

1 Introdução

A exploração de petróleo no mar, comumente conhecida como indústria *offshore* de petróleo, iniciou-se por volta da década de 50 no Golfo do México. O desenvolvimento da produção *offshore* fez-se, em grande medida, a partir de plataformas fixas. Essa tecnologia foi desenvolvida entre as décadas de 30 e 50, primeiro na Venezuela e depois no Golfo do México. Desde então o descobrimento de novas jazidas de hidrocarbonetos no mar está ocorrendo em águas cada vez mais profundas, nas principais zonas produtoras do Golfo do México, Mar do Norte, África, América do Sul e Ásia. Portanto, o aumento do potencial de produção de petróleo requer que se desenvolvam tecnologias capazes garantir a produtividade em grandes profundidades.

Em meados da década de setenta a Petrobras iniciou a exploração de petróleo em alto mar. Em 1969 foi descoberto o campo de Guaricema, em Sergipe e em 1974 iniciou-se a produção de óleo no campo de Garoupa, seguido pelos campos de Marlim, Albacora, Barracuda e Roncador, na Bacia de Campos (maior zona produtora do país).

No ano de 2002 a Petrobras iniciou um processo exploratório por toda a costa brasileira, desde a Bacia de Santos até Alagoas. A partir daí, que em 2003 foram descobertos novos reservatórios contendo volumes expressivos de petróleo de excelente qualidade, gás natural e condensado, mudando assim o perfil da Companhia no cenário internacional.

Em 2006, com a entrada em operação da plataforma P-50, situada no campo de Albacora Leste na Bacia de Campos, o Brasil atingiu a auto suficiência na produção de petróleo [3]. Com essa conquista a Petrobras passou a produzir cerca de 0,2 milhões de barris a mais do que a demanda interna diária. Este fato junto com as grandes descobertas de petróleo na camada de pré-sal rendem a Petrobras o título de líder mundial em tecnologia de exploração de óleo em águas profundas.

Nos dia de hoje, dados afirmam que cerca de 70% das reservas de hidrocarbonetos conhecidas no Brasil estão situadas em águas profundas ou ultra-profundas. Este fato, associado com o crescente aumento na demanda por produtos derivados de petróleo e gás, impõe novos desafios para a indústria de

exploração e produção de óleo. Com as perspectivas de novas descobertas em águas profundas e ultra-profundas aumenta a demanda por novas tecnologias associadas aos dutos flexíveis. A Figura 1.1 indica a evolução da exploração de petróleo em águas profundas no Brasil.

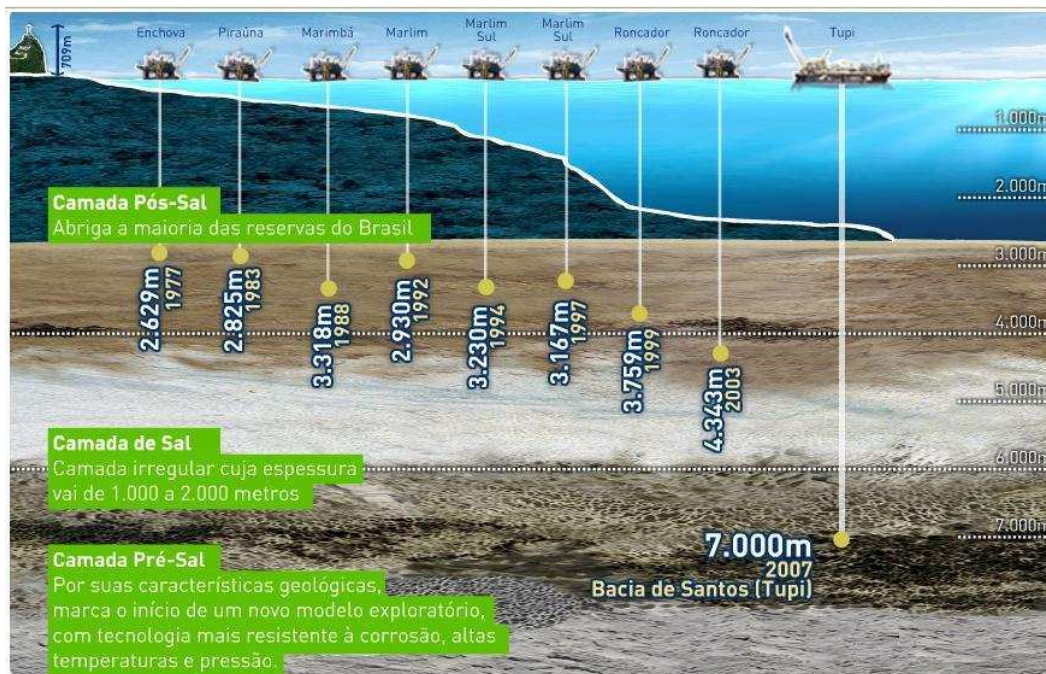


Figura 1. 1 - Desenvolvimento de indústria offshore até o ano de 2007. (Diário do Pré-Sal).

Devido às condições extremas presentes nos campos de produção marítima, estruturas e equipamentos operam próximos aos seus limites. Desta forma, os dutos flexíveis podem, eventualmente, apresentar problemas de integridade estrutural. Falhas na estrutura dos dutos podem provocar prejuízos na produção, acidentes com vítimas fatais e até desastres ambientais graves, como o derramamento de óleo bruto no mar.

Um dos principais modos de falha dos dutos flexíveis em trechos de *riser* tem sido o rompimento dos arames das armaduras de tração. Atualmente a inspeção dos mais de dois mil *risers* operando na Bacia de Campos consiste no monitoramento visual da capa externa e da pressão de gás no anular do tubo. Normalmente, quando alguma falha é detectada, o *riser* precisa ser re-terminado, esse processo envolve elevados custos operacionais. Diante de tais fatos, fica evidente a necessidade do desenvolvimento de técnicas de medição e monitoramento contínuo dos equipamentos, com a finalidade de detectar possíveis rupturas dos arames das armaduras de tração e prevenir falhas catastróficas.

Como será observado no capítulo seguinte, uma das principais mecanismos de falhas nos dutos flexíveis é o rompimento dos arames da sua armadura de tração. Até o presente, a maneira mais usual de verificar a ocorrência deste tipo de falha tem sido através de inspeção visual das grandes deformações ou distorções que surgem na capa externa do *riser* provocadas pelo escorregamento dos arames rompidos. Esta técnica naturalmente apresenta resultados muito imprecisos e muitas vezes tardios, e conseqüentemente há a necessidade de disponibilizar para os operadores de flexíveis técnicas mais avançadas e com maior conteúdo tecnológico para o monitoramento de *risers*. Algumas das técnicas correntemente em desenvolvimento são listadas abaixo:

- Emissão acústica;
- Monitoramento de vibração;
- Monitoramento com câmeras de televisão,
- Técnicas magnéticas;

A técnica a ser abordada neste trabalho, envolve o monitoramento contínuo dos dutos flexíveis, mais especificamente *risers*, com fibras ópticas instrumentadas com sensores de deformação e temperatura baseados em redes de Bragg. No trabalho serão apresentadas duas técnicas de monitoramento utilizando sensores a fibra óptica, uma direta e outra indireta.

Levando-se em conta que a capa polimérica do *riser* sofre deformações em consequência da ruptura e escorregamento dos arames rompidos nas camadas externa ou interna da armadura de tração, desenvolveu-se neste trabalho uma técnica de monitoramento baseada na medida de pequenas deformações na capa utilizando sensores a fibra óptica: o Colar Óptico. Esta técnica foi desenvolvida em duas fases. Inicialmente eram medidas apenas deformações circunferenciais associadas com a variação localizada no diâmetro da capa do *riser*. Entretanto, resultados de laboratório indicaram que deformações longitudinais e torsionais da capa poderiam aumentar a capacidade de detecção de rupturas nos arames das armaduras. Um sistema incorporando estas medidas foi implementado e testado em laboratório com sucesso. Este sistema foi batizado Colar Óptico 3D (três deformações).

O monitoramento através do colar óptico é uma técnica de fácil implementação e baixo custo. Apesar de apresentar bons resultados como será demonstrado a seguir, ainda se trata de um método indireto de monitoramento, sujeito a limitações que serão explicitadas no corpo desta dissertação. Como alternativa, uma segunda técnica de monitoramento foi proposta.

Batizada MODA (Monitoramento Óptico Direto no Arame), como o nome já deixa claro, esta técnica baseia-se na medida contínua das deformações nos arames que constituem a camada externa da armadura de tração do duto flexível. A detecção do rompimento do arame se dá pela observação de variações significativas nos níveis de deformação após a falha. O sucesso nos testes de laboratório em escala real, descritos nesta dissertação, motivou a Petrobras, patrocinadora do trabalho, a instalar três sistemas MODA em plataformas da Bacia de Campos.

1.1. Organização do trabalho

Neste capítulo, na Seção 1.2, será apresentado o conceito de duto flexível, explicando de forma detalhada sua estrutura e a função de cada uma de suas camadas. Outro ponto importante abordado nesta seção é o histórico de falhas em *risers*. Na Seção 1.3 serão apresentadas as características das fibras ópticas, como as principais vantagens de aplicá-las na exploração de petróleo. Em seguida, nesta mesma seção será explicado o funcionamento das redes de Bragg como elemento sensor. Em 1.4 outras técnicas de monitoramento serão apresentadas.

No capítulo 2 são apresentadas e explicadas as três técnicas de monitoramento estudadas neste trabalho. Em 2.1 será apresentado o Colar Óptico de forma detalhada, mostrando os conceitos básicos, o método de instalação e o sinal característico de resposta. O mesmo será feito em 2.2 e 2.3 para o Colar 3D e o MODA respectivamente.

Os testes e os resultados serão apresentados no capítulo 3. Foram realizados testes em laboratório com diferentes amostras de dutos flexíveis e diferentes técnicas de monitoramento. Cada seção apresentará um teste com seus respectivos resultados. Os testes realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina da UFRJ foram acompanhados pessoalmente e todos os eventos foram registrados em um relatório. Os testes realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAMEF – UFRGS/RS) foram acompanhados de forma remota por meio de remoto via internet. Finalmente, no capítulo 4, são apresentadas discussões finais a respeito de todos os resultados obtidos, e as conclusões extraídas dos mesmos.

1.2. Dutos Flexíveis

A utilização de dutos flexíveis para o transporte de fluidos através de ambientes marítimos não é recente. Na segunda Grande Guerra um modelo de duto muito similar aos atuais foi instalado no canal da mancha para transporte de combustível para as tropas aliadas. Esta operação ficou conhecida pelo nome P.L.U.T.O. (Pipe Line Under The Ocean). O duto flexível utilizado era denominado HAIS (Nome do chefe da companhia de óleo anglo-iraniana que o projetou). A Figura 1.2 mostra as camadas do tubo HAIS que apesar de se assemelhar muito com os flexíveis de hoje possui algumas diferenças como, por exemplo, a utilização de apenas uma armadura de tração e a camada interna de chumbo [2].



Figura 1. 2 - Detalhe das camadas do tubo HAIS utilizado na Segunda Guerra Mundial.

Os tubos flexíveis modernos começaram a ser estudados e desenvolvidos na década de sessenta, principalmente pelo Instituto Francês de Petróleo (*Institut Français Du Pétrole* – IFP) visando seu emprego na perfuração de poços. Este desenvolvimento levou à criação da *Coflexip* que hoje em dia faz parte do grupo *Technip* e é uma das principais fornecedoras de dutos flexíveis para a indústria *offshore* de petróleo.

Porém, apenas na década de setenta os dutos flexíveis passaram a ser utilizados em águas brasileiras pela Petrobras no desenvolvimento da Bacia de Campos. Os primeiros dutos dinâmicos foram instalados nos sistemas antecipados de Garoupa Namorado e Enchova Leste Fase I. Com a grande utilização de sistemas de produção flutuante, tais como as plataformas semi-submersíveis e os FPSO's (*Floating Production Storage and Offloading*), o mercado de dutos flexíveis cresceu rapidamente no Brasil. Hoje em dia os *risers* e os *flowlines* são utilizados em quase todos os campos de produção de petróleo

brasileiros em águas profundas. Seus diâmetros podem variar de 2,5 pol até 18 pol operando com pressões que podem chegar a 6700 psi. [11]. Dados da Petrobras indicam que nos dias atuais existe uma rede de aproximadamente 7800 quilômetros de dutos flexíveis instalados, que representam um capital investido superior a dez bilhões de reais. Dentre estes a estatal opera cerca de 1200 dutos em trechos de *riser*.

Dependendo da aplicação, o duto flexível recebe um nome específico, porém sua estrutura é basicamente a mesma. Para o trecho de elevação, que liga a plataforma aos terminais submarinos o duto denomina-se *riser*. Para a seção que liga os poços aos terminais submarinos (*manifolds*) são chamados de *flowline*. Existem outros modelos de dutos flexíveis usados na produção marítima de petróleo, são os chamados umbilicais. Estes dutos são usados para acionar os equipamentos submersos por meio do transporte de linhas hidráulicas, elétricas e ópticas. Esta diferenciação fica clara quando se analisa o esquema representado na Figura 1.3. Em poços marítimos de media ou grande profundidade não é possível a utilização de plataformas de produção fixas. Desta forma, devido à deriva das unidades de produção flutuantes junto com as correntes marítimas, os *risers* estão em constante movimento de flexão, tração e torção. Tais esforços associados ao tempo de uso fazem com que a integridade estrutural de muitos dutos esteja chegando próxima a sua vida útil de projeto. Assim, a detecção do aparecimento e crescimento de um dano na estrutura tornou-se uma preocupação muito significativa.

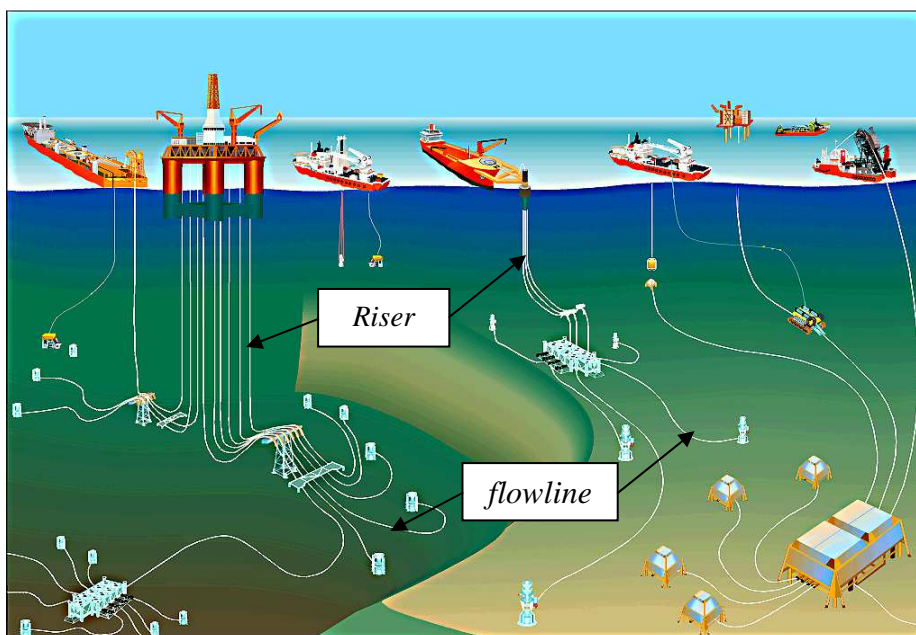


Figura 1. 3 - Esquema utilizando *risers* e *flowlines*. (Curso Geraldo Spinelli – PUC-Rio).

1.2.1.1. Estrutura de Riser

Os dutos flexíveis são estruturas compostas, constituídas por camadas concêntricas de materiais com diferentes composições. Esta estrutura tem por objetivo combinar a funcionalidade de cada uma de suas camadas. Na Figura 1.4 observa-se a estrutura tipicamente utilizada em *risers* flexíveis.

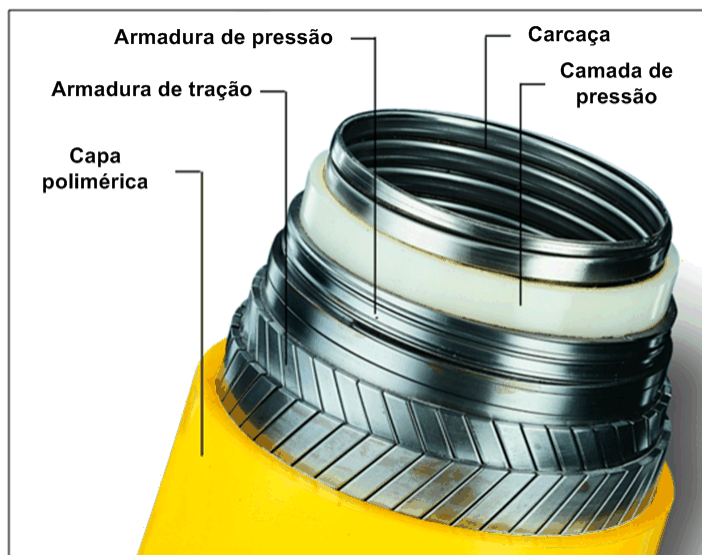


Figura 1. 4 - Camadas de um *riser* padrão. [3].

1.2.1.2. Carcaça

A carcaça interna de aço se faz presente na estrutura do duto quando o fluido interno possuir gás na sua constituição. É formada por uma fita metálica de aço inoxidável, enrolada em espiral e intertravada. Um perfil tipo desta camada pode ser observado na Figura 1.5. A principal função da carcaça é prevenir o colapso da camada de pressão quando ocorrer algum dano em outras camadas do duto ou quando ocorrer a difusão de gás. O anular do duto flexível é definido como o espaço radial que vai do diâmetro externo da camada de pressão ao diâmetro interno de uma camada estanque subsequente que normalmente é a camada externa do duto. [2,3,11].

Esta camada apresenta ainda outras funções estruturais tais como resistir a cargas radiais geradas pela armadura de tração quando o duto esta submetido à tração.

Devido ao fato da carcaça estar em contato direto com o fluido interno, os materiais mais utilizados para esta camada são os aços inoxidáveis, tais como AISI 304, AISI 304L, AISI 316L, dentre outros.



Figura 1. 5 - Detalhe da Carcaça

1.2.1.3. Camada de pressão

A camada de pressão consiste em um material termoplástico extrudado sobre a carcaça interna. Usualmente o material pode ser composto de polietileno, *Rilsan* (Poliamida 11) ou *Coflon*, dependendo da compatibilidade com a constituição do fluido interno. Tal camada tem como principais funções garantir a estanqueidade interna do duto assim como transmitir os esforços internos devido à pressão para a armadura de pressão e para a armadura de tração. [3,11].

1.2.1.4. Armadura de pressão

Existem três diferentes configurações para o perfil desta camada (perfis zeta, teta e psi). Porém o mais usual é o perfil zeta devido a seu baixo custo de fabricação. As demais configurações, só serão utilizadas em necessidades especiais ou quando se tornam economicamente viáveis. Seu perfil mais comum pode ser observado na Figura 1.6. Geralmente esta camada é fabricada em aço carbono, com um rigoroso controle de dureza para evitar danos devido à abrasão.

Esta camada tem como principais funções a resistência a esforços radiais devido a diversos fatores operacionais, tais como pressão interna e esforços causados pela armadura de tração. Outra importante função é fornecer resistência adicional à carcaça em caso de exposição desta camada à pressão externa, caso haja dano em alguma outra parte do duto. [3,11].

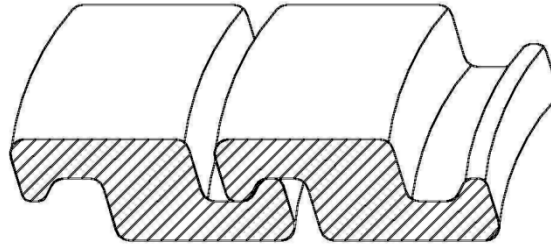


Figura 1. 6 - Detalhe da Armadura de pressão. [11]

1.2.1.5. Armadura de tração

Esta camada é o local onde atua o principal modo de falha estudado neste trabalho. Normalmente as armaduras de tração são compostas de camadas de arames, aplicadas em forma helicoidal ao longo de todo o comprimento do tubo. O número de camadas de arames utilizadas varia de acordo com o projeto, podendo variar apenas uma até quatro, dependendo da aplicação. Essas armaduras possuem um passo grande, de forma a obter uma melhor resistência a cargas axiais. Os ângulos de hélices normalmente variam entre 25 e 55 graus dependendo da aplicação do duto. [3,11].

O ângulo de hélice está estritamente ligado com a capacidade do duto de resistir à tração. Quanto maior for o ângulo, maior será a resistência a pressão interna e, de maneira oposta, quanto menor for o ângulo maior será a resistência à tração. Durante um esforço axial, a tendência da armadura é torcer, devido à disposição helicoidal dos arames. Para evitar que este fato comprometa o funcionamento das demais camadas do duto, a segunda armadura possui um ângulo de hélice oposto ao primeiro. Assim, se um duto possuir um ângulo de hélice de 25 graus na primeira armadura terá um ângulo de -25 graus na segunda. O ângulo de hélice é definido com relação ao eixo longitudinal do duto.

A geometria dos arames que compõe a armadura pode variar de acordo com as especificações de projeto. Normalmente utilizam-se arames com a secção transversal retangular. Assim como na armadura de pressão, o material utilizado nos arames da armadura de tração deve ser o aço carbono ou aço liga,

ABNT 1060 com resistência mecânica de 1400 MPa, [3], devido ao possível ambiente corrosivo presente no anular do duto flexível.

Os modelos de dutos flexíveis mais antigos não apresentavam a camada de pressão interna, com isso os arames possuíam altos ângulos de hélice, da ordem de 55 graus. Pois quanto menor o ângulo de disposição dos arames, em relação ao eixo longitudinal, maior será sua capacidade de auxiliar a estrutura a resistir a pressão interna. Durante o processo de fabricação desta camada, fitas adesivas são aplicadas sobre a armadura de tração para evitar o desalinhamento dos arames, como indicado na Figura 1.7.

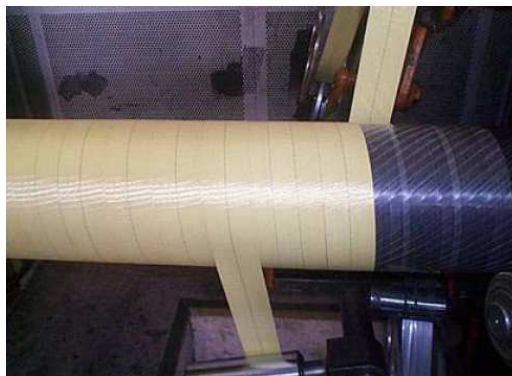


Figura 1. 7 - Detalhe da armadura de tração com a camada de fita adesiva.

1.2.1.6. Camada externa/Capa

A camada externa, ou capa, é fabricada com material plástico extrudado logo após as fitas utilizadas para manter os arames da armadura de tração alinhados. Esta camada pode ser utilizada como uma barreira externa à difusão do gás que se encontra confinado no anular do duto. A presença de gases pressurizados, provenientes da produção, no anular do duto pode ocasionar o aceleração da corrosão das armaduras de tração e pressão. Desta forma existem válvulas de alívio posicionadas nos conectores de extremidade do duto.

Sua principal função é vedar a entrada de água e outros materiais presentes no ambiente marinho (areia) e assim manter a integridade das camadas internas.

Normalmente esta camada não se mantém íntegra por toda a vida de um duto. Principalmente quando o campo petrolífero se encontra em ambiente marinho com presença de corais ou outros elementos capazes de danificar a capa polimérica do duto. Normalmente quando o duto é aplicado em ambiente desta natureza a capa polimérica pode ser projetada com uma dupla camada, de

forma que os problemas decorrentes da erosão possam ser minimizados. O material da camada externa depende do projeto e do tipo de duto flexível. Normalmente para *risers*, onde o efeito de abrasão entre o duto e o solo pode ser significativo, utiliza-se Poliamida (*Rilsan*), ou um tipo de polietileno (*TP-Flex*). Para *flowlines*, utiliza-se polietileno simples. [2,9].

1.2.1.7. Camadas auxiliares

Em algumas aplicações, quando o duto flexível opera em águas com baixas temperaturas, é necessária a utilização de uma camada de isolamento. A espessura e o tipo do material isolante são funções do nível de isolamento que se deseja para o duto. Os parâmetros básicos para definir o nível de isolamentos podem ser a temperatura de chegada do óleo na superfície assim como o tempo de resfriamento do óleo quando ocorre uma parada na produção. Outra finalidade do revestimento isolante é evitar a formação de ceras e hidratos, evitando assim paradas na produção para limpeza. Os principais materiais utilizados para o isolamento são o Carazite e Ecotherm. O critério de escolha do material deve levar em conta a temperatura de trabalho e a profundidade de operação.

1.2.1.8. Conector

Outro ponto importante na estrutura dos dutos flexíveis é o elemento de conexão entre o *riser* e a plataforma. O conector é um dos principais pontos críticos de falhas, devido ao processo de montagem. Atualmente não existe um consenso entre os fabricantes e os clientes sobre o projeto de montagem adequado. A montagem do conector é realizada de forma manual e modo que este processo pode gerar danos permanentes na armadura de tração. Os principais danos ocorrem devido ao calor e dobramento, alterando a micro estrutura do metal, manuseio de ferramentas, gerando trincas na superfície do arame, e a fixação desbalanceada da armadura de tração, podendo gerar uma diferença na distribuição de cargas dos arames. A Figura 1.8 demonstra a montagem do conector em laboratório, porém muitas vezes esta etapa deve ser realizada em campo demandando um alto custo operacional.



Figura 1. 8 - Montagem do conector em laboratório para a utilização do *riser* em teste.

1.2.1.9. Bend Stiffener

A região próxima ao conector é considerada o local de maior probabilidade de falha por fadiga na armadura de tração. Para minimizar os esforços dinâmicos próximos ao conector do *riser*, adiciona-se um elemento cônico enrijecedor composto de material polimérico denominado *Bend Stiffener*, que pode ser observado na Figura 1.9.



Figura 1. 9 - Bend Stiffener.

1.2.2. Tipos de falhas

Como foi dito anteriormente, na Introdução deste trabalho, a indústria *offshore* no mundo e principalmente no Brasil cresce de forma acelerada,

operando em lâminas d'água cada vez mais profundas. Desta forma os dutos flexíveis estão expostos a condições severas de trabalho devido a altas pressões e cargas axiais elevadas. Porém, não são apenas as condições externas que influenciam a vida útil dos dutos. Fluidos corrosivos extraídos junto com o petróleo podem provocar danos nas camadas internas. [2,3,16]

A Petrobras desenvolveu um estudo sobre os tipos de falhas que levam os *risers* a perderem sua funcionalidade. Este estudo resultou na Norma N-2409 que descreve os tipos de falhas e os locais de ocorrência. Como se trata de uma estrutura composta por vários materiais distintos, existem diversas possibilidades de falhas associadas à operação dos dutos flexíveis.

Atualmente as condições de operação dos *risers* no Brasil diminuem a ocorrência de diversos tipos de problemas. Além de pressões de operação relativamente baixas, os dutos mais novos possuem uma camada anti-atrito evitando o desgaste abrasivo entre camadas. Porém, o alto nível de tração faz com o principal ponto de falha apontado esteja localizado na armadura de tração, próximo ao conector do *riser*. O problema ocorre por causa da ruptura dos arames por fadiga devido ao movimento relativo e constante entre o *riser* e a plataforma.

A Figura 1.10 mostra um *riser* com os arames da armadura de tração rompidos no interior do conector. Neste local os arames apresentam uma maior concentração de tensão acelerando o processo de falhas locais. Outro aspecto importante que acarreta na fragilização dos arames da armadura de tração ocorre quando há a ruptura ou o desgaste da camada polimérica expondo os arames ao contato com soluções corrosivas (gases e água do mar), como pode ser observado na Figura 1.11.



Figura 1. 10 - Detalhe do rompimento do arame próximo ao conector. [16].

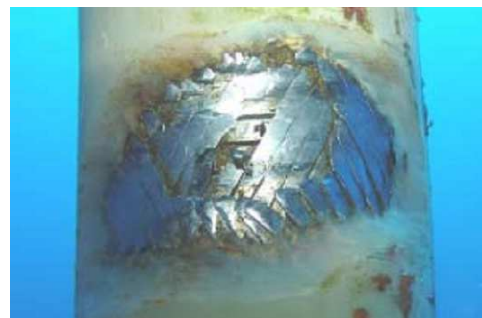


Figura 1. 11 - Detalhe do rompimento do arame devido à falha na capa polimérica. [16].

1.3. Conceitos básicos de fibras ópticas

Devido a condições extremas associadas à exploração de petróleo, principalmente em águas profundas e ultra profundas, a utilização de sensores ópticos têm sido aceita pela indústria como uma promissora alternativa para o monitoramento de equipamentos e estruturas. Existem diversos tipos de sensores que usam a fibra óptica, porém neste trabalho será utilizada a tecnologia de redes de Bragg como elemento sensor.

Dentre muitos aspectos, a principal característica das fibras ópticas instrumentadas com redes de Bragg é a capacidade de multiplexação dos elementos sensores. Desta forma pode-se ter diversos sensores, medindo grandezas semelhantes ou distintas, em apenas uma fibra óptica. Existem outras propriedades das fibras ópticas que tornam esta tecnologia muito útil na área de exploração de petróleo, tais como:

- Baixa perda na transmissão (monitoramento remoto).
- Ausência de corrente elétrica (sem risco de explosão em áreas classificadas).
- Baixa reatividade química.
- Imunidade eletromagnética
- Resistência a temperaturas elevadas.

O fato dos sensores ópticos trabalharem com sinal de luz e não com eletricidade é de suma importância quando aplicado em áreas classificadas, onde existe o alto risco de explosão devido à presença de fluidos altamente inflamáveis. Trata-se de sensores que podem ser classificados como intrinsecamente seguros para instalações onde a instrumentação eletrônica deve ser utilizada com barreiras para eliminar riscos de explosão.

1.3.1. Redes de Bragg

Uma rede de Bragg consiste na modulação periódica do índice de refração da fibra óptica (do núcleo, da casca, ou de ambas). Esta modulação pode ser resultado do aumento ou da diminuição localizada do índice de refração.

A rede de Bragg opera como um filtro espectral reflexivo que seleciona um comprimento de onda de uma luz de banda larga propagando-se pelo núcleo da fibra óptica. Este comprimento de onda, chamado de comprimento de onda de Bragg (λ_B), está relacionado com a periodicidade espacial da modulação do

índice de refração, Λ , e com o índice de refração efetivo do núcleo, n_{eff} , através da equação 2.1.[30,31]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{2.1}$$

Na Figura 1.12, é representado o reflexo de uma faixa espectral da luz. Inicialmente é inserida na fibra óptica uma luz de banda espectral larga. Ao passar pela rede de Bragg parte da luz é refletida e o restante do espectro é transmitido.

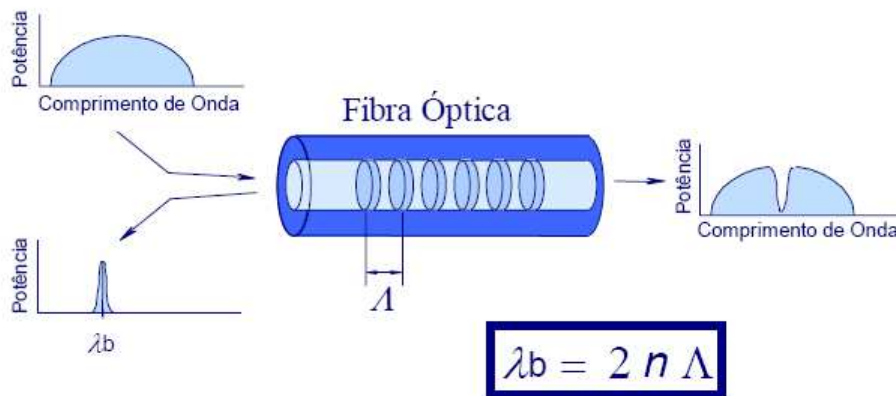


Figura 1. 12 - Esquema de funcionamento de uma rede de Bragg.

Devido aos efeitos foto-elástico e termo-óptico, tanto esforços mecânicos longitudinais quanto variações na temperatura provocam o deslocamento do comprimento de onda de Bragg. Tais efeitos físicos alteram o período da modulação das redes de Bragg, mudando assim as características do comprimento de onda refletido.

A equação 2.2 descreve o comportamento do comprimento de onda de Bragg em função de variações no comprimento da fibra (Δl) e de variações de temperatura (ΔT). Onde l é o comprimento da fibra e T a temperatura inicial.

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \tag{2.2}$$

Na equação 2.2 o primeiro termo representa a ação do esforço longitudinal P na direção x , como mostra a Figura 1.13. O segundo termo representa a sensibilidade da fibra óptica sobre o efeito da variação de temperatura. Com a deformação axial e o diferencial de temperatura, ocorrem mudanças no índice de refração da fibra e variações da periodicidade da rede.

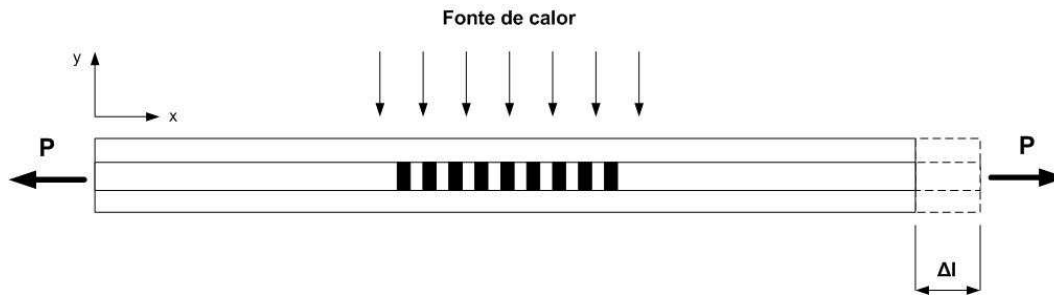


Figura 1. 13 - Fibra óptica submetida a esforços e a variação de temperatura.

A equação 2.3 representa a variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação, da elasto-óptica e dos coeficientes de expansão térmica.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 + p_e)\varepsilon_x + (\alpha_\Lambda + \alpha_\beta)\Delta T] \quad (2.3)$$

Onde ε_x é a deformação da fibra na direção x . Normalmente para fibras de sílica dopadas com germânio os valores de α_Λ e α_β são de $0,55 \times 10^{-6} K^{-1}$ e $0,86 \times 10^{-6} K^{-1}$ respectivamente. O coeficiente elasto-óptico é dado pela expressão 2.4, em função do índice de refração efetivo do núcleo, do coeficiente de Poisson e pelos componentes de tensor elasto-óptico (p_{11} e p_{12}).

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.4)$$

Para fibras ópticas de sílica dopadas com germânio, $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ e $n_{eff} = 1,482$. [31].

Uma vez tendo os valores dos termos da equação 2.4 pode-se calcular a sensibilidade de uma da rede de Bragg. Com isso, uma rede de Bragg centrada em 1550 nm possui uma sensibilidade de 1,2 pm/ $\mu\varepsilon$ para deformações mecânicas e 13 pm/ $^\circ C$ para variações térmicas.

Quando a fibra óptica esta submetida às deformações mecânicas ou a variações de temperatura, ocorre o deslocamento do comprimento de onda de Bragg [31]. A Figura 1.14 representa o efeito da tração sobre uma rede de Bragg e mostra como a mesma pode atuar como um sensor óptico. No caso de tração, uma variação positiva do comprimento de onda será observada devido ao aumento da periodicidade espacial da rede de Bragg. No caso da compressão o deslocamento é negativo devido à diminuição do período da rede de Bragg. O mesmo ocorre para os efeitos de variação de temperatura.

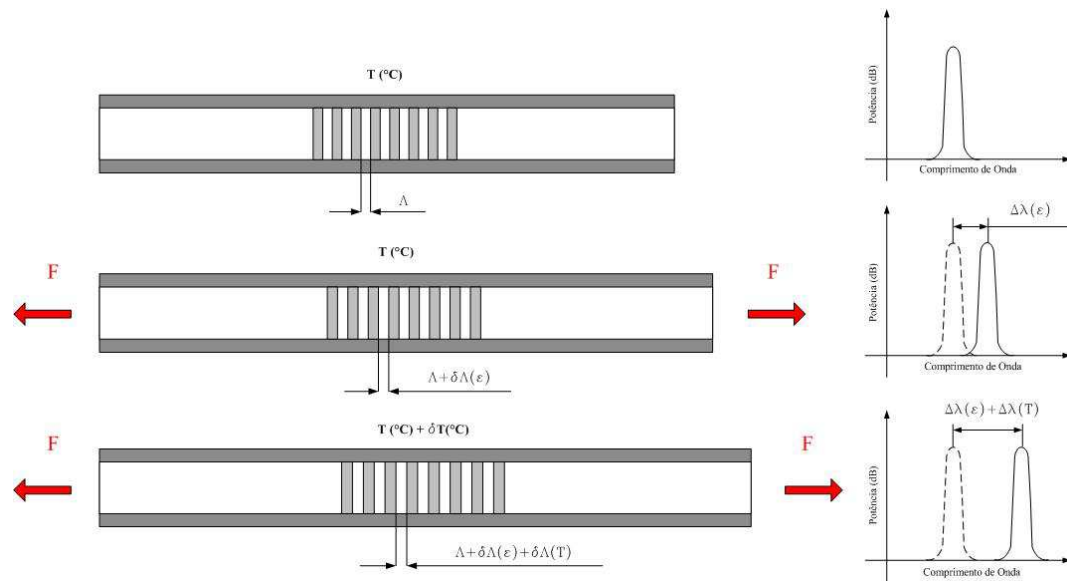


Figura 1. 14 - Esquema da rede de Bragg sendo submetida à deformação longitudinal e variação da temperatura e suas respectivas respostas espectrais.

A sensibilidade de rede de Bragg à variação destas duas grandezas físicas provoca o mesmo efeito de deslocamento do comprimento de onda de Bragg. Com isso, a princípio, fica difícil separar o efeito da temperatura de deformação longitudinal. Existem algumas maneiras de desvincular a medida destas duas grandezas. Uma delas será adotada nas técnicas de monitoramento de *risers* apresentadas neste trabalho, e consiste na utilização de uma rede de Bragg, multiplexada às demais, apenas para o monitoramento da temperatura. Assumindo que todas as redes de um mesmo cordão sofrem a mesma variação térmica, pode-se eliminar o efeito da temperatura nos demais sensores e obter uma resposta apenas da deformação.

1.3.2. Sistema de medição

Para o monitoramento das redes de Bragg utilizadas na instrumentação dos *risers* foi utilizado o interrogador óptico sm125 (*sm - Sensing Module*) da Micron Optics Inc. Este equipamento é ideal para aplicações em campo ou em testes de laboratório, pois é compacto, robusto e muito utilizado para medições de longa duração. Além das características operacionais este interrogador dispõe de um sistema de varredura do comprimento de onda do laser com baixo ruído, realizado com um módulo *Fabry-Perot* com a tecnologia de filtro ajustável (patente pertencente à *Micron Optics*). O núcleo do sm125 emprega leitura espectral e aquisição de dados completa, possibilitando uma medição com alta exatidão.

Na Figura 1.15 observa-se uma foto do equipamento de interrogação. Este modelo contém quatro canais independentes para a leitura dos sensores ópticos. A transmissão dos dados é feita via padrão Ethernet para um computador. Para a leitura em tempo real e o armazenamento dos dados ópticos é necessária a utilização do *software Micron Optics ENLIGHT Sensing Analysis*. Este programa permite visualizar o espectro refletido pela rede de Bragg e a partir dele verificar se a instalação do sistema ocorreu de forma adequada. A Figura 1.16 apresenta a interface do programa mostrando o sinal óptico de um sensor qualquer.



Figura 1. 15 - Equipamento de interrogação utilizado em todos os testes.

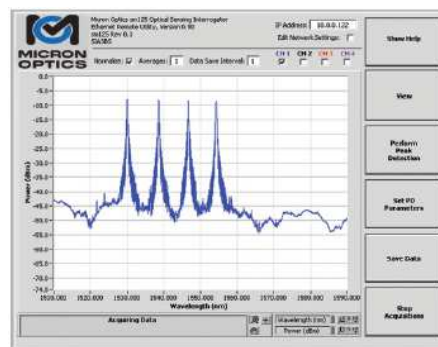


Figura 1. 16 - Imagem do comprimento de onda refletido, gerado pelo software Micron Optics ENLIGHT Sensing Analysis.

1.4.

Outras técnicas de monitoramento de duto flexíveis.

Diversas empresas e centros de pesquisas do setor direcionam significativos recursos humanos e financeiros para o desenvolvimento de técnicas e equipamentos capazes de detectar falhas nestas estruturas. Nesta seção serão apresentados alguns destes trabalhos, tais como monitoramento por vibração, por emissão acústica, e outras tecnologias também baseadas em fibra óptica.

1.4.1.

Monitoramento baseado em vibrações:

Assim como as tecnologias de monitoramento de dutos flexíveis baseadas em fibra óptica descritas neste trabalho, uma técnica baseada em vibrações também foi desenvolvida pelo Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio.

Este sistema de monitoramento consiste em analisar vibrações transientes e de alta frequência produzidas pela ruptura de arames nas armaduras do *riser*.

Trata-se de uma técnica indireta de monitoramento uma vez que um conjunto de acelerômetros é instalado sobre a capa externa do duto. O equipamento de interrogação desenvolvido foi programado para registrar os sinais medidos apenas quando um valor mínimo de aceleração for detectado, facilitando assim o armazenamento, tratamento e análise dos dados adquiridos continuamente e em tempo real, [20].

A Figura 1.17 apresenta o equipamento de aquisição de dados portátil com os cabos e o acelerômetro. A Figura 1.18 ilustra um sinal característico no momento da ruptura de um arame num dos testes em escala real no qual o sistema foi utilizado.



Figura 1. 17 - Equipamento de interrogação do sistema de vibrações. [20].

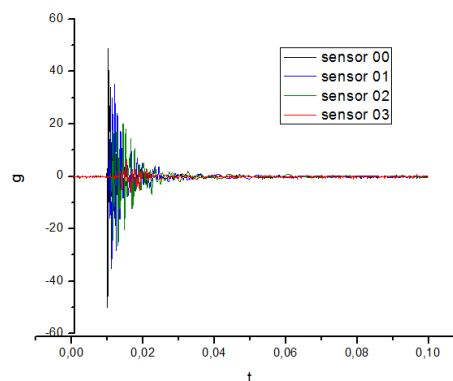


Figura 1. 18 - Sinal característico do momento da ruptura de um arame. [20].

Algumas vantagens, tais como a fácil instalação dos sensores, o fato de ser uma técnica dominada e não intrusiva, fazem desta tecnologia uma ótima opção para a ampla utilização no monitoramento da armadura de tração dos *risers*. Por outro lado apresenta algumas desvantagens com relação à aquisição de sinais. Por ser uma técnica que monitora o impulso provocado no instante da ruptura do arame o equipamento deve permanecer permanentemente ativo.

1.4.2. Monitoramento por emissão acústica:

A emissão acústica é um fenômeno físico que ocorre nos materiais onde energia é liberada na forma de ondas elásticas (som). Esta técnica de monitoramento visa detectar os ruídos provocados pelo rompimento dos arames da armadura de tração. Para isso são instalados sensores que convertem os sinais da onda sonora em sinais elétricos. Posteriormente é feita a análise dos dados com o objetivo de detectar o momento e o local onde ocorreu a falha. [18].

Os resultados de teste apontaram que o rompimento do arame provocou um forte ruído com alta amplitude de sinal e que a onda sonora se propagou pelo arame podendo se detectada no sensor posicionado no conector. Esta técnica apresenta um problema para a utilização em campo, pois os *risers* em plataformas estão sujeitos a diversos tipos de situações capazes de provocar ruídos similares aos identificados nos testes. Desta forma estudo mais aprofundados sobre as formas de filtrar ruídos externos e falsos alarmes ainda se encontra em fase de discussão.

A técnica de monitoramento por emissão acústica apresenta características semelhantes ao monitoramento por vibrações. Desta forma seus pontos positivos e negativos são praticamente os mesmos. Entretanto em testes realizados o sistema de vibração tem obtido melhores resultados.

1.4.3.

Inspeção magnética não invasiva:

Assim como as duas técnicas de monitoramento descritas anteriormente, este equipamento, denominado MAPS-FR, utiliza um método indireto e não intrusivo de detectar o rompimento do arame. Segundo a descrição, este equipamento é capaz de identificar não apenas a ruptura como também o nível de deformação ao qual o arame está submetido. Isto ocorre porque as propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos são sensíveis a variações de tensão no mesmo. Entretanto existem outros parâmetros tais como dureza, tamanho de grão, textura e outras propriedades do material que alteram os parâmetros magnéticos. [19].

Monitorando o comportamento magnético dos arames é possível identificar falhas, pois se sabe que o arame quando rompido passa a ter um comportamento diferente dos demais, normalmente não respondendo as solicitações de trabalho. Esta maneira de analisar a falha de um arame também é utilizada pelo sistema MODA que será descrito neste trabalho.

O equipamento é composto de três anéis contendo cinco sondas capazes de monitorar o comportamento dos arames durante o teste. A Figura 1.19 apresenta uma foto do equipamento sendo testado na COPPE/UFRJ.



Figura 1. 19 - Equipamento MAPS-FR em fase de teste. [19].

Esta técnica apresenta algumas desvantagens com relação às demais aqui citadas por se tratar de um equipamento caro. Possui um sistema de dados de difícil análise e apresenta problemas com a variação da estrutura interna dos dutos.

1.4.4. Clamp T&E:

Este equipamento, denominado *Clamp T&E*, foi desenvolvido por uma empresa francesa do ramo de petróleo e tem como objetivo monitorar o comportamento mecânico da capa do *riser*, com o objetivo de detectar eventuais falhas nos arames de tração. Este protótipo apresenta características e conceitos parecidos com os que serão apresentados mais a frente neste trabalho, principalmente na seção que descreve o funcionamento do Colar 3D. Este produto ainda encontra-se em fase de teste, mas já existem alguns artigos publicados que descrevem o funcionamento do mesmo, [21].

O *Clamp* age como uma braçadeira que envolve o duto flexível, fixada de forma rígida, registrando assim os movimentos do conjunto. O protótipo é constituído de material compósito. Os esforços são monitorados por meio de células de carga instrumentadas com sensores ópticos a base de redes de Bragg. Desta forma este equipamento possui as mesmas vantagens e desvantagens associadas à utilização de sensores ópticos.

Atualmente foram fabricados dois protótipos, um para monitoramento de deformações longitudinais e outro para monitoramento da torção. Assim como o Colar 3D, que será apresentado no capítulo seguinte, esta técnica de monitoramento ocorre de forma indireta, obtendo informações do comportamento da capa externa para tentar identificar falhas nos arames.