

4 Conclusões

Na presente dissertação foram estudados dois métodos de monitoramento contínuo e em tempo real de falhas por ruptura nas armaduras de tração de *risers* flexíveis. Ambos os métodos empregam sensores de deformação a fibra óptica baseados na tecnologia de redes de Bragg. O método de monitoramento direto, o sistema *MODA*, monitora a integridade de cada um dos arames que compõe a camada externa da armadura de tração do duto flexível. O método indireto, nas três versões estudadas, o Colar Óptico, o Band-Aid e o Colar Óptico 3D, baseia-se na medição contínua de deformações na capa polimérica do duto, associando variações nos níveis das deformações longitudinais, circunferenciais e torsionais da capa com o rompimento de arames nas armaduras de tração do duto. Testes de laboratório em escala real foram conduzidos com o objetivo de avaliar a empregabilidade dos sistemas de monitoramento em campo. Os resultados positivos obtidos com o sistema *MODA* (monitoramento direto) levaram a três instalações de campo em Unidades Marítimas de Produção operadas pela Petrobras na Bacia de Campos.

O projeto do sistema *MODA* sofreu algumas alterações durante a realização dos testes. Inicialmente os sensores foram posicionados e colados no sentido transversal de cada arame com o objetivo de limitar a faixa dinâmica dos sensores e aumentar a capacidade de multiplexação do sistema (mais sensores em uma única fibra óptica). Este método de colagem facilitava o posicionamento da fibra, uma vez que evitava a necessidade de grandes curvaturas na fibra óptica instrumentada com os sensores à rede de Bragg. Porém, esta facilidade não superava as desvantagens trazidas pela menor sensibilidade dos sensores, uma vez que o valor da deformação transversal é da ordem de apenas 30% da deformação longitudinal. A partir do segundo teste em diante os sensores do *MODA* passaram a ser instalados no sentido longitudinal dos arames. Esta estratégia foi também empregada nos três sistemas instalados em campo.

Após a análise dos dados do segundo teste, outro ponto chamou a atenção. Notou-se que depois do rompimento de qualquer arame o escorregamento demorava um intervalo de tempo para ser observado. Sendo assim o sensor não era capaz de detectar a falha instantaneamente. Este

comportamento pode ser atribuído ao fato da amostra de *riser* utilizada apresentar um elevado nível de corrosão nos arames das armaduras de tração, intensificando o atrito entre os fios adjacente e entre as próprias camadas.

No terceiro e no quarto teste as amostras utilizadas eram novas, ou seja, não havia corrosão entre os arames. Deste modo, todas as rupturas foram detectadas de forma imediata. Os gráficos do carregamento e o mapa de deformação, utilizados na análise dos dados, representaram de maneira clara o momento do rompimento dos fios. As imagens possibilitam gerar um padrão gráfico para futuros testes ou instalações em *riser* alocados em plataformas de produção.

O sistema de monitoramento direto apresentou resultados satisfatórios. Além de detectar de forma quase imediata o momento da falha, outros aspectos foram observados durante a realização dos testes. Dados como nível de tensão/deformação em cada arame também podem ser observados através dos gráficos. Isto possibilita gerar um histórico de carregamento no tempo contendo o registro do comportamento mecânico da armadura de tração.

O método de monitoramento óptico indireto do *riser* também sofreu algumas alterações durante a fase de teste. Devido à maior dificuldade de visualização do rompimento em relação ao monitoramento direto, esta técnica sofreu modificações mais significativas na estrutura dos sensores utilizados. Inicialmente foi utilizado um colar instrumentado com redes de Bragg em um duto flexível em operação numa plataforma da Bacia de Campos, medindo apenas deformações circunferenciais do duto. Durante o período em que ficou instalado, o Colar Óptico não foi capaz de detectar nenhum tipo de ruptura. Porém verificou-se que ele apresentava uma alta sensibilidade a variações no diâmetro externo do *riser*. A excelente correlação entre as variações nas deformações circunferenciais com dados operacionais do duto (pressão e temperatura) permitem supor que um cruzamento entre estas informações pode ser utilizado para verificar a alta sensibilidade do sistema de monitoramento.

Em paralelo com o desenvolvimento e aperfeiçoamento do Colar Óptico foi elaborado outro sistema de monitoramento indireto, o Band-Aid. Este sistema emprega redes de Bragg posicionadas em ângulo capazes de monitorar deformações cisalhantes associadas com a torção do *riser* produzida pela ruptura de arames nas armaduras de tração. Os testes do sistema Band-Aid foram satisfatórios e notou-se que os sensores apresentam um sinal característico no momento do rompimento do arame. Imediatamente após um

rompimento, o nível de deformação sofre uma alteração captada pelo sistema de monitoramento.

Posteriormente, visando melhorar as duas técnicas de monitoramento indireto, desenvolveu-se o Colar 3D que possui elementos sensores arranjados em ângulo, para a componente torcional, e sensores posicionados sobre uma fita metálica na forma de um colar em torno da circunferência do duto. Assim este terceiro protótipo apresenta as melhores características de cada uma das técnicas anteriormente desenvolvidas. O Colar 3D foi utilizado em dois testes de corrosão-fadiga em escala real acelerado em laboratório e obteve resultados excelentes. Os dados de resposta dos sensores ópticos foram comparados com dados de acelerômetros instalados na amostra, seguindo a técnica de monitoramento por vibrações apresentada na introdução. Esta correlação de resultados tem como objetivo aumentar a confiabilidade do resultado individual de cada técnica de monitoramento. Os sensores ópticos foram capazes de detectar todas as rupturas no momento exato em que ocorreram. Devido ao posicionamento dos sensores ao longo da direção axial do tubo testado, foi possível estimar o local onde ocorreram os rompimentos. Posteriormente com a verificação final da amostra todos os dados de rompimento foram confirmados assim como o local onde ocorreram. Isto mostrou que esta técnica é capaz de identificar o instante da ruptura e o possível local onde ocorreu. Com isso, nestes últimos dois testes observou-se que a utilização de uma técnica complementar de monitoramento indireto (no caso a técnica baseada em vibrações) aumenta a confiabilidade de resposta do sistema.

Comparando as duas técnicas de monitoramento óptico, podem-se notar pontos positivos e negativos em ambas, principalmente, no que diz respeito à utilização das mesmas em *risers* em operação. O monitoramento direto dos arames por meio do *MODA* apresenta uma alta confiabilidade pois analisa o comportamento mecânico individual de cada arame e possui alta sensibilidade para a detecção de rupturas. Porém, por outro lado, trata-se de um método intrusivo de monitoramento sendo necessário o corte de parte da camada polimérica externa. Apesar de já existir um método de reparo utilizado pela Petrobras para o corte da capa polimérica, é um procedimento delicado, pois afeta diretamente a estrutura do duto. Utilizando o monitoramento indireto por sua vez, não é necessário nenhum tipo de alteração na estrutura do duto flexível, pois sensores são instalados diretamente sobre a superfície da capa polimérica. Entretanto, por se tratar de um método indireto, onde se avalia o comportamento da capa externa no instante da ruptura, o sinal de resposta apresenta uma

confiabilidade mais baixa. Torna-se difícil garantir a confiabilidade de detecção de uma falha no arame tomando como base apenas os dados do Colar 3D. Por outro lado, observou-se durante os dois últimos testes, que esta técnica associada a alguma outra técnica de monitoramento indireto (seja ela óptica ou não) eleva significativamente a confiabilidade da resposta.

O conceito atual é de que o *MODA* é o sistema de monitoramento para situações críticas onde são necessárias informações com alta confiabilidade e precisão, que para tal, permite o emprego de um sistema intrusivo. Sendo empregado principalmente em dutos flexíveis de alta importância em UEP's tais como dutos de exportação ou em *riser* críticos próximos ao final de sua vida útil de trabalho. Enquanto que os sistemas de Colar 3D são perfeitos para monitoramento de longo prazo e em larga escala. Podendo ser aplicado em múltiplos dutos flexíveis de uma unidade de produção e possivelmente operando com outros sistemas adicionais de monitoramento.