



Tiago Baltar Simões

**Monitoramento de Risers Flexíveis com
Sensores a Fibra Óptica**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Sérgio R. K. Morikawa
Roberth W. A. Llerena

Rio de Janeiro
Abril de 2011



Tiago Baltar Simões

**Monitoramento de Risers Flexíveis com
Sensores a Fibra Óptica**

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

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Sérgio Ricardo Kokay Morikawa

Co-Orientador

PETROBRAS

Prof. José Luiz de França Freire

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Luiz Cláudio de Marco Meniconi

CENPES/PETROBRAS

Dr. Roberth Waldo Angulo Llerena

PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 7 de abril de 2011

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

Tiago Baltar Simões

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2008. Atualmente trabalha no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio. Tem como área de interesse o setor de petróleo e energia.

Ficha Catalográfica

Simões, Tiago Baltar

Monitoramento de risers flexíveis com sensores a fibra óptica / Tiago Baltar Simões ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador: Sérgio R. K. Morikawa, Roberth W. A. Lierena. – 2011.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Sensores a fibra óptica. 3. Sensores a rede de Bragg. 4. Monitoramento óptico de falhas. 5. Riser flexível. 6. Armadura de tração. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Morikawa, Sérgio R. K. III. Lierena, Roberth W. A. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. V. Título.

CDD: 621

Para minha esposa e meus pais
Pelo apoio e confiança

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Arthur Martins Barbosa Braga pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado

Aos meus co-orientadores Dr. Sérgio Ricardo Kokay Morikawa e Dr. Roberth Waldo Angulo Llerena pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho

Ao amigo Murilo Camerini e todo o pessoal do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio pelo apoio na realização desta dissertação.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

À minha esposa pelo carinho e apoio em todos os momentos.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Simões, Tiago Baltar; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Monitoramento de Risers Flexíveis com Sensores a Fibra Óptica**. Rio de Janeiro, 2011. 91p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

O interesse no monitoramento da integridade estrutural de *risers* flexíveis tem crescido significativamente nos últimos anos. Para dutos que já estão atingindo sua vida de projeto, sistemas de monitoramento podem fornecer alertas antecipados de possíveis falhas e também auxiliar o operador na programação de paradas para manutenção. Diferentes técnicas estão sendo testadas pelos operadores de dutos flexíveis tais como inspeção visual automatizada, monitoramento de vibrações e emissão acústica, além de técnicas baseadas em métodos eletromagnéticos. Algumas destas técnicas já estão sendo implementadas em unidades de exploração e produção marítimas no Brasil e em outros países. A presente contribuição aborda o monitoramento contínuo e em tempo real utilizando sensores a fibra óptica (Redes de Bragg) para detectar a ruptura dos arames nas armaduras de tração de *risers* flexíveis. Duas linhas são seguidas, monitoramento direto e monitoramento indireto. O monitoramento indireto consiste na instrumentação da capa polimérica do *riser*, de forma não intrusiva, e avalia possíveis alterações na mesma, causadas pelo rompimento dos arames. Para isso foi desenvolvido um transdutor, denominado Colar 3D, capaz de detectar variações no diâmetro externo, alongação e torção no duto. A técnica de monitoramento direto é denominada *MODA (Monitoramento Óptico Direto nos Arames)*. Nesta técnica os arames são instrumentados individualmente com os sensores ópticos, que monitoram as tensões/deformações dos mesmos, assim, rompimentos de arames e comportamentos inesperados podem ser facilmente detectados. Resultados de ensaios em escala real mostraram que a probabilidade de detecção do monitoramento indireto aumenta significativamente quando o sistema é empregado em conjunto com outros tipos de monitoramento indireto. Os resultados de laboratório para o monitoramento direto apontaram alta sensibilidade e confiabilidade do sistema, que já foi instalado em três plataformas operadas pela Petrobra na Bacia de Campos.

Palavras-chave

Monitoramento da integridade estrutural de dutos flexíveis; Sensores a fibra óptica; Monitoramento de *risers* flexíveis.

Abstract

Simões, Tiago Baltar; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Monitoring Flexible Risers with Optical Fiber Sensors**. Rio de Janeiro, 2011. 91p. Msc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

The interest in structural health monitoring of flexible risers has grown significantly in recent years. For ducts that are already reaching their design life, monitoring systems can provide early warnings of potential failures and also assist the operator in scheduling downtime. Different techniques are being tested by operators of flexible pipes such as automated visual inspection, vibration monitoring and acoustic emission, in addition to techniques based on electromagnetic methods. Some of these techniques are already being implemented in units of maritime exploration and production in Brazil and other countries. This contribution discusses the continuous monitoring and real-time using optical fiber sensors (FBGs) to detect the breaking of wires in the tensile armor of flexible risers. Two lines are followed, direct monitoring and indirect monitoring. The proposed indirect monitoring technique consists in the non-intrusive instrumentation of the riser's polymeric outer sheath, which will provide strain signals that change due to the breaking of wires in the armor layer. For that, a transducer capable of detecting variations in the outer diameter, as well as stretching and twisting in the duct was developed. In the direct monitoring technique, all the wires in the external armor layer are individually instrumented with optical sensors that continuously monitor their strains, so that any disruptions of wires and unexpected behavior can be easily detected. Results of full scale laboratory tests showed that the probability of detection of indirect monitoring increases significantly when the system is used in conjunction with other types of indirect monitoring. The laboratory results for the direct monitoring showed high sensitivity and reliability of the system, which has already been installed in three oil rigs operated by Petrobras in the Campos Basin.

Keywords

Structural health monitoring of flexible pipes; Fiber optic sensors;
Monitoring of flexible risers.

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Organização do trabalho	19
1.2.	Dutos Flexíveis	20
1.2.1.	Estrutura de <i>Riser</i>	22
1.2.2.	Tipos de falhas	27
1.3.	Conceitos básicos de fibras ópticas	29
1.3.1.	Redes de Bragg	29
1.3.2.	Sistema de medição	32
1.4.	Outras técnicas de monitoramento de duto flexíveis.	33
1.4.1.	Monitoramento baseado em vibrações:	33
1.4.2.	Monitoramento por emissão acústica:	34
1.4.3.	Inspeção magnética não invasiva:	35
1.4.4.	Clamp T&E:	36
2	Técnicas de monitoramento	37
2.1.	Técnicas Indiretas de Monitoramento Óptico	38
2.1.1.	Colar Óptico	38
2.1.2.	Band-Aid	41
2.1.3.	Colar 3D	45
2.2.	Monitoramento óptico direto no arame (<i>MODA</i>)	47
3	Testes e resultados	52
3.1.	Teste 1 – Colar Óptico em Campo	52
3.2.	Teste 2 - LTS	55
3.3.	Teste 3 - LTS- 2	58
3.4.	Teste 4 - LTS-3	62
3.5.	Teste 5 - LAMEF-UFRGS	69
3.6.	Teste 6 – LAMEF-UFRGS - 2	76
3.7.	Teste 7 – LAMEF-UFRGS - 3	79
4	Conclusões	84
	Referência bibliográfica	88

Lista de figuras

Figura 1. 1 - Desenvolvimento de indústria offshore até o ano de 2007. (Diário do Pré-Sal).	17
Figura 1. 2 - Detalhe das camadas do tubo HAIS utilizado na Segunda Guerra Mundial.	20
Figura 1. 3 - Esquema utilizando <i>risers</i> e flowlines. (Curso Geraldo Spinelli – PUC-Rio).	21
Figura 1. 4 - Camadas de um <i>riser</i> padrão. [3].	22
Figura 1. 5 - Detalhe da Carcaça	23
Figura 1. 6 - Detalhe da Armadura de pressão. [11]	24
Figura 1. 7 - Detalhe da armadura de tração com a camada de fita adesiva.	25
Figura 1. 8 - Montagem do conector em laboratório para a utilização do <i>riser</i> em teste.	27
Figura 1. 9 - Bend Stiffener.	27
Figura 1. 10 - Detalhe do rompimento do arame próximo ao conector. [16].	28
Figura 1. 11 - Detalhe do rompimento do arame devido à falha na capa polimérica. [16].	28
Figura 1. 12 - Esquema de funcionamento de uma rede de Bragg.	30
Figura 1. 13 - Fibra óptica submetida e esforços e a variação de temperatura.	31
Figura 1. 14 - Esquema da rede de Bragg sendo submetida à deformação longitudinal e variação da temperatura e suas respectivas respostas espectrais.	32
Figura 1. 15 - Equipamento de interrogação utilizado em todos os testes.	33
Figura 1. 16 - Imagem do comprimento de onda refletido, gerado pelo software Micron Optics ENLIGHT Sensing Analysis.	33
Figura 1. 17 - Equipamento de interrogação do sistema de vibrações. [20].	34

Figura 1. 18 - Sinal característico do momento da ruptura de um arame. [20].	34
Figura 1. 19 - Equipamento MAPS-FR em fase de teste. [19].	36
Figura 2. 1 - Protuberâncias na capa polimérica.	39
Figura 2. 2 - Torção e deformação da capa polimérica devido à ruptura de arames. [16]	39
Figura 2. 3 - Modelos de Colar Óptico.	40
Figura 2. 4 - Esquema de sensores no Band' Aid.	41
Figura 2. 5 - Esquema de teste do Band-Aid em uma amostra de riser.	42
Figura 2. 6 - Instalação do sistema Band' Aid no teste realizado no LAMEF-UFRGS.	43
Figura 2. 7 - Segundo protótipo do sistema Band' Aid.	44
Figura 2. 8 - Exemplo de sinal característico obtido pelo sistema Band' Aid no instante da ruptura do arame	44
Figura 2. 9 - Fluxograma de instalação do Colar 3D em um dos testes em escala real.	46
Figura 2. 10 - Colar 3D instalado no teste JOIA.	47
Figura 2. 11 - Mapa do nível de deformação dos arames em escala de cor.	49
Figura 2. 12 - Exemplo de janela aberta sobre a capa polimérica.	50
Figura 2. 13 - Rede de Bragg instalada sobre o arame.	50
Figura 2. 14 - Fluxograma do sistema MODA.	50
Figura 2. 15 - Preenchimento da janela com graxa.	51
Figura 2. 16 - Amostra com reparo.	51
Figura 3. 1 - Fluxograma de instalação do Colar Óptico na Plataforma.	53
Figura 3. 2 - Colar instalado no riser.	54
Figura 3. 3 - Gráfico do comportamento do colar óptico acompanhando a curva de pressão interna no riser.	55
Figura 3. 4 - Máquina de tração utilizada no teste da COPPE/UFRJ.	55
Figura 3. 5 - Primeira configuração do monitoramento direto.	56
Figura 3. 6 - Amostra com o reparo após a instrumentação.	56

Figura 3. 7 - Momento em que o arame 39 passa a ter um comportamento diferente dos demais.	57
Figura 3. 8 - Momento em que quatro arames forma rompidos no teste.	58
Figura 3. 9 - Janela de instrumentação aberta no riser de teste.	59
Figura 3. 10 - Detalhe do tipo de entalhe realizado sobre os arames.	60
Figura 3. 11 - Gráfico do instante que o sensor do arame rompido passou a não responder ao carregamento.	61
Figura 3. 12 - Mapas do nível de deformações no instante que os arames rompidos escorregam.	62
Figura 3. 13 - Esquemático do teste.	63
Figura 3. 14 - Janelas de instrumentação abertas sobre o duto de teste.	64
Figura 3. 15 - Detalhe da janela com o posicionamento da fibra óptica.	64
Figura 3. 16 - O gráfico mostra a presença de dois sensores defeituosos no sistema.	65
Figura 3. 17 - Momento em que o rompimento dos arames 6 e 7 foram registrados.	65
Figura 3. 18 - Mapa de deformação registrado no instante da ruptura dos arames 6 e 7.	66
Figura 3. 19 - Sensores colados direto sobre a capa.	67
Figura 3. 20 - Sensores colados na capa com a utilização de uma película de Kapton.	67
Figura 3. 21 - Gráfico do sensor de deformação circunferencial.	68
Figura 3. 22 - Gráfico da torção do duto.	68
Figura 3. 23 - Detalhe do momento do rompimento do arame.	68
Figura 3. 24 - Sistema MODA instalado no riser.	69
Figura 3. 25 - Sistemas Band - Aid instalados.	69
Figura 3. 26 - Esquema de instalação e teste dos sistemas de monitoramento.	70
Figura 3. 27 - Gráfico dos primeiros rompimentos ocorridos no teste.	71
Figura 3. 28 - Mapa de deformação do primeiro dia de teste.	72
Figura 3. 29 - Gráfico do comportamento do sensor Band' Aid no primeiro dia de teste.	73

Figura 3. 30 – Mapa de deformação do segundo dia de teste.	74
Figura 3. 31 - Gráfico do Band' Aid no segundo dia de teste.	75
Figura 3. 32 - Imagem da amostra no quadro de teste no LAMEF-UFRGS.	77
Figura 3. 33 - Sinal característico do Colar 3D no instante da ruptura.	78
Figura 3. 34 - Linha cronologia da ocorrência de rompimentos nos arames.	79
Figura 3. 35 - Esquemático do posicionamento dos sensores no teste.	80
Figura 3. 36 - Sinal óptico do quinto evento.	80
Figura 3. 37 - Registro do possível local de ocorrência das falhas.	82
Figura 3. 38 - Ordem cronologia da ocorrência de eventos.	82

Lista de tabelas

Tabela 3. 1 - Eventos ocorridos durante o teste.	60
Tabela 3. 2 - Sequência de eventos ocorridos no primeiro dia de teste.	70
Tabela 3. 3 - Eventos registrados no segundo dia de teste.	73
Tabela 3. 4 - Cronograma de eventos no Teste 6.	77
Tabela 3. 5 - Registro da intensidade do sinal óptico e do possível local de rompimento dos arames.	81