito da torção, e uma longitudinal. Ao lado instala-se uma lâmina metálica com dois ou mais sensores colados. Todos os conjuntos de sensores instalados sobre a amostra são monitorados por apenas um interrogador óptico (sm125).

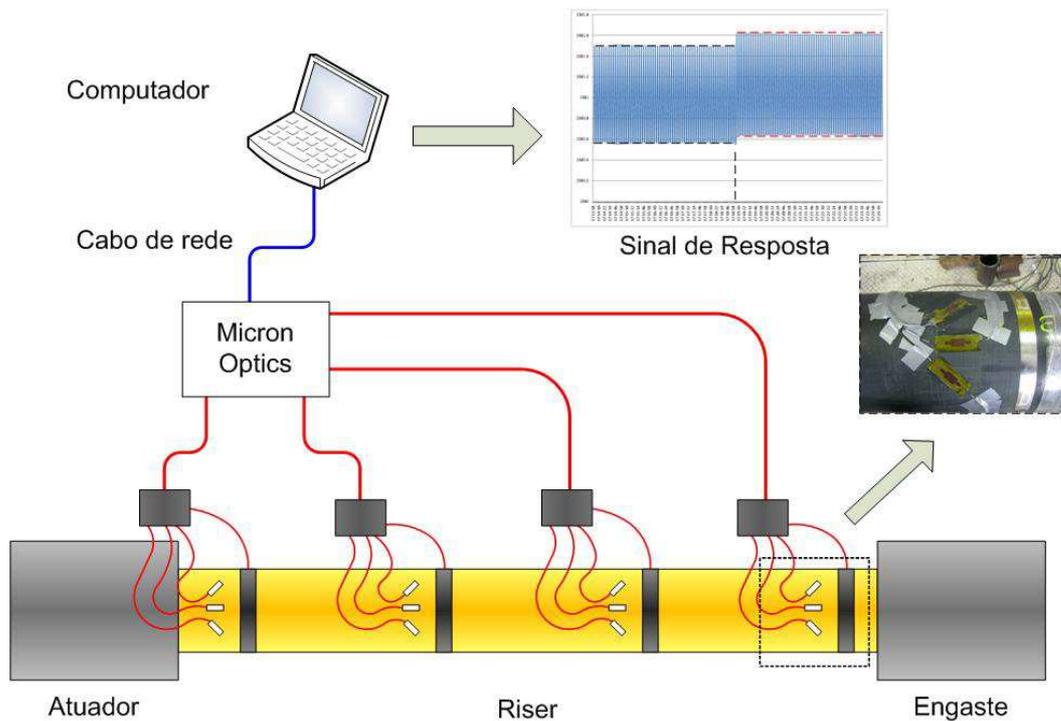


Figura 2. 9 - Fluxograma de instalação do Colar 3D em um dos testes em escala real.

Na Figura 2.9 observa-se o fluxograma da instalação do sistema Colar 3D utilizado nos últimos dois testes estudados neste trabalho. Foram posicionados quatro conjuntos de sensores ao longo da amostra. As redes de Bragg de cada conjunto foram ligadas entre si por meio de emendas ópticas fazendo com que cada Colar 3D fosse ligado em um canal do equipamento de leitura utilizado. No esquema as linhas em vermelho representam os cabos ópticos e a linha em azul representa o cabo de rede que liga o interrogador sm-125 ao computador.

A Figura 2.10 apresenta a instalação deste sistema de monitoramento utilizado em um dos testes descritos na seção 3.6. Nota-se claramente os sensores angulares colados diretamente sobre a capa do duto flexível e, ao lado, a lâmina metálica com a rede responsável pelo monitoramento da variação no diâmetro.



Figura 2. 10 - Colar 3D instalado no teste JOIA.

Esta técnica foi utilizada nos dois últimos testes estudados na seção 3. Os dois testes tiveram características similares e serão apresentados detalhadamente nas seções 3.6 e 3.7. O sinal de resposta proveniente dos sensores colados direto na capa do duto é semelhantes aos sinais obtidos pelo sistema Band-Aid, onde é identificada a torção da amostra no momento do rompimento de um arame. Já o sinal óptico do monitoramento da variação do diâmetro não pode ser registrado durante os testes uma vez que em nenhum ensaio houve tempo suficiente para o escorregamento do arame que provocaria deformações significativas na capa. Porém, como este sensor assemelha-se muito ao sistema Colar Óptico, acredita-se que em uma futura instalação no campo o sinal deva ser compatível com o Colar já instalado em uma plataforma operando na Bacia de Campos, detalhado na seção 3.1.

2.2. Monitoramento óptico direto no arame (MODA)

O sistema *MODA* consiste na instalação de sensores ópticos (redes de Bragg) diretamente na superfície de cada arame que compõe a armadura externa de tração do duto flexível. Dessa forma pode-se registrar de forma direta e contínua a deformação a qual cada um dos arames está submetido. Cabe ressaltar que quando o sistema é instalado num *riser* em operação, ele registra deformações incrementais, tomando por base as deformações pré-existentes no duto no momento da instalação. Esta técnica de monitoramento permite o acompanhamento da integridade dos arames e a detecção de rupturas.

Para se ter acesso à camada de arames, é necessária a retirada de parte da capa externa. Isto ocorre por meio da abertura de janelas distribuídas em torno de uma seção transversal do *riser*. O número e o tamanho das janelas variam de acordo com as características de cada duto, tais como área do arame, inclinação, número de arames e etc. Nos primeiros testes realizados, utilizaram-se quatro janelas igualmente espaçadas a 90°. Porém, notou-se que desta forma a área da seção transversal da capa externa apresentava significativa redução. Deste modo, nos testes mais recentes utilizou-se um número reduzido de janelas, duas ou até mesmo apenas uma. A geometria das janelas deve ser projetada para que todos os arames que compõem a armadura fiquem expostos.

Esta técnica pode detectar rupturas, por meio do registro fornecido pelos sensores, no momento de alívio da tensão no arame rompido. Quando a amostra é submetida a um carregamento de tração, todos os arames apresentam uma tensão uniformemente distribuída. A deformação de cada fio é captada por seus respectivos sensores. Desse modo, quando algum deles rompe, a tensão no mesmo cai abruptamente. Esta variação detectada é processada por meio de um software apropriado, que gera gráficos capazes de identificar quando e qual arame falhou. Como uma consequência do rompimento de um arame, a carga que à qual ele deixa de resistir é repartida entre os arames mais próximos

O software FIBRAX foi desenvolvido pelo Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio com o objetivo de realizar a interpretação gráfica dos dados de monitoração obtidos dos sensores de fibra óptica colados nos arames da armadura de tração. A interface visual foi implementada buscando permitir o aumento da percepção de pequenas variações entre os arames que, em um teste ou em uma instalação real, podem ser associadas a um dano na armadura. Os valores da variação do comprimento de onda dos sensores, obtidos através do interrogador óptico, são convertidos para valores de deformação de acordo com a relação mostrada na seção 2.3. A cada valor de deformação é associada uma cor, gerando uma escala e um mapa de deformação que facilita a visualização de falhas. A Figura 2.11 apresenta um mapa de deformação gerado durante o segundo teste no Laboratório de Tecnologia Submarina da UFRJ (LTS/Coppe-UFRJ). O eixo vertical do gráfico identifica o arame monitorado. O eixo horizontal representa o tempo de monitoramento. Nota-se que escala de cor varia de acordo com o nível de deformação em cada arame (em $\mu\text{m/m}$).

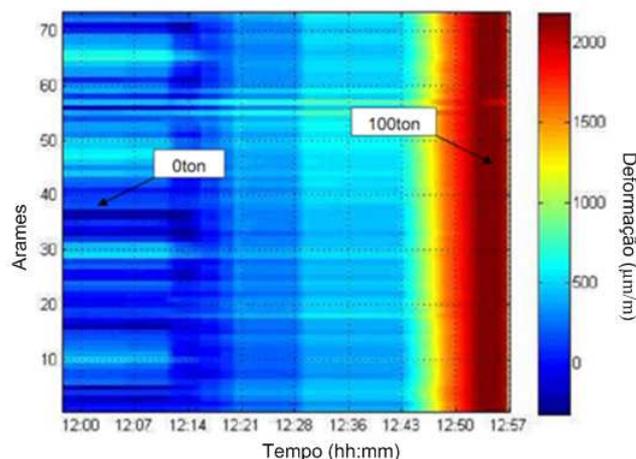


Figura 2. 11 - Mapa do nível de deformação dos arames em escala de cor.

Dependendo das características de cada *riser* a ser analisado, é desenvolvido um projeto óptico específico. Normalmente avalia-se a largura do arame, o ângulo de hélice e, principalmente, a quantidade de arames. A análise inicial destes parâmetros é necessária para definir o espaçamento e a quantidade de redes de Bragg por conjunto de fibra óptica. Em geral utilizam-se quatro conjuntos ópticos para instrumentar todos os arames de uma amostra. Como se trata de sensores multiplexados sobre a mesma fibra é necessário que cada rede tenha um comprimento de onda diferente. Estes são, normalmente, alinhados em ordem crescente de acordo com o lado de entrada da luz. Muitas vezes utiliza-se um grande número de sensores multiplexados em uma mesma fibra. Geralmente, em todo projeto óptico, a última rede do cordão é destinada a medir apenas a temperatura para assim se fazer as devidas compensações.

Uma vez cortada a capa polimérica, são retiradas as camadas de Kevlar[®] e de fitas adesivas atingindo-se assim à superfície dos arames. Em seguida é feita a remoção dos vestígios de oxidação e a limpeza de cada arame para garantir uma melhor fixação dos sensores. Nos testes e instalações realizados, as redes de Bragg foram coladas com a utilização de um adesivo à base de cianoacrilato (Loctite 460), posteriormente cobertos com uma camada de resina de silicone para proteção. No momento, encontra-se em curso no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica um estudo para definição do adesivo a ser utilizado nas próximas instalações do sistema. Cada sensor é posicionado sobre o eixo axial do arame e paralelo ao mesmo. Assim como na colagem de extensômetros elétricos resistivos, podem ocorrer eventuais erros de posicionamento, gerando assim erros nas medidas finais. Desta forma os sensores são calibrados antes do início dos testes. Deve-se ressaltar que em campo, os níveis de deformação

incrementais são muito pequenos (instalação com arames pré-deformados), da ordem de poucas centenas de microstrains, de forma que problemas de histerese na cola são minimizados. Na Figura 2.12 observa-se um exemplo de janela aberta na capa polimérica. O *riser* da imagem foi testado em um laboratório da Universidade Federal do Rio de Janeiro e os resultados estão apresentados na seção 3.3. A Figura 2.13 mostra o detalhe das redes de Bragg coladas sobre os arames.



Figura 2. 12 - Exemplo de janela aberta sobre a capa polimérica.



Figura 2. 13 - Rede de Bragg instalada sobre o arame.

Depois de instalados os sensores, os conjuntos ópticos são conectados ao equipamento de aquisição de dados. O sistema é monitorado por um computador onde todos os dados gerados no decorrer do teste são salvos. Posteriormente os dados armazenados podem ser tratados em softwares tais como Microsoft Excel. O monitoramento pode ser feito em tempo real por meio do software Fibrax. A Figura 2.14 demonstra o fluxograma do sistema *MODA*.

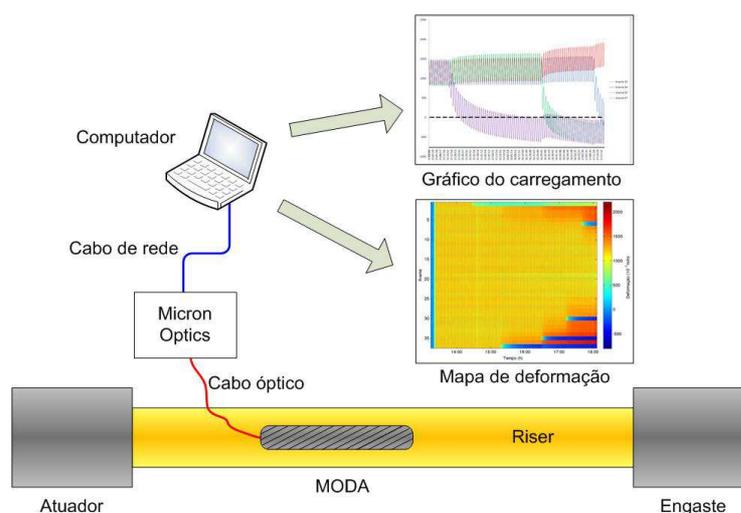


Figura 2. 14 - Fluxograma do sistema *MODA*.

Após a instalação dos sensores e a verificação do sinal no computador, é feito o reparo com fitas sobre a janela. Para que os arames, expostos na janela, permaneçam protegidos contra a corrosão é imprescindível a recuperação da camada polimérica do *riser*. Nos testes realizados, o *MODA* foi instalado de acordo com procedimento PETROBRAS PO-07D (*Norma para Reparo da Camada Polimérica do Riser*). Verificou-se que o procedimento não compromete o sistema de monitoramento.

Para a instalação do reparo, primeiramente a janela toda deve ser coberta com uma graxa grafitada para proteger os cordões ópticos evitando que as fitas de reparo colem nas fibras ópticas. Posteriormente recobre-se a janela com uma camada dupla de fita anti-corrosiva para manter os arames isolados evitando a corrosão dos mesmos, sobre esta se aplica uma camada dupla de fita filamentosa que fornece resistência mecânica ao reparo. Por fim enrola-se novamente uma camada dupla de fita anti-corrosiva. Desta maneira é garantida a estanqueidade da camada polimérica e a integridade do sistema de monitoramento instalado. A Figura 2.15 apresenta a janela preenchida com graxa e na Figura 2.16 o *riser* de teste com o reparo utilizado no teste da seção 3.1.



Figura 2. 15 - Preenchimento da janela com graxa.



Figura 2. 16 - Amostra com reparo.