

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FELIPE LUTCKMEIER

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE
DUTOS FLEXÍVEIS E TUBOS COMPÓSITOS COM
SENSORES ÓPTICOS DO TIPO REDE DE BRAGG**

Porto Alegre
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FELIPE LUTCKMEIER

**DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE
DUTOS FLEXÍVEIS E TUBOS COMPÓSITOS COM
SENSORES ÓPTICOS DO TIPO REDE DE BRAGG**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Porto Alegre
2020

CIP - Catalogação na Publicação

Lutckmeier, Felipe
DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE DUTOS FLEXÍVEIS E TUBOS
COMPÓSITOS COM SENSORES ÓPTICOS DO TIPO REDE DE BRAGG
/ Felipe Lutckmeier. -- 2020.
106 f.
Orientador: Thomas Gabriel Rosauro Clarke.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Sensores de fibra óptica. 2. Rede de Bragg. 3.
Integridade estrutural. 4. Ensaios não destrutivos. 5.
Dutos flexíveis. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauro,
orient. II. Título.

FELIPE LUTCKMEIER

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE DUTOS FLEXÍVEIS E TUBOS COMPÓSITOS COM
SENSORES ÓPTICOS DO TIPO REDE DE BRAGG

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke – Prof. Orientador

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann – Coordenador PPGE3M

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Dr. George Carneiro Campello

Dr. Sérgio Ricardo Kokay Morikawa

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke pela oportunidade e pelo suporte durante a construção deste trabalho.

Ao Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima pelo auxílio durante todas etapas deste trabalho, compartilhando seu conhecimento e enriquecendo esse trabalho com suas ideias.

Aos colegas de trabalho do grupo GEND, principalmente ao Me. Daniel Saraiva da Silva, pelo auxílio nos ensaios e pela convivência diária.

Ao LAMEF como instituição, por disponibilizar sua infraestrutura e seu corpo técnico para a realização dos ensaios, permitindo assim que não faltasse nada e que esse trabalho fosse desenvolvido com sucesso

À UFRGS e ao PPGE3M.

À Petrobras por disponibilizar as amostras e permitir que nossas ideias fossem testadas e avaliadas na prática.

A todos os amigos que estiveram ao meu lado durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

À toda minha família, principalmente aos meus pais, José Carlos Lutckmeier e Silvia Maria Pohren Lutckmeier, por terem me possibilitado a oportunidade de estar sempre me desenvolvendo pessoal e profissionalmente, pelo incentivo em sempre buscar meus objetivos e por todo o carinho que sempre me foi dado.

RESUMO

Sensores ópticos do tipo rede de Bragg (FBGS) possuem um grande potencial como solução de monitoramento para avaliação de integridade estrutural em diversas áreas da indústria. No entanto, embora ao longo das últimas décadas existam diversos exemplos de aplicações comerciais bem-sucedidas, a sua utilização ainda está longe de alcançar sua plenitude de potencial, principalmente no Brasil. Alguns dos desafios para que essa tecnologia possa representar uma solução mais abrangente para monitoramento de integridade estrutural envolvem a necessidade de investigação do potencial de aplicação da tecnologia para atender demandas específicas de maneira confiável e viável técnica e economicamente. Com base nisso, este trabalho tem o objetivo de desenvolver e aprimorar tecnologias de monitoramento de integridade estrutural com sensores ópticos do tipo rede de Bragg, de modo a conferir maior versatilidade e confiabilidade para a implementação dessa tecnologia em aplicações diversas em engenharia. Para tanto, foram desenvolvidos sensores e *software* para atender demandas específicas de monitoramento em componentes da área de petróleo e gás. Os sensores desenvolvidos foram aplicados para monitoramento de um ensaio de fadiga em escala real de um segmento de duto flexível e para monitoramento de ensaios dinâmicos e estáticos em dutos de material compósito. Nos tubos compósitos, foi avaliada a instrumentação com os sensores embebidos na estrutura durante o processo de fabricação por *filament winding*, além de sensores aderidos nas paredes interna e externa do tubo. Para a qualificação dos sensores, diversas configurações de construção foram testadas e avaliadas em função do desempenho para cargas estáticas e dinâmicas, sendo alterados o tipo de resina e o esquema de montagem do sensor. Para a verificação da confiabilidade os resultados obtidos foram comparados com resultados adquiridos com a técnica de extensometria de resistência elétrica (ERE). Um *software* próprio de aquisição foi desenvolvido com o propósito de permitir autonomia no condicionamento, visualização dos dados e montagem de algoritmos. O estudo realizado mostrou que os sensores ópticos do tipo rede de Bragg apresentaram bom desempenho, podendo ser utilizados como solução viável para o monitoramento dos componentes avaliados, capaz de gerar dados confiáveis para uma avaliação de integridade estrutural.

Palavras-chave: Monitoramento de integridade estrutural; sensores de fibra óptica; rede de Bragg; dutos flexíveis; materiais compósitos.

ABSTRACT

Fiber Bragg Grating Sensors (FBGS) technology has a high potential as a monitoring solution for structural integrity evaluation. However, although there have been several examples of successful commercial applications over the past few decades, their use is still far from reaching their full potential, especially in Brazil. Challenges for this technology to be a broader solution for structural integrity monitoring include the need to investigate the potential application of the technology to meet specific demands reliably and technically and economically. The main goal of this work is to develop and improve technologies for structural integrity monitoring with fiber Bragg grating sensors, in order to provide greater versatility and reliability for the implementation of this technology in diverse engineering applications. To achieve this, sensors and software were developed to meet specific monitoring demands on oil and gas components. The developed sensors were applied for monitoring a full scale fatigue test of a flexible pipe sample and for monitoring dynamic and static tests in composite material pipe. To the composite pipes, the instrumentation with the sensors embedded in the structure during the filament winding manufacturing process was evaluated, as well as sensors attached to the inner and outer tube walls. Different configurations of sensor construction were tested and evaluated according to the performance for static and dynamic loads, changing the resin type and the sensor mounting configuration. The strain results obtained by FBGS were compared with results obtained by electrical resistance strain gages. A software acquisition was developed with the purpose of allowing autonomy in conditioning, data and assembly algorithms view. This work showed that fiber Bragg grating sensors performed well and can be used as a viable solution for monitoring the evaluated components, capable of generating reliable data for structural integrity assessment.

Keywords: Structural integrity monitoring; fiber optic sensors; fiber Bragg grating; flexible pipes; composite materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura simplificada de uma fibra óptica.	19
Figura 2 – Reflexão interna na fibra óptica.	20
Figura 3 – Tipos de fibra óptica: a) índice degrau, b) índice gradual e c) monomodo.	20
Figura 4 – Cabeamento para ERE (esquerda) e para FBGS (direita).	23
Figura 5 – Montagem experimental utilizada por Hill <i>et al.</i>	24
Figura 6 – Explicação de Bragg para o fenômeno de difração da radiação ondulatória por cristais.	25
Figura 7 – Princípio de funcionamento de um sensor FBG.	26
Figura 8 – Comprimento de onda de Bragg em função de (a) temperatura e (b) deformação axial mecânica.	29
Figura 9 – Deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida à tração e compressão.	29
Figura 10 – Desenho esquemático da difração de um feixe incidente em uma máscara de fase.	31
Figura 11 – Difração de um feixe de luz com incidência normal a máscara de fase.	31
Figura 12 – Sistemas de interrogação ópticos comerciais.	33
Figura 13 – Conector olho mágico.	36
Figura 14 – Diagrama de etapas de desenvolvimento e aplicação dos sensores FBG.	37
Figura 15 – Infraestrutura do LAMEF para construção de sensores FBG.	38
Figura 16 – Fabricação dos sensores FBG com uso de máscara de fase.	39
Figura 17 – Espectro óptico de uma cadeia com 16 sensores.	39
Figura 18 – Espectro óptico de uma rede de Bragg.	40
Figura 19 – Aplicação dos FBGS diretamente na amostra com a) cola do tipo cianocrilato e b) resina epóxi.	41
Figura 20 – Colagem da fibra no substrato (a) apenas nas extremidades e rede de Bragg livre e (b) em toda a extensão do substrato, incluindo a rede de Bragg.	42
Figura 21 – Sensor FBG encapsulado.	43
Figura 22 – Desenho esquemático da instrumentação dos arames para realização da avaliação estática.	43
Figura 23 – a) Sistemas de aquisição utilizados e b) amostra posicionada na máquina de tração.	44
Figura 24 – Desenho esquemático da instrumentação dos arames para realização da avaliação dinâmica.	45
Figura 25 – a) Máquina servo-hidráulica e b) amostras posicionadas no dispositivo de flexão em 4 pontos.	45
Figura 26 – Instrumentação de um duto flexível com sensores FBG.	47
Figura 27 – Segmento de duto flexível posicionado na bancada de ensaio.	48
Figura 28 – Detalhe da instrumentação do vaso de pressão com sensores FBGS.	50
Figura 29 – Instrumentação final da amostra com a) visão geral da amostra e b) detalhe do posicionamento dos sensores instalados na parede externa.	51
Figura 30 – Amostra posicionada no <i>bunker</i> , bomba e cilindro hidráulicos utilizados para execução dos testes.	52
Figura 31 – Sistemas de monitoramento do ensaio.	52
Figura 32 – Amostra de tubo compósito com dispositivos de vedação.	53
Figura 33 – Representação esquemática da instrumentação com sensores FBGS da amostra LD_BST_01.	53
Figura 34 – Representação esquemática da instrumentação com ERE's da amostra LD_BST_01.	54

Figura 35 – Posicionamento dos sensores ópticos e elétricos no tubo compósito.	54
Figura 36 – a) Instrumentação interna com sensores FBGS e b) sensores internos recobertos com resina epóxi.	55
Figura 37 – Representação esquemática da instrumentação com sensores FBGS da amostra LD_BST_02.	55
Figura 38 – Representação esquemática da instrumentação com ERE's da amostra LD_BST_02.	56
Figura 39 – Amostra de tubo compósito de PRFV posicionada no <i>bunker</i> para ensaio de explosão.	56
Figura 40 – Tela de configuração dos sensores FBGS.	57
Figura 41 – Tabela de edição de sensores.	58
Figura 42 – Vetor de leitura dos sensores.	59
Figura 43 – Modo de aquisição configuração radial.	59
Figura 44 – Modo de aquisição <i>streaming</i> em gráficos de amplitude e de diferença de centro.	60
Figura 45 – Modo de aquisição gráfico de intensidade.	60
Figura 46 – Amostra instrumentada com a) sensores FBGS e b) ERE.	61
Figura 47 – Amostra posicionada no dispositivo de flexão a 4 pontos.	62
Figura 48 – Amostra flexionada (esquerda) e sistema de controle do balão pneumático (direita).	62
Figura 49 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 1.	64
Figura 50 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 2.	65
Figura 51 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 3.	66
Figura 52 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 4.	66
Figura 53 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 5.	67
Figura 54 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 6.	68
Figura 55 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 7.	69
Figura 56 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 8.	69
Figura 57 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos no início do ensaio.	71
Figura 58 – Valores de deformação obtidos com sensores ópticos no início do ensaio.	71
Figura 59 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para um intervalo de tempo no início do ensaio.	72
Figura 60 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos após 1 milhão de ciclos.	73
Figura 61 – Valores de deformação obtidos com sensores ópticos após 1 milhão de ciclos.	73
Figura 62 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para um intervalo de tempo após 1 milhão de ciclos.	74
Figura 63 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos após aumento da amplitude de carregamento.	75
Figura 64 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos após aumento da amplitude de carregamento.	75
Figura 65 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para um intervalo de tempo logo após aumento da amplitude de carregamento.	76

Figura 66 – Perda de sinal do sensor óptico encapsulado com a Condição 7 (após 1,350 milhão de ciclos).....	77
Figura 67 – Perda de sinal do sensor óptico encapsulado com a Condição 8 (após 5,5 milhões de ciclos).....	78
Figura 68 – Valores de deformação obtidos com sensores ópticos após 6,5 milhões de ciclos.	79
Figura 69 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os sensores FBGS para os arames 1 ao 29.....	80
Figura 70 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os sensores FBGS para os arames 30 ao 58.....	81
Figura 71 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os ERE's para os arames 1 ao 29.....	81
Figura 72 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os ERE's para os arames 30 ao 58.....	82
Figura 73 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para os arames 1 a 29.	83
Figura 74 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para os arames 30 a 58.	83
Figura 75 – Instante da ruptura de um arame do duto flexível.....	85
Figura 76 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 10 bar.....	86
Figura 77 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 30 bar.....	87
Figura 78 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 50 bar.....	87
Figura 79 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 70 bar.....	88
Figura 80 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 80 bar.....	88
Figura 81 – Comparação entre os sensores FBGS internos e externos para as posições circunferencial de 120° (esquerda) e 240° (direita) da amostra LD_BST_01.....	90
Figura 82 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o lado A da amostra LD_BST_01.	91
Figura 83 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o centro da amostra LD_BST_01.	91
Figura 84 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o lado B da amostra LD_BST_01.	91
Figura 85 – Comparação entre os sensores FBGS internos e externos para as posições circunferencial de 0° (esquerda), 120° (centro) e 240° (direita) da amostra LD_BST_02.	92
Figura 86 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o lado A da amostra LD_BST_02.	93
Figura 87 – Exibição dos dados na forma de amplitude.....	95
Figura 88 – Exibição dos dados na forma de intensidade.	96
Figura 89 – Exibição do círculo de máximo e mínimo.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ERE	Extensometria de Resistência Elétrica
FBG	Fiber Bragg Grating
FBGS	Fiber Bragg Grating Sensor
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
TDM	Time-Division Multiplex
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UV	Ultravioleta
WDM	Wavelength-Division Multiplex
PRFV	Polímero Reforçado de Fibra de Vidro
PC	Posição Circunferencial

LISTA DE SÍMBOLOS

η_1	Índice de refração no meio 1
η_2	Índice de refração no meio 2
θ_i	Ângulo do raio incidente
θ_t	Ângulo do raio transmitido
c	Velocidade da luz no vácuo
v_1	Velocidade da luz no meio 1
θ_r	Ângulo do raio refratado
θ_c	Ângulo crítico
d	Distância entre planos na rede cristalina
n	Número inteiro
λ	Comprimento de onda
Λ	Período da rede
L	Comprimento
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
n_{eff}	Índice de refração efetivo da fibra óptica
T	Temperatura
Δ	Varição
α	Expansão térmica da sílica
η	Coefficiente termo-óptico
L_{FBG}	Comprimento da rede de Bragg
ρ_e	Coefficiente foto-elástico
ϵ_z	Deformação longitudinal
m	Ordem de difração
Λ_{pm}	Período da máscara de fase
θ_m	Ângulo da ordem de difração
λ_{uv}	Comprimento de onda da luz incidente
Λ_g	Período de gravação na fibra óptica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	FIBRAS ÓPTICAS	18
2.1.1	Lei de Snell-Descartes	19
2.1.2	Tipos de fibra óptica.....	20
2.1.3	Vantagens da fibra óptica	21
2.2	REDES DE BRAGG	21
2.2.1	Análise de mercado dos sensores FBG.....	23
2.2.2	Fotossensibilidade em fibras ópticas	24
2.2.3	Teoria das redes de Bragg	25
2.2.4	Fabricação de sensores do tipo rede de Bragg.....	30
2.2.5	Encapsulamento de sensores FBG.....	32
2.2.6	Sistemas de interrogação de redes de Bragg	33
2.2.7	Aplicação de sensores FBG.....	34
2.2.8	Aplicação de FBGS na indústria do petróleo e gás no Brasil.....	35
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	INSCRIÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	37
3.2	CONFIGURAÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO E ENCAPSULAMENTO DOS SENSORES FBG	40
3.3	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTÁTICO	43
3.4	METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO	44
3.5	APLICAÇÃO DOS SENSORES EM ESTRUTURAS <i>OFFSHORE</i>	46
3.5.1	Instrumentação da amadura de tração de um duto flexível submetido a ensaio de fadiga em escala real	46
3.5.2	Instrumentação de uma amostra de material compósito com sensores de fibra óptica embebidos na estrutura	48

3.5.3	Instrumentação de amostras de tubo de PRFV para ensaio de explosão.....	52
3.6	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	57
3.6.1	Programação do <i>software</i>	57
3.6.2	Metodologia para comparação entre o <i>software</i> desenvolvido e o <i>software</i> comercial	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTÁTICO DOS SENSORES	64
4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DOS SENSORES	70
4.3	APLICAÇÃO DOS SENSORES EM ESTRUTURAS <i>OFFSHORE</i>	80
4.3.1	Instrumentação da amadura de tração de um duto flexível submetido a ensaio de fadiga em escala real	80
4.3.2	Instrumentação de uma amostra de material compósito com sensores de fibra óptica embebidos na estrutura	85
4.3.3	Instrumentação de amostras de tubo de PRFV para ensaio de explosão.....	89
4.4	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	93
4.4.1	Comparativo entre o <i>software</i> desenvolvido e o <i>software</i> comercial.....	93
4.4.2	Aplicação prática do <i>software</i> desenvolvido.....	95
5	CONCLUSÃO.....	97
6	TRABALHOS FUTUROS	98
7	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da integridade de estruturas (*Structural Health Monitoring* ou SHM, do inglês) vem apresentando uma importância cada vez maior em diversas áreas da engenharia. A falha em componentes e estruturas de engenharia pode acarretar em prejuízos financeiros, causar acidentes, desastres ambientais e outros riscos à sociedade. A possibilidade de ocorrência de falhas cresce com o aumento do grau de exigência ao qual são submetidas as estruturas, fazendo com que seja necessário o desenvolvimento de técnicas de monitoramento que disponibilizem dados confiáveis que possam ser utilizados para avaliação da sua segurança operacional e determinação da vida remanescente dessas estruturas.

A tecnologia de sensores ópticos tem aparecido nas últimas décadas como uma solução de grande potencial para aplicações de monitoramento em diversas áreas da indústria, principalmente à nível mundial, levando ao desenvolvimento de diversos estudos com a utilização deste tipo de sensores.

Algumas vantagens intrínsecas dos sensores ópticos, como imunidade a interferências eletromagnéticas, possibilidade de utilização em altas temperaturas, ser quimicamente inerte e potencialmente pequeno e leve, tornam possível a aplicação destes sensores em áreas onde não é viável a utilização de outros sensores convencionais (LÓPEZ-HIGUERA et al, 2011).

Em algumas aplicações extremas, como no caso da indústria do petróleo e gás, é possível vislumbrar a utilização de sensores ópticos como solução única de monitoramento confiável e de longo prazo (DOS SANTOS, 2014). A Petrobras, em parceria com a PUC/RJ, desenvolveu um sistema de monitoramento em tempo real das deformações da armadura de tração externa de dutos flexíveis utilizando sensores ópticos do tipo rede de Bragg (*Fiber Bragg Grating Sensors* ou FBGS, do inglês) (MORIKAWA et al, 2010).

Os FBGS são o tipo de sensor óptico mais utilizado. Este tipo de sensor pode detectar e medir um grande número de parâmetros físicos devido sua capacidade de rápida resposta quanto à variação de deformação e temperatura, tornando-se uma solução atrativa para diferentes tipos de aplicações na indústria.

Um estudo desenvolvido por Méndez (2007) mostra que, na época em que o trabalho foi realizado, o mercado de sensores FBG apresentava uma taxa de crescimento anual de 15 a 25%. Já um estudo desenvolvido pela MarketWatch (2019) relata que o mercado de FBGS registrará

uma taxa de crescimento anual composta de 25,3% em termos de receita, fazendo com que o tamanho do mercado global cresça de US\$ 670 milhões em 2019 para US\$ 2070 milhões em 2024.

No entanto, embora o cenário mostre esse potencial de crescimento dos sensores de fibra óptica e já existam diversos exemplos de aplicações comerciais bem-sucedidas de FBGS em variadas áreas da indústria, essa tecnologia de sensoriamento ainda não se encontra completamente difundida no Brasil. O estudo da MarketWatch (2019) coloca como algumas barreiras significativas para a entrada no mercado de FBGS os custos elevados de desenvolvimento dos sensores, os requisitos de capital e regulatórios necessários e os direitos de propriedade intelectual, enquanto Méndez (2007) destaca a falta de entendimento sobre o uso e benefícios dos sensores de fibra óptica, a desconfiança quanto à robustez dos sensores e, principalmente, o alto custo e a falta de confiabilidade de produtos existentes.

Com base nesse panorama, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver e aprimorar tecnologias de monitoramento de integridade estrutural com sensores ópticos do tipo rede de Bragg, de modo a conferir maior versatilidade e confiabilidade para a implementação dessa tecnologia em aplicações diversas em engenharia.

Para alcançar este objetivo foram desenvolvidos sensores e software para aplicação em demandas específicas de monitoramento de componentes da indústria do petróleo e gás. As estruturas escolhidas para fazer a aplicação dos sensores ópticos desenvolvidos foram um segmento de duto flexível submetido a um ensaio de fadiga em escala real e dutos compósitos de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) submetidos a carregamentos estáticos e dinâmicos.

A escolha da utilização de estruturas da área do petróleo e gás para o desenvolvimento deste trabalho deve-se à expertise do LAMEF na execução e monitoramento de ensaios deste tipo de componentes. O laboratório trabalha há diversos anos com a execução de projetos nesta área de atuação e, mais recentemente, adquiriu toda a infra estrutura necessária para a produção de sensores FBG, o que possibilitou a elaboração deste estudo.

O trabalho dividiu-se em diferentes etapas, sendo a primeira delas a construção e qualificação estática e dinâmica de sensores FBG. Para a construção dos sensores foram testadas diferentes configurações de montagem, sendo alterados os tipos de resina utilizada no encapsulamento e as regiões de colagem do sensor. Os sensores desenvolvidos tiveram seus desempenhos avaliados através da realização de ensaios de tração e de fadiga em 4 pontos,

sendo que a confiabilidade dos resultados foi verificada através da comparação com resultados obtidos com extensômetros de resistência elétrica (ERE).

Outra etapa importante do trabalho consistiu no desenvolvimento de um *software* próprio, buscando alcançar uma maior flexibilidade para otimização do sistema, desde a parte de configuração dos parâmetros de monitoramento, interface gráfica, aquisição, condicionamento e armazenamento de dados, possibilitando ainda a integração com outros algoritmos de análise de falha.

A etapa final do trabalho consistiu na aplicação dos sensores desenvolvidos para o monitoramento dos componentes da área do petróleo e gás. Para o segmento de duto flexível foi realizada a instrumentação de sensores em todos os arames da armadura de tração externa. Nos tubos compósitos PRFV foi avaliada a inserção dos sensores embebidos na estrutura do duto durante o processo de fabricação por *filament winding* e também a aplicação dos sensores nas paredes interna e externa.

Além do objetivo principal, foram propostos neste trabalho os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a confiabilidade dos resultados obtidos com os FBGS desenvolvidos, para carregamentos estáticos e dinâmicos, através da comparação com resultados de ERE;
- Avaliar se existe influência do método de construção do sensor nos resultados obtidos;
- Determinar, dentre as configurações avaliadas neste trabalho, qual a melhor configuração de construção do sensor FBG;
- Verificar a aplicabilidade de FBGS para monitoramento de componentes utilizados na indústria do petróleo e gás através da aplicação em um segmento de duto flexível submetido a um ensaio de fadiga em escala real e em dutos compósitos PRFV ensaiados com pressão interna;
- Verificar a capacidade de utilização dos sensores desenvolvidos para a detecção de ruptura de arames de dutos flexíveis em ensaio de fadiga;
- Avaliar a possibilidade de inserção dos sensores FBG embebidos na estrutura de dutos compósitos de PRFV durante o processo de fabricação.
- Melhorar a versatilidade na utilização dos FBGS através do desenvolvimento de um *software* próprio para aquisição de dados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura abordando os tópicos mais importantes para a execução deste trabalho.

2.1 FIBRAS ÓPTICAS

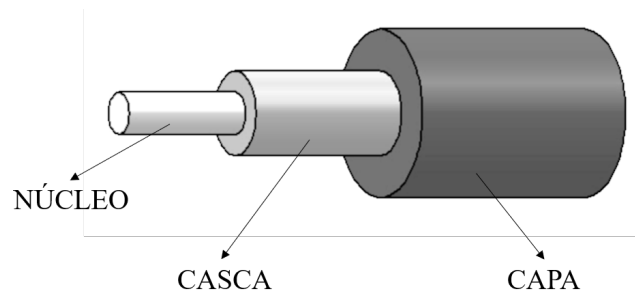
A fibra óptica tem se mostrado um elemento importante no desenvolvimento da tecnologia. Por ser um material dielétrico e não sofrer interferências eletromagnéticas, a fibra possui um papel importante em sistemas de comunicação de dados. Além do mais, diversos tipos de sensores ópticos podem ser implementados utilizando a fibra óptica como elemento sensor ou apenas conduzindo a luz para o ponto de medição.

Sensores a fibra óptica são dispositivos promissores para uma variedade de aplicações devido a sua acurácia inerente, longo tempo de estabilidade e fácil implementação. Nos sensores a fibra óptica, o sinal detectado corresponde a uma mudança na frequência da luz, na fase ou na intensidade (MOREIRA, 2004).

As fibras ópticas são capilares formados por materiais dielétricos cristalinos e homogêneos que, em sistemas de comunicações e sensoriamento óptico, podem ser utilizadas como guias de ondas nas regiões do visível e infravermelho. Possuem dimensões físicas microscópicas, análogas às de um fio de cabelo. As mais utilizadas são compostas de sílica (SiO_2) pura ou dopada. A dopagem altera algumas propriedades do vidro, como a viscosidade e o ponto de fusão, mudando conseqüentemente, o índice de refração do núcleo (COROTTI, 2015).

A estrutura mais simplificada de uma fibra óptica consiste em três camadas concêntricas com diâmetros, índices de refração e funções distintas. A região central ou núcleo é envolto por uma casca com índice de refração menor, sendo esta diferença de índice de refração em torno de 1%. Como o índice de refração do núcleo é maior do que o da casca, um feixe de luz acoplado ao guia de onda é confinado em seu núcleo por reflexão interna total, conforme a Lei de Snell-Descartes da óptica geométrica. Ao redor da casca, há ainda uma camada, denominada capa, a qual tem por objetivo proteção e isolamento, agregando vigor e flexibilidade à fibra (CHERIN, 1983; GOWAR, 1984). Na Figura 1 é apresentada a estrutura simplificada de uma fibra óptica, destacando as camadas existentes na fibra.

Figura 1 – Estrutura simplificada de uma fibra óptica.



Fonte: Adaptado (MACHADO, 2014).

2.1.1 Lei de Snell-Descartes

Os raios de luz que atravessam a superfície de separação entre meios transparentes com índices de refração diferentes são parcialmente refletidos e parcialmente transmitidos através da superfície segundo a lei da reflexão e a lei de Snell, às quais pode-se dar os seguintes enunciados:

- **Lei da reflexão:** para um raio de luz que se reflete numa superfície suave, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, medidos em relação à normal.
- **Lei de Snell:** para um raio de luz monocromático que atravesse a superfície de separação de dois meios transparentes com índices de refração η_1 e η_2 , o ângulo do raio incidente (θ_i) e o ângulo do raio transmitido (θ_t) (ângulo de refração), medidos com respeito à normal, satisfazem a relação demonstrada na equação (1) (FASSARELLA, 2007):

$$\eta_1 \text{sen} (\theta_i) = \eta_2 \text{sen} (\theta_t) \quad (1)$$

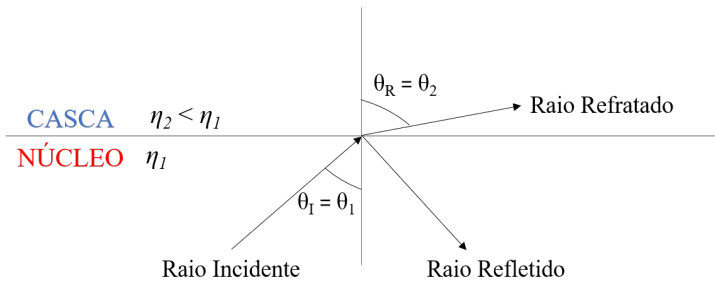
O índice de refração relaciona a velocidade de propagação da onda eletromagnética com o tipo de meio, isto é, para uma luz monocromática:

$$\eta_1 = \frac{c}{v_1} \quad (2)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo e v_1 é a velocidade da luz no meio 1.

Se $\eta_1 > \eta_2$, conforme mostrado na Figura 2, se tem a possibilidade de o raio refratado se aproximar do eixo horizontal, isto é, $\theta_r = 90^\circ$, ângulo limite para que ocorra a refração. Nesse caso, $\theta_i = \theta_c$, denominado ângulo crítico. Acima desse ângulo, $\theta_i > \theta_c$, se tem reflexão interna total (MACHADO, 2014).

Figura 2 – Reflexão interna na fibra óptica.



Fonte: Adaptado (MACHADO, 2014).

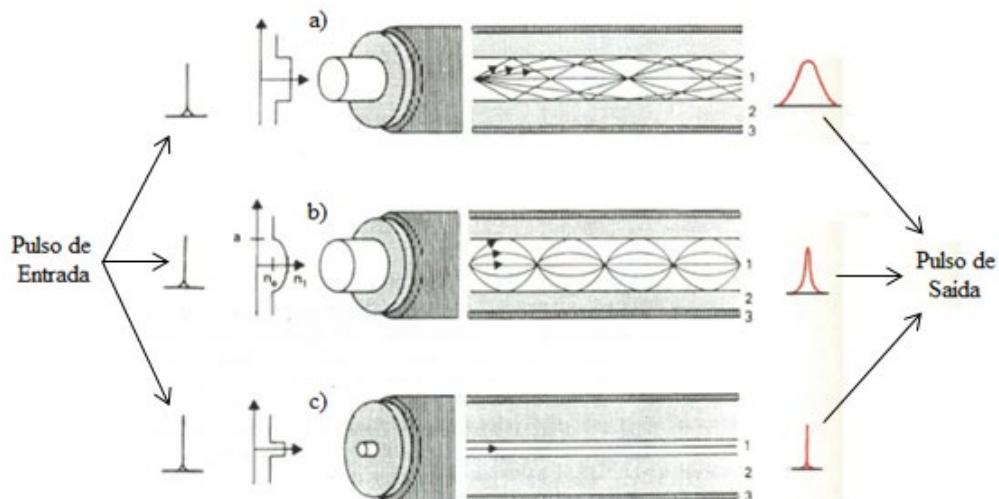
2.1.2 Tipos de fibra óptica

Uma das principais características de uma fibra óptica é quanto ao modo de propagação, podendo estas ser diferenciadas em monomodo e multimodo.

As fibras multimodo possuem um núcleo composto de um material de índice de refração constante e superior ao da sua casca. Possuem vários modos de propagação, a luz pode viajar por diversos caminhos diferentes. De acordo com o perfil da variação de índices de refração da casca com relação ao do núcleo, classificam-se em índice degrau (Figura 3.a) e índice gradual (Figura 3.b). As fibras de índice gradual apresentam desempenho superior às de índice degrau.

As fibras monomodo apresentam dimensões menores e maior capacidade de transmissão, possuem um único modo de propagação, transmitindo apenas o raio axial. Esse tipo de fibra possui um núcleo e uma blindagem de diâmetros reduzidos, além de a diferença entre seus índices de refração também ser bem pequena, possibilitando que a luz se propague em linha reta ao longo do cabo, conforme ilustra a Figura 3.c (MACHADO, 2014).

Figura 3 – Tipos de fibra óptica: a) índice degrau, b) índice gradual e c) monomodo.



Fonte: Adaptado (MACHADO, 2014).

2.1.3 Vantagens da fibra óptica

Em sistemas de telecomunicações, as fibras ópticas, devido as suas características, apresentam algumas vantagens em relação aos guias de transmissão convencionais, tais como, o par trançado e o cabo coaxial. As fibras ópticas são constituídas de vidro ou plástico, material abundante e que é um isolador elétrico, não havendo necessidade de se preocupar com aterramento, problemas de interface de equipamento e interferência eletromagnética (MOREIRA, 2004).

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 (SIMÕES, 2011).

2.2 REDES DE BRAGG

Vários tipos de sensores de fibra óptica baseados em diversos princípios de funcionamento foram desenvolvidos, dentre eles Mach-Zender, Michelson, Polarimétrico, Dual-Mode, Fabry-Perot Intrínseco, Fabry-Perot Extrínseco, Redes de Bragg, Etalon, Sagnac, entre outros. (RASHLEIGH, 1980; BERTHOLDS; DANDLIKER, 1986; UDD, 1990; CANNING; SOMMER; ENGLUND, 2001).

Os sensores baseados em rede de Bragg em fibra óptica têm gerado grande interesse nos últimos anos devido as suas aplicações em diversos campos, como industriais, ambientais e estruturais. Os FBGS (*Fiber Bragg Grating Sensors*) são simples, versáteis e pequenos elementos sensores intrínsecos, que podem ser inscritos em fibra óptica e que, conseqüentemente, têm todas as vantagens normalmente atribuídas às fibras ópticas (FERNANDES, 2016).

As redes em fibra são estruturas periódicas de modulação do índice de refração produzidas no núcleo e/ou casca de uma fibra óptica ao longo do eixo de propagação. Essa modulação atua como uma rede periódica para a luz guiada no núcleo da fibra (ERDORGAN, 1997). A rede de

Bragg opera como um filtro espectral reflexivo que seleciona uma estreita faixa de comprimento de onda de uma fonte de banda larga em comprimento de onda (COROTTI, 2015).

Hill *et al* (1978) foram os primeiros pesquisadores a observar um mecanismo fotossensível no núcleo de fibras de sílica dopadas com germânio, manifestado pelas alterações do índice de refração induzidas pela luz. Lam e Garside (1981) realizaram um estudo para fabricação de filtros em fibras ópticas do tipo monomodo, padrão de telecomunicações, identificando a capacidade de multiplexação dos filtros através da divisão dos comprimentos de ondas refletidos.

O uso de redes de Bragg em fibra óptica como sensores foi proposto por Meltz *et al* (1989), a partir do desenvolvimento de uma técnica de gravação das redes utilizando um método holográfico de modo perpendicular à fibra óptica. Esta técnica possibilitou uma nova maneira de realizar medições pontuais de temperatura e deformação, através do monitoramento da variação do comprimento de onda de Bragg de cada sensor, sintonizados individualmente, um em cada comprimento de onda distinto.

A descoberta de redes de Bragg em fibra óptica teve um impacto significativo na pesquisa e desenvolvimento em sensores de fibra óptica e aplicações no campo de telecomunicações. As redes de Bragg são de natureza intrínseca e têm a capacidade de controlar as propriedades da luz que passam dentro da fibra. Os sensores FBGS são usados em telecomunicação como filtros ópticos, componentes de compensação de dispersão e sistemas de multiplexação por divisão de onda (WDM – *Wavelength-Division Multiplex*) (OTHONOS; KALLI, 1999).

Em comparação às outras tecnologias disponíveis, os sensores a fibra óptica apresentam diversas vantagens, tais como: tamanho compacto, leveza, liberdade de configuração geométrica, imunidade à interferência eletromagnética, alta sensibilidade, ampla largura de banda e possibilidade de multiplexação de sinais. Não obstante, além de permitir sensoriamento pontual ou distribuído, a fibra óptica é inerte a uma gama considerável de agentes químicos e biológicos, podendo ser aplicada no monitoramento de ambientes inóspitos (FUJIWARA, 2012). Além disso, as fibras ópticas podem e frequentemente trabalham em comprimentos de transmissão muito longos, então o sensor pode facilmente estar a quilômetros de distância da estação de monitoramento e os dados podem ser transmitidos entre os dois locais sem perdas - outra característica única e extremamente valiosa (CULSHAW, 2004). A Figura 4 ilustra a vantagem de multiplexação da fibra óptica, comparando a quantidade de cabeamento necessária

para 400 sensores do tipo extensômetros de resistência elétrica (ERE) com o cabeamento para 3000 sensores do tipo FBG.

Figura 4 – Cabeamento para ERE (esquerda) e para FBGS (direita).



Fonte: (CUSANO, 2014).

No entanto, também existem algumas limitações e desvantagens associadas ao uso de sensores FBG. Suas principais desvantagens estão ligadas ao fato de serem simultaneamente sensíveis à tensão (através da relação com a deformação), temperatura, pressão e efeitos de radiação. Também sua sensibilidade à tensão transversal, a existência de um número limitado de fornecedores e a ausência de normatização.

2.2.1 Análise de mercado dos sensores FBG

O mercado total de sensores FBG é estimado em cerca de US\$ 100 milhões, com uma taxa de crescimento anual de 15% a 25%. Este mercado é composto basicamente por três segmentos: dispositivos de detecção (pressão, temperatura), instrumentação (equipamentos de aquisição de dados, conexões) e serviços de integração e desenvolvimento de sistemas. Os obstáculos encontrados dentro do mercado são a ausência de normatização para sensores FBG e a falta de habitualidade dos usuários com este tipo de tecnologia (MÉNDEZ, 2007).

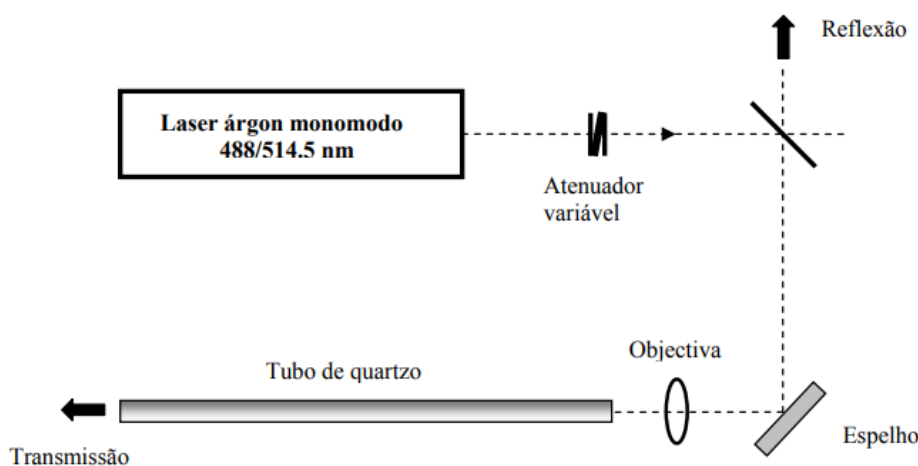
O mercado brasileiro é predominantemente dominado por empresas estrangeiras, oriundas principalmente da Europa. Estas empresas apresentam em seu portfólio uma ampla variedade de sensores para monitoramento de tensão, temperatura, inclinação, aceleração e deslocamento em uma ampla gama de aplicações, além de fornecimento de sistemas de aquisição de dados. No Brasil esta tecnologia ainda é aplicada de modo muito incipiente, com um número bastante reduzido de empresas e instituições que dominam a tecnologia de construção de sensores FBG e de sistemas de aquisição de dados. Dentre as instituições nacionais, as de ensino e pesquisa se mostraram mais atuantes (QUERES; TEIXEIRA, 2014).

2.2.2 Fotossensibilidade em fibras ópticas

A fabricação das primeiras redes de Bragg está diretamente associada à descoberta do mecanismo de fotossensibilidade nas fibras ópticas por Hill *et al* (1978). A fotossensibilidade na fibra óptica refere-se a uma mudança permanente no índice de refração do núcleo da fibra quando exposto à luz com comprimentos de onda e intensidades características, que dependem do material do núcleo (SENGUPTA, 2015).

A fotossensibilidade da fibra foi observada pela primeira vez no arranjo experimental demonstrado na Figura 5. Uma luz de comprimento de onda contínuo azul (488 nm) de um laser de íon argônio foi emitida sobre um pequeno pedaço de fibra óptica monomodo, enquanto a intensidade da luz refletida era monitorada. Inicialmente, a intensidade de luz refletida era baixa, porém, após um período de poucos minutos, essa intensidade cresceu de forma até quase toda a luz emitida ser refletida de volta (HILL; MELTZ, 1997). Verificou-se que o aumento da amplitude no modo contra propagante crescia em concordância com o aumento periódico do índice de refração da fibra (MARQUES, 2008). O crescimento da luz refletida foi explicado em termos de um novo efeito não linear chamado "fotossensibilidade", que permite uma gravação de redes de Bragg em fibra óptica (HILL; MELTZ, 1997).

Figura 5 – Montagem experimental utilizada por Hill *et al*.



Fonte: (MARQUES, 2008).

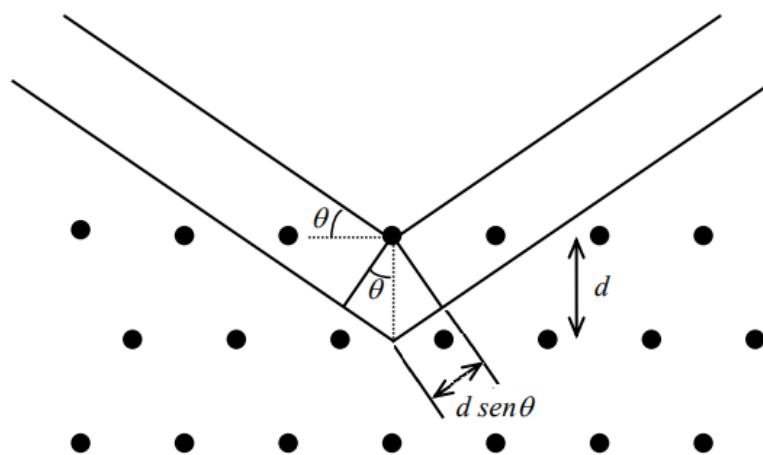
As origens do fenômeno de fotossensibilidade e a conseqüente mudança do índice de refração ainda não foram totalmente compreendidas, pois um único modelo não consegue explicar os resultados experimentais mostrados na literatura. Alguns estudos apontam que a

fotossensibilidade é função de vários mecanismos, como fotoquímicos, fotomecânicos, termoquímicos, entre outros (WERNECK *et al*, 2013).

2.2.3 Teoria das redes de Bragg

O termo redes de Bragg foi adotado por referência a lei de Bragg da difração de raios X. A difração de Bragg ocorre quando o espaçamento entre as fendas é da ordem de alguns comprimentos de onda da luz incidente. Neste caso, a luz é espalhada de forma espelhada pelos átomos do material e ocorrem interferências construtivas de acordo com a lei de Bragg. Para um sólido cristalino com planos de rede separados por uma distância “d”, as ondas são dispersas e interferem de forma construtiva se a distância do caminho de cada onda for igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda. (WERNECK *et al*, 2013). A Figura 6 mostra um desenho esquemático do fenômeno de difração.

Figura 6 – Explicação de Bragg para o fenômeno de difração da radiação ondulatória por cristais.



Fonte: (CAPAZ, 2016).

Com base na análise do desenho esquemático da Figura 6 é possível de deduzir a equação (3).

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (3)$$

Onde θ é o ângulo de incidência, n é um número inteiro e λ é o comprimento de onda. Um padrão de difração é obtido medindo a intensidade da radiação dispersa em função do ângulo θ . Sempre que as ondas dispersas satisfazem a condição de Bragg, observa-se uma forte intensidade no padrão de difração, conhecido como pico de Bragg. A teoria da difração pode ser consultada em Cullity (1967).

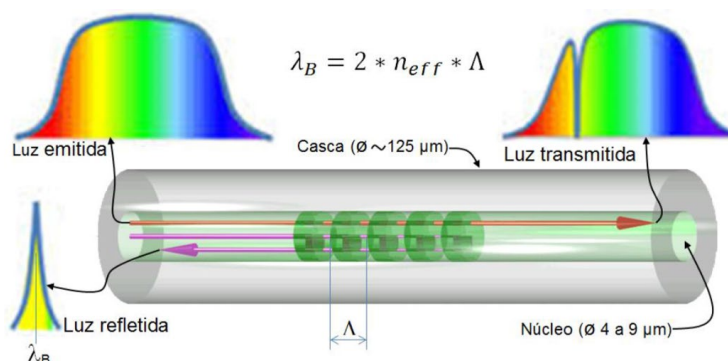
As redes de Bragg funcionam como um espelho altamente seletivo, para comprimentos de onda que satisfaçam a condição de Bragg. O período espacial de modulação (Λ) e o comprimento total da rede (L) determinam quais comprimentos de onda terão maior, menor ou nenhuma reflexão (SADKOWSKI *et al.*, 1995; GOLNABI, 1999). A primeira ordem é a mais intensa e é possível desprezar as demais, para a maioria das aplicações, o valor utilizado então é $n = 1$ (CARVALHO, 2010). A equação (3), desenvolvida para o vácuo, tem que ser adaptada para sílica, uma vez que as distâncias percorridas pela luz são afetadas pelo índice de refração da fibra. Assim, considerando-se a incidência do feixe luminoso perpendicular à rede ($\theta = 90^\circ$), tem-se a equação (4):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (4)$$

Portanto, o comprimento de onda de Bragg (λ_B) de uma determinada rede de Bragg é uma função do índice de refração efetivo da fibra óptica (n_{eff}) e do período da rede (Λ).

O princípio de funcionamento dos sensores FBG baseia-se no fenômeno da reflexão de Fresnel, o qual dita que um raio de luz sofre reflexão ao atravessar de um meio a outro com índice de refração diferente (HALLIDAY *et al.*, 2004). Assim, a luz, ao atingir as variações de índice de refração no núcleo da fibra, sofre sucessivas reflexões. Todas as reflexões que não obedecem à condição de Bragg aparecem fora de fase e acabam por se cancelar. Entretanto, os comprimentos de onda que satisfazem à condição de Bragg sofrem interferência construtiva. Esta parcela da luz é então refletida e se desloca no sentido oposto ao inicial (LOUZADA, 2013). A Figura 7 apresenta o princípio de funcionamento de uma rede de Bragg quando uma fonte de luz de banda larga espectral passa pelo sensor.

Figura 7 – Princípio de funcionamento de um sensor FBG.



Fonte: Adaptado (CHIRANJIT; QUAZI; BISWAJIT, 2015).

Devido aos efeitos foto-elástico e termo-ópticos, tanto esforços mecânicos longitudinais quanto variações na temperatura provocam o deslocamento de

onda de Bragg (QUINTERO, 2006). Portanto, é necessário estabelecer matematicamente essa relação, a fim de poder quantificar os resultados obtidos experimentalmente (KROHN, 2000; OLIVEIRA, 2011).

Para determinar a sensibilidade dos sensores FBG quanto à temperatura e deformação se inicia pela equação (4), a sensibilidade à temperatura equivale à derivada parcial da equação (4) em relação à temperatura:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + 2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \quad (5)$$

Substituindo-se (4) em (5):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \lambda_B + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \lambda_B \quad (6)$$

Ou, rearranjando:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Delta T \quad (7)$$

O primeiro termo é a expansão térmica da sílica (α) e o segundo termo é o coeficiente termo-óptico (η) que representa a dependência da temperatura do índice de refração (dn/dT). Substituindo tem-se:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (8)$$

A equação (8) apresenta a dependência do comprimento de onda com a variação da temperatura.

A sensibilidade à deformação é a derivada da equação (4) em relação ao deslocamento:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta L} = 2n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} + 2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \quad (9)$$

Substituindo-se (4) em (9):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} \Delta L + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \Delta L \quad (10)$$

O primeiro termo na equação (10) é a deformação do período de rede devido à extensão da fibra. Suponha que tem-se um comprimento L de uma fibra com uma rede de Bragg inscrita, aplicando-se uma tensão longitudinal sobre a fibra de comprimento L , tem-se uma deformação relativa $\Delta L/L$. Ao mesmo tempo, se a rede de Bragg tiver um comprimento L_{FBG} , ela sofrerá uma deformação $\Delta L_{FBG}/L_{FBG}$, mas como a rede de Bragg está na fibra, então $\Delta L_{FBG}/L_{FBG} =$

$\Delta L/L$. Uma vez que o deslocamento da rede de Bragg devido à tensão longitudinal é igual ao deslocamento do período de grade, o primeiro termo na equação (10) é a deformação na fibra.

O segundo termo na equação (10) é o coeficiente foto-elástico (ρ_e), referente à variação do índice de refração devido à tensão. Em alguns sólidos, dependendo do coeficiente de Poisson do material, este efeito é negativo, ou seja, quando o material se expande em um meio transparente, como a fibra óptica, por exemplo, o índice de refração diminui devido à diminuição da densidade do material. Então, quando uma tração longitudinal é aplicada à fibra, os dois termos na equação (10) produzem efeitos opostos, um aumentando a distância entre grades e aumentando assim o comprimento de onda de Bragg e o outro diminuindo o índice de refração efetivo e diminuindo assim o comprimento de onda de Bragg. O efeito combinado de ambos os fenômenos é a forma do deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da deformação, representado pela equação (11) (QUINTERO, 2006).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_Z \quad (11)$$

Onde ε_Z é a deformação longitudinal da rede de Bragg.

Combinando as equações (8) e (11), chegamos à equação (12), que representa a sensibilidade do comprimento de onda de Bragg aos efeitos da temperatura e da tensão:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_Z + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (12)$$

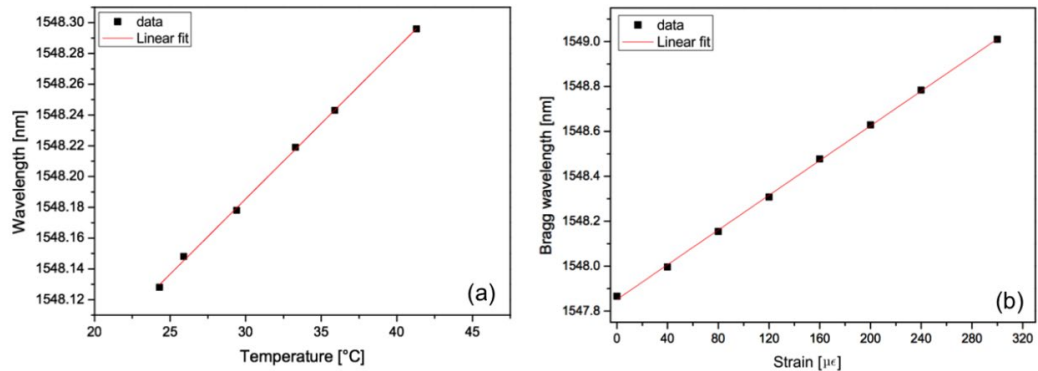
Considerando-se uma fibra óptica de sílica com um núcleo dopado de germânio, os parâmetros são:

$$\rho = 0,22; \alpha = 0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \eta = 8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Desta forma, a sensibilidade de redes de Bragg em fibra óptica para temperatura e deformação equivalem a 14,18 pm/ $^\circ\text{C}$ e 1,2 pm/ μe , respectivamente, quando operando no comprimento de onda próximo a 1500 nm. Tais valores teóricos, no entanto, não são absolutos, pois cada rede de Bragg do mesmo lote de fabricação apresentará sensibilidades ligeiramente diferentes.

Diversos estudos demonstram que a variação do comprimento de onda de Bragg acontece em função de deformação axial e temperatura, a Figura 8 apresenta a evolução do deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura (esquerda) e em função de deformação axial mecânica (direita) (KINET, 2014).

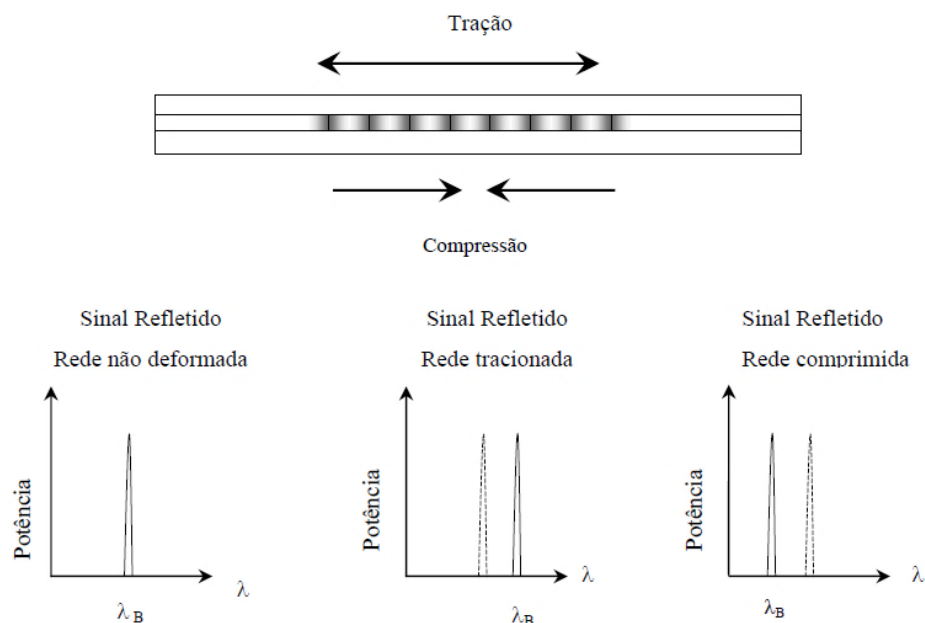
Figura 8 – Comprimento de onda de Bragg em função de (a) temperatura e (b) deformação axial mecânica.



Fonte: (KINET *et al*, 2014).

Uma representação dos efeitos de tração e compressão de uma rede de Bragg pode ser visualizada na Figura 9 que mostra o exemplo de uma rede de Bragg atuando como sensor. Pode-se observar que ocorre um deslocamento no comprimento de onda de Bragg quando esta é submetida à tração ou compressão. No caso de tração, uma variação positiva do comprimento de onda será obtida como consequência de um aumento na periodicidade espacial da rede de Bragg. Já para uma rede de Bragg submetida à compressão, a variação do comprimento de onda será negativa, devido a uma diminuição no período espacial da rede de Bragg (QUINTERO, 2006).

Figura 9 – Deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida à tração e compressão.



Fonte: (QUINTERO, 2006).

Conforme verificado na equação (12), devido à sensibilidade intrínseca do sensor FBG quanto à variação de temperatura e deformação, técnicas de compensação devem ser realizadas para distinção destes valores (DI SANTE, 2015). Diferentes soluções foram desenvolvidas para compensar a sensibilidade do sensor FBG em relação à temperatura. O método mais simples consiste em medir a temperatura com um sensor FBG adicional, livre de deformação, desde que ambos os sensores estejam expostos à mesma temperatura (KIM *et al*, 2008).

2.2.4 Fabricação de sensores do tipo rede de Bragg

Com a descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas, uma nova classe de dispositivos foi desenvolvida alterando o índice de refração em períodos equidistantes no núcleo da fibra (HILL *et al*, 1978). Esta fotossensibilidade permite a gravação direta do núcleo das fibras ópticas através da sua exposição a padrões periódicos de radiação ultravioleta ($\lambda = 266$ nm). Existem diversas técnicas que permitem obter períodos sub micrométricos adequados à fabricação de redes de Bragg (MELTZ *et al*, 1989; ZHANG, *et al*, 1994; MALO *et al*, 1993; MIHAILOV; GOWER, 1994).

O mecanismo de gravação de redes de Bragg em fibras consiste na alteração modulada do índice de refração através da incidência de radiação ultravioleta na fibra óptica. Esta alteração está associada ao germânio, que é dopante da sílica, presente no núcleo da fibra óptica (HILL *et al*, 1993). Atualmente, a técnica mais utilizada faz uso de um elemento difrativo denominado de máscara de fase, para gerar o padrão espacial da rede (HILL *et al*, 1993; ANDERSON *et al*, 1993).

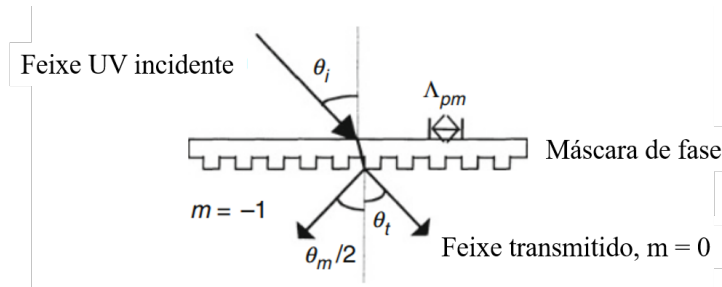
A máscara de fase é normalmente fabricada por um dos seguintes métodos: por exposição a um feixe de elétrons para formar o padrão (DIX; MCKEE, 1992; SWANTON *et al*, 1996), ou por exposição holográfica (CURRAN, 1981). As características significativas das máscaras de fase são os sulcos gravados na placa de sílica, responsável pela transmissão da radiação UV, com uma relação de período e profundidade cuidadosamente controlada.

O princípio de operação é na difração de um feixe de luz UV incidente na máscara de fase em várias ordens ($m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$). As ordens incidentes e difratadas satisfazem a equação da difração geral:

$$A_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{(\text{sen}\frac{\theta_m}{2} - \text{sen}\theta_i)} \quad (13)$$

Onde Λ_{pm} é o período da máscara de fase, θ_m é o ângulo da ordem de difração, λ_{uv} é o comprimento de onda incidente e θ_i o ângulo da luz incidente (KASHYAP, 2010). A Figura 10 apresenta um desenho esquemático de um feixe de luz incidindo em uma máscara de fase.

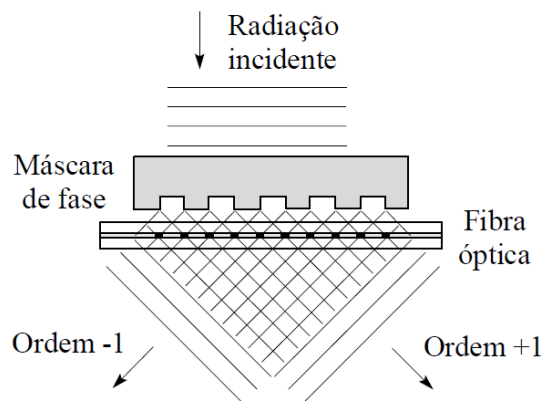
Figura 10 – Desenho esquemático da difração de um feixe incidente em uma máscara de fase.



Fonte: (KASHYAP, 2010).

Quando a radiação UV tiver uma incidência normal à máscara de fase, $\theta_i = 0$, a radiação é difratada nas ordens $m = 0$ e $m = \pm 1$. A potência de ordem zero é suprimida para menos de 3%, as ordens $+1$ e -1 prevalecem com a maior parte da potência restante. Estas duas ordens começam do mesmo ponto do outro lado da máscara de fase, porém são divergentes. No campo próximo, um padrão de interferência é produzido à medida que as duas ordens se cruzam, conforme mostrado na Figura 11 (KASHYAP, 2010).

Figura 11 – Difração de um feixe de luz com incidência normal a máscara de fase.



Fonte: (FERREIRA *et al*, 2004).

Desta forma o padrão de interferência gerado pelas ordens de difração ± 1 possui um período Λ_g relacionado com o ângulo de difração θ_m , dado pela equação:

$$\Lambda_g = \frac{\lambda_{uv}}{2 \sin \frac{\theta_m}{2}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (14)$$

A fibra óptica é mantida junto da superfície da máscara na qual a radiação ultravioleta é focada através de uma lente cilíndrica. O período de modulação pela interferência é sempre metade do período gravado na máscara de fase, independente do comprimento de onda da fonte ultravioleta usada (HAND; RUSSEL, 1990; ZHANG *et al*, 1994; BILODEAU *et al*, 1990) ou seja, o período de modulação do padrão de interferência só depende do período da máscara de fase. Assim, para produzir redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda é necessário ter máscaras de fase distintas. No entanto, a extrema simplicidade no alinhamento e a estabilidade do padrão de interferência permitem fabricar redes de Bragg com elevada reprodutibilidade (CARVALHO, 2010).

2.2.5 Encapsulamento de sensores FBG

A fibra óptica nua é muito frágil e pode ser facilmente danificada em ambientes de campo severo. O design adequado do sistema baseado em redes de Bragg e os métodos de encapsulamento sensíveis relacionados são cruciais para assegurar uma proteção adequada para os sensores FBG. Vários métodos de encapsulamento de sensores de rede de Bragg podem ser encontrados em diferentes literaturas (CHENG-YU *et al*, 2016).

O encapsulamento protetor da rede de Bragg pode resolver o problema da durabilidade até certo ponto, mas quando o sensor está em uso real geralmente enfrenta problemas em detectar exatamente a deformação da estrutura monitorada. Os coeficientes de sensibilidade da fibra nua à deformação e tensão são, respectivamente, $0,0012 \text{ nm}/\mu\epsilon$ e $0,003 \text{ nm}/\text{MPa}$, estes coeficientes de sensibilidade são considerados baixos. Além disso, a precisão da rede de Bragg é de $1 \mu\epsilon$, não sendo fácil atender aos requisitos de monitorar pequenas deformações com alta precisão. Esses são alguns requisitos a serem trabalhados no uso de sensores FBG, portanto, a forma de melhorar a sensibilidade do sensor à deformação externa tornou-se uma realidade. Os métodos de encapsulamento não apenas protegem a fibra óptica, mas também aumentam a sensibilidade na transferência de deformação da estrutura para o sensor (JUN *et al*, 2014).

Dependendo dos diferentes arranjos utilizados a eficiência na transferência de deformação é significativamente diferente. Portanto, é crucial obter a relação entre a tensão medida e a tensão verdadeira na condição de monitoramento do sensor FBG. Ao longo das últimas décadas o mecanismo de transferência de deformação do sensor FBG embebido foi pesquisado minuciosamente, de acordo com os arranjos convenientes para cada aplicação (SHEN *et al*, 2017).

Existem dois tipos populares de sensores encapsulados disponíveis: FBGS cilíndricos embutidos e FBGS de substrato. A transferência de deformação dos FBGS cilíndricos embutidos tem sido estudada por muitos pesquisadores (WU *et al*, 2014; DONGSHENG; ZHI, 2005; ZHI *et al*, 2006). Supôs-se que existe uma deformação idêntica no núcleo da fibra e na estrutura em que o sensor é aderido (ANSARI; LIBO, 1998), no entanto, existem deformações diferentes entre o núcleo da fibra e a estrutura (CHENG *et al*, 2010). Isso ocorre porque as camadas adesivas e de revestimento podem consumir energia. Porém, ainda são limitadas as pesquisas sobre a transferência de deformação para os sensores FBG de substrato. Um dos principais motivos para isso é a assimetria do sensor, o que aumenta a dificuldade de análise (ZHANG, 2015).

2.2.6 Sistemas de interrogação de redes de Bragg

Um sistema de interrogação óptico é o responsável por retirar as informações de comprimento de onda de Bragg, refletividade e deslocamento do pico refletido do sensor FBG. Seu princípio básico de funcionamento baseia-se na emissão da luz por uma das extremidades da fibra óptica e uso de detectores para detectar a luz que é retro espalhada à medida que interage com a rede de Bragg. A medição precisa do deslocamento do comprimento de onda refletido pela rede é crucial para que seja obtido um bom desempenho do sensor FBG (CORREIA, 2010).

O mercado atual disponibiliza de diversos equipamentos de interrogação óptica que cumprem as funções de emitir a luz e receptor o sinal dos sensores de rede de Bragg. Diversos fabricantes oferecem estes equipamentos como a FiberSensing, a HBM, a Micron Optics e a National Instruments (SOUSA *et al*, 2012). A Figura 12 apresenta alguns modelos de interrogadores ópticos disponíveis no mercado.

Figura 12 – Sistemas de interrogação ópticos comerciais.



Fonte: (Acervo MRA; Acervo HBM).

Quando a fibra óptica possuir mais de uma rede de Bragg inscrita o interrogador deverá ser capaz de discriminar a qual FBGS corresponde o sinal refletido. Existem duas principais formas de discriminar qual rede de Bragg está sendo interrogada na fibra. Os interrogadores comerciais para monitoramento de uma cadeia de sensores de rede de Bragg se dividem em duas categorias de demodulação de sinal principais: multiplexação por divisão de tempo (TDM) e multiplexação por divisão de onda (WDM) (ANSARI, 2005).

No método de interrogação baseado em TDM as redes de Bragg com um mesmo comprimento de onda central são impressas em uma única fibra com um espaçamento entre si. O monitoramento é realizado aplicando um pulso óptico na fibra contendo as FBGS e observando os pulsos de retorno. Para ser viável, nesse tipo de monitoramento, faz-se necessário que as FBGS utilizadas apresentem uma baixa flexibilidade, garantindo que o sinal de entrada passe por todas as redes. Além disso, o primeiro nó sensor precisa estar a alguns metros do sistema de medida, na ordem de unidade de metros, dependendo do equipamento de leitura (BARROS, 2016).

Entre as diferentes técnicas de interrogação de sensores FBG, a tecnologia de multiplexação por divisão de onda é uma das mais utilizada. Os sistemas WDM discriminam sensores individuais por comprimento de onda, sendo que o número máximo de sensores interrogados é limitado pela largura da fonte de luz de banda larga (ou comprimento de onda) e pelos intervalos de operação de comprimento de onda Bragg, distintos por alguns nanômetros. Cada sensor é monitorado simultaneamente à medida que o seu comprimento de onda central muda devido a mudanças ambientais externas, como tensão, temperatura ou pressão (DAI *et al*, 2009).

Interrogadores ópticos operam comumente em um comprimento de onda de 1550 nm com uma faixa de operação de até 100 nm. Para monitoramentos dinâmicos de sensores FBG comumente existe uma variação de 5 nm por sensor, o que determina que em um sistema WDM a limitação é próxima de 20 sensores por fibra, enquanto no sistema TDM podem ser inscritos até 100 sensores na mesma fibra óptica, dependendo da potência da luz emitida e da refletividade de cada sensor (SCHMID *et al*, 2015).

2.2.7 Aplicação de sensores FBG

Um dos maiores potenciais para o uso de sensores FBG é o monitoramento de deformação dinâmica e estática. O limite de deformação dos sensores FBG é próximo de 10.000 $\mu\text{m/m}$ (KREUZER, 2006). O monitoramento de deformação dinâmica utilizando sensores FBG pode

ser aplicado para detecção de sinais sísmicos de estruturas subterrâneas, rochas ou pontes (LIU *et al*, 2002). Devido ao fato de terem tamanho reduzido e baixo peso este tipo de sensor pode ser facilmente instalado em estruturas de concreto, possibilitando monitorar com precisão a solicitação de cargas e variação de temperatura na estrutura (MOYO *et al*, 2005).

Os sensores FBG também podem ser aplicados para monitorar o desenvolvimento de danos estruturais em materiais compósitos (SHIN *et al*, 2014). Esta facilidade de ser embebido em materiais compósitos possibilita sua aplicação em lâminas de turbinas eólicas, vasos de pressão e outras estruturas deste tipo (ZHAO, 2010).

Sensores FBG de temperatura são aplicados especialmente em ambientes hostis. O uso de fibra especiais na gravação de sensores FBG possibilita sua aplicação no monitoramento de temperaturas elevadas de até 900 °C por longos períodos de tempo (ELSMANN *et al*, 2014). Foi demonstrada também a possibilidade do uso de sensores FBG para monitorar estruturas que operam em ambientes com temperatura criogênica (-150 °C até 0 °C) (GUO *et al*, 2012).

Inúmeras outras aplicações são mencionadas na literatura, os sensores FBG vêm ocupando um espaço cada vez maior no mercado de monitoramento. O avanço nas tecnologias tem permitido a utilização dos sensores de fibra óptica em diversos tipos de aplicações.

2.2.8 Aplicação de FBGS na indústria do petróleo e gás no Brasil

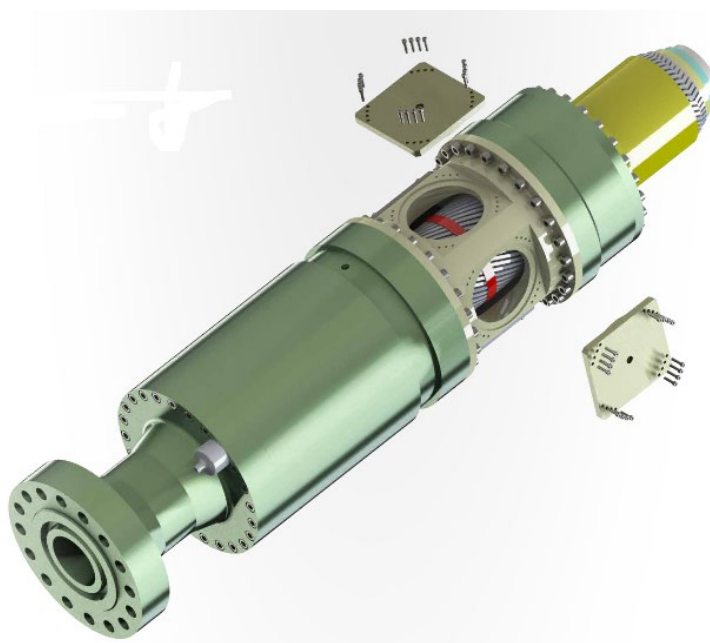
Em uma parceria entre a Petrobras e a PUC-RJ foi desenvolvido o MODA (Monitoramento Óptico Direto no Arame) para o monitoramento de dutos flexíveis. Esse sistema consiste em sensores FBG instalados nos arames que compõe a armadura de tração externa do duto flexível, com o objetivo de acompanhar, através do monitoramento das deformações, a integridade dos arames e detectar possíveis rupturas nos mesmos (MORIKAWA *et al*, 2010). Em outra aplicação de FBGS em arames da armadura de tração de dutos flexíveis, Jacques *et al* (2010) combinam uma série de técnicas de ensaios não destrutivos no monitoramento de um *riser* flexível durante carregamentos dinâmicos. Através de comparações com resultados de emissão acústica e valores de deslocamento registrados pelo atuador mecânico os autores conseguiram detectar as rupturas de arame induzidas no ensaio, além de utilizar os resultados dos sensores FBG para obter informações sobre a redistribuição de carregamentos da estrutura após a ocorrências das rupturas de arames.

Simões (2011) menciona em seu estudo técnicas indiretas de monitoramento de dutos flexíveis através da instalação de sensores ópticos sobre a capa polimérica dos dutos. Os

sensores instalados por cima da capa polimérica registram alterações nas deformações da capa que podem ser decorrentes da ruptura de um ou mais arames das armaduras de tração. O estudo avalia a utilização de um Colar Óptico, de um “*band-aid*” óptico e do Colar 3D, que consiste na união das duas técnicas anteriores.

Outro trabalho que é importante ressaltar aqui é a patente da Petrobras, número BRPI 1100228A2, de autoria de Campello e Morikawa e publicada em 14 maio de 2013 e trata de uma escotilha para monitoramento e inspeção de dutos flexíveis. Esta escotilha, comumente chamada de “olho mágico”, permite o acesso aos arames da armadura de tração no conector, possibilitando a instalação de sensores para inspeção e monitoramento desses arames (CAMPELLO; MORIKAWA, 2013). Na Figura 13 é possível ver o exemplo de um conector olho mágico.

Figura 13 – Conector olho mágico.

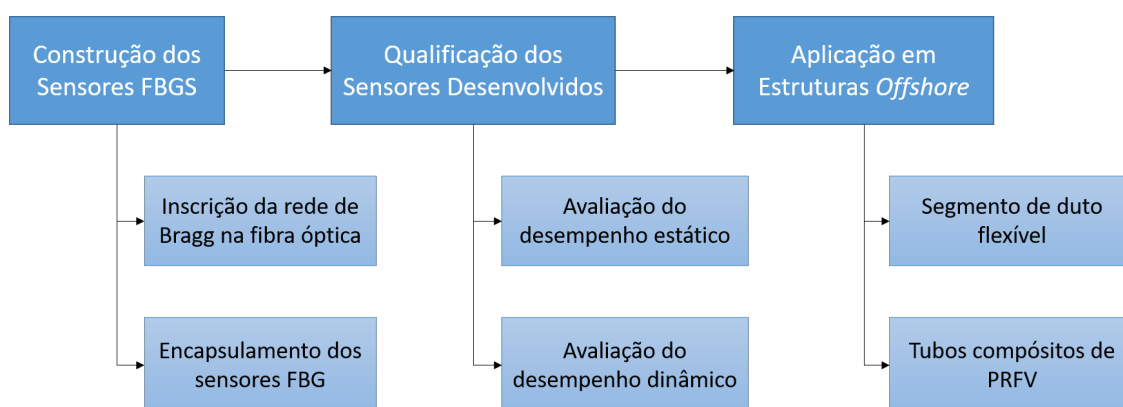


Fonte: Adaptado (PETROBRAS, 2014).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em três grupos de atividades principais, sendo essas a construção dos sensores, a qualificação dos sensores FBGS desenvolvidos e a aplicação prática dos sensores em estruturas *offshore*. Em paralelo a essas atividades, foi realizado o desenvolvimento de um *software* próprio de monitoramento. A parte de construção, qualificação e aplicação dos sensores foi desenvolvida de acordo com as etapas demonstradas na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de etapas de desenvolvimento e aplicação dos sensores FBG.

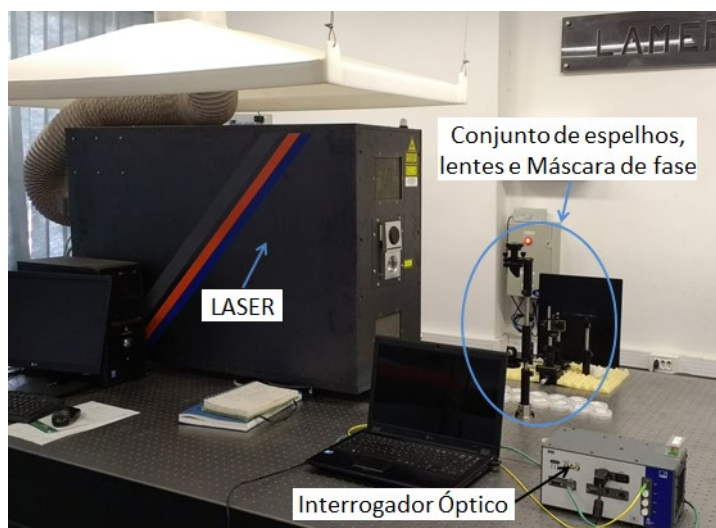


Fonte: (O AUTOR).

3.1 INSCRIÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

A gravação das redes de Bragg no núcleo da fibra óptica é a principal etapa na construção de sensores de fibra óptica do tipo rede de Bragg. O LAMEF possui em suas instalações infraestrutura completa para a fabricação desses sensores a partir do método de máscaras de fase. O sistema de gravação é composto basicamente por um laser, responsável pela alteração do índice de refração do núcleo da fibra óptica, e pela máscara de fase, que modula espacialmente o feixe do laser incidente na fibra óptica. A Figura 15 apresenta a estrutura montada no LAMEF para a realização da gravação das redes de Bragg.

Figura 15 – Infraestrutura do LAMEF para construção de sensores FBG.



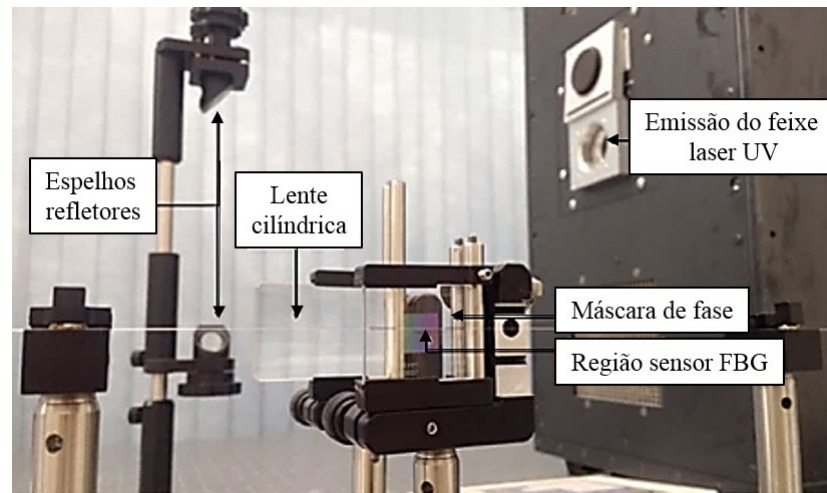
Fonte: (O AUTOR).

O laser utilizado na fabricação dos sensores é o modelo Braggstar M da fabricante Coherent. O laser opera através de pulsos de energia que emitem radiação ultravioleta com comprimento de onda de 248 nm, sendo sua frequência de operação variável até 100 Hz. Todos os elementos empregados para a gravação das redes de Bragg são montados sobre uma mesa anti-vibração.

Para a fabricação dos sensores FBGS foi utilizado um modelo de fibra óptica do tipo monomodo que possui núcleo com teor de germânio cinco vezes superior ao de fibras comuns de telecomunicação, aumentando sua fotossensibilidade, além disto, possui uma abertura numérica elevada, o que lhe concede maior resistência à perda de sinal induzida pelo raio de curvatura da fibra.

O feixe de laser UV incide nos espelhos refletores, que direcionam este feixe até uma lente cilíndrica, responsável por colimar o feixe, aumentando sua energia, para então incidir na máscara de fase, onde o feixe é difratado e a interação dos feixes difratados gera o padrão de queima em um campo próximo, logo após a máscara, onde é posicionada a fibra óptica. Na Figura 16, é possível observar o posicionamento da fibra óptica e das lentes e espelhos utilizados na gravação. Para a gravação da rede de Bragg é necessário expor o núcleo da fibra à radiação do laser, portanto, é realizada a remoção da camada polimérica de proteção da fibra em uma região de aproximadamente 10 mm de comprimento, essa remoção do acrilato é realizada com um alicate.

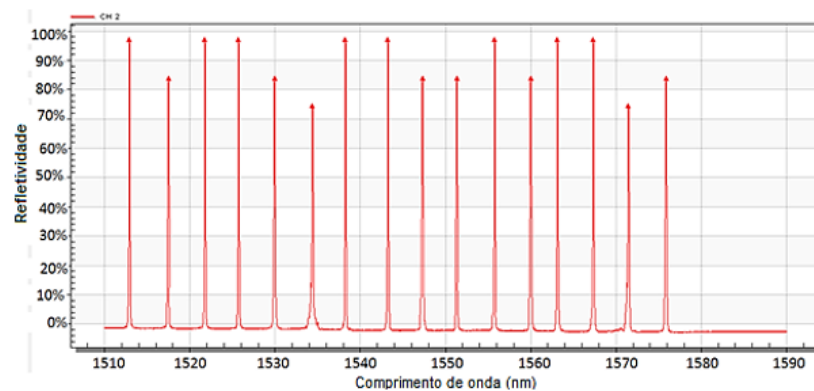
Figura 16 – Fabricação dos sensores FBG com uso de máscara de fase.



Fonte: (O AUTOR).

Cada máscara de fase possui parâmetros de gravação individuais que irão gerar uma rede de Bragg com um comprimento de onda de Bragg específico. O LAMEF possui 16 máscaras de fase com períodos diferentes, que variam de 1036 nm até 1080 nm, possibilitando, portanto, a construção de cadeias de sensores com até 16 sensores. Na Figura 17, é possível observar o espectro óptico de uma cadeia de sensores composta por 16 sensores, cada pico apresentado corresponde ao comprimento de onda que satisfaz a lei Bragg e é refletido pela rede gravada na fibra óptica.

Figura 17 – Espectro óptico de uma cadeia com 16 sensores.



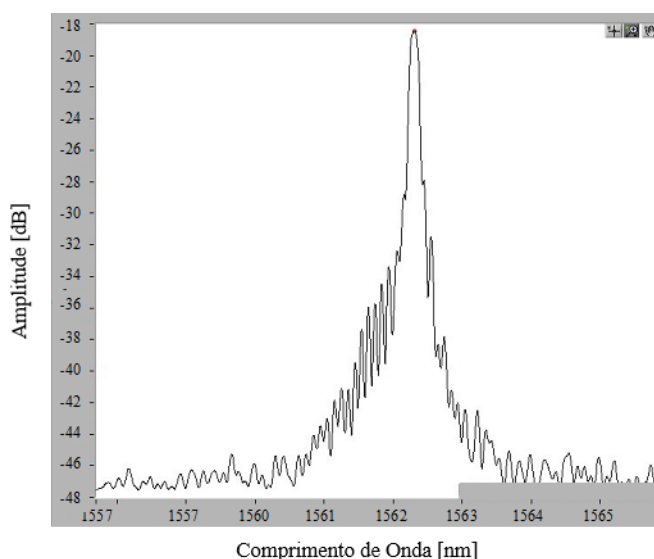
Fonte: (O AUTOR).

Para acompanhamento das características do sinal refletido pela rede de Bragg o espectro é monitorado durante todo o período de gravação. Esse monitoramento é realizado com o auxílio

de um interrogador óptico modelo DI-410 da empresa HBM, o qual é conectado ao PC através de uma interface Ethernet. O *software* de aquisição de dados utilizado foi o Catman Easy®.

A Figura 18 apresenta uma imagem mais detalhada da resposta de uma rede de Bragg após a gravação com o laser.

Figura 18 – Espectro óptico de uma rede de Bragg.



Fonte: (O AUTOR).

3.2 CONFIGURAÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO E ENCAPSULAMENTO DOS SENSORES FBG

A maneira como o sensor é instalado na superfície de medição interfere significativamente no valor de deformação medido e no nível de deformação máxima que o sensor é capaz de alcançar com exatidão. A proteção e encapsulamento da fibra óptica foi proposto como solução para dar robustez ao sensor, diminuindo a fragilidade do mesmo, e para melhorar a exatidão das medições em taxas de medições relativamente elevadas, através de uma melhora na transferência da deformação na superfície da amostra para o sensor FBG.

Neste trabalho, além da colagem da fibra óptica diretamente na superfície da amostra, sete diferentes configurações de proteção e encapsulamento foram propostas. Foi avaliada também a utilização de um substrato de poliimida entre a amostra e o sensor. Foram variados o tipo de resina utilizada e a região de colagem do sensor no substrato. Outro fator avaliado foi quanto à realização de um encapsulamento prévio do sensor de rede de Bragg.

As diferentes condições de montagem dos sensores avaliadas neste estudo estão sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Configurações de montagem dos sensores FBG.

	Substrato	Adesivo	Proteção da fibra óptica	Região de colagem do sensor*	Tipo de Instrumentação
Condição 1	-	Cianocrilato	-	2	Direto na amostra
Condição 2	-	Resina epóxi	Resina Epóxi	3	Direto na amostra
Condição 3	Poliimida	Cianocrilato	Silicone	1	Na amostra com substrato
Condição 4	Poliimida	Cianocrilato	Silicone	2	Na amostra com substrato
Condição 5	Poliimida	Cianocrilato	Resina Epóxi	1	Na amostra com substrato
Condição 6	Poliimida	Cianocrilato	Resina Epóxi	2	Na amostra com substrato
Condição 7	Poliimida	Cianocrilato	Resina Epóxi	1	Encapsulamento prévio
Condição 8	Poliimida	Cianocrilato	Resina Epóxi	2	Encapsulamento prévio

* 1 – colagem das regiões adjacentes à rede de Bragg, mantendo a região da rede de Bragg sem cola.

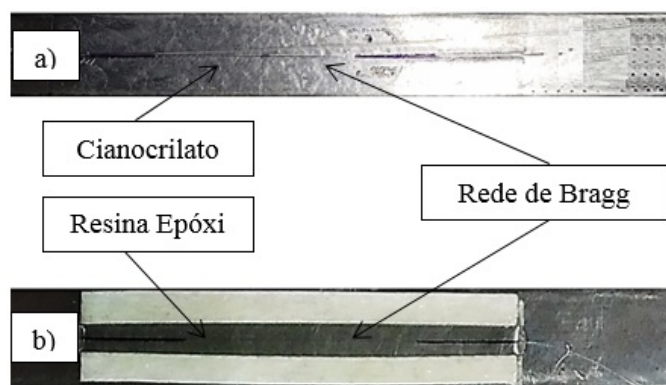
2 – colagem de toda a região, incluindo a rede de Bragg.

3 – colagem da fibra óptica com resina epóxi.

Fonte: (O AUTOR).

A aplicação direta da rede de Bragg na superfície de medição com adesivo do tipo cianocrilato foi denominada como Condição 1 e é apresentada na Figura 19.a. Foi testada também a aplicação direta da rede de Bragg na amostra utilizando-se uma resina epóxi comercial comum (Araldite® Profissional) para fazer a adesão do sensor, essa configuração foi denominada como Condição 2 e é mostrada na Figura 19.b.

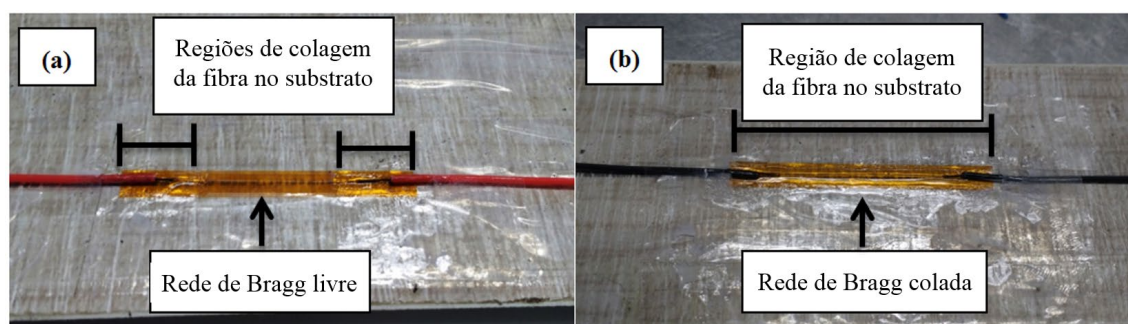
Figura 19 – Aplicação dos FBGS diretamente na amostra com a) cola do tipo cianocrilato e b) resina epóxi.



Fonte: (O AUTOR).

Nas Condições 3 a 6 foi realizada a aplicação de um substrato intermediário de poliimida entre a superfície de medição e o sensor. Um dos parâmetros analisados diz respeito à forma de fixação da fibra óptica no substrato de poliimida. Foram avaliadas a influência de realizar a fixação apenas nas regiões adjacentes à rede de Bragg, de modo a manter a região de inscrição da rede não aderida ao substrato e a influência de realizar a fixação de toda a extensão da fibra, incluindo a região da rede de Bragg. As diferentes configurações de colagem do sensor FBG no substrato de poliimida são mostradas na Figura 20.

Figura 20 – Colagem da fibra no substrato (a) apenas nas extremidades e rede de Bragg livre e (b) em toda a extensão do substrato, incluindo a rede de Bragg.



Fonte: (O AUTOR).

Nas Condições 3 e 4 a proteção da fibra óptica foi realizada com silicone, enquanto que nas Condições 5 e 6 essa proteção foi feita com resina epóxi. Considerando o parâmetro configuração de colagem da fibra óptica no substrato de poliimida, as Condições 3 e 5 tiveram a colagem apenas nas regiões adjacentes à rede de Bragg, mantendo a rede de Bragg livre, enquanto as Condições 4 e 6 tiveram a colagem de toda a região do sensor, incluindo a rede de Bragg.

Para as Condições 7 e 8 foi realizado um encapsulamento de forma prévia, logo após a inscrição da rede de Bragg na fibra óptica, sendo o sensor levado para a instrumentação já encapsulado. A Figura 21 mostra um exemplo de sensor FBG encapsulado. Para os sensores encapsulados também foi avaliada a influência da colagem da fibra no substrato de poliimida, sendo que a Condição 7 apresenta a rede de Bragg livre no substrato e a Condição 8 tem a rede de Bragg aderida ao substrato.

Figura 21 – Sensor FBG encapsulado.



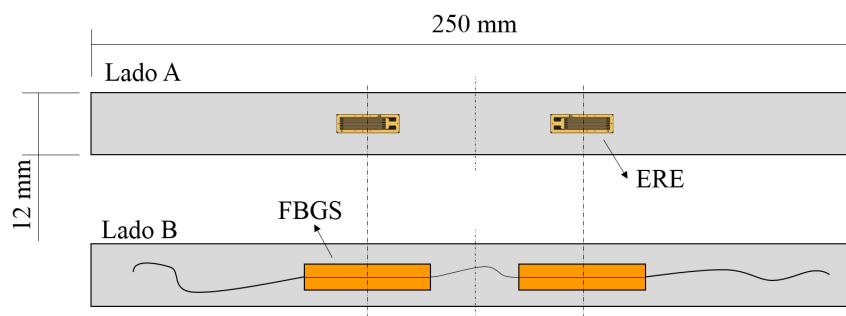
Fonte: (O AUTOR).

3.3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTÁTICO

Os sensores desenvolvidos foram submetidos a carregamento de tração para qualificação quanto à confiabilidade das medições e o nível de deformação que o sensor é capaz de medir com exatidão. Este teste foi realizado para avaliar o comportamento estático dos sensores para cada configuração de montagem. Tal avaliação foi realizada a partir da comparação dos resultados dos sensores ópticos com resultados obtidos com extensômetros de resistência elétrica (ERE).

Os testes foram realizados em oito segmentos de arames da armadura de tração de duto flexível, com dimensões de 3 x 12 x 250 mm. Cada arame foi instrumentado em uma das faces com dois ERE de 120 Ω . O comprimento ativo de medição do ERE foi escolhido de forma a aproximar-se o máximo possível do comprimento ativo de medição do FBGS utilizado, que é de 10 mm. Desta forma, foi utilizado o maior comprimento de grade disponível, que era o ERE de 5 mm de grade. Na face oposta do arame foi feita a instrumentação com FBGS, sendo colocados dois sensores em cada arame. Para cada amostra foi utilizada uma configuração diferente de sensor FBG, conforme descrito na Tabela 1. Na Figura 22 é mostrado um desenho esquemático da instrumentação de uma amostra com os sensores ópticos e elétricos.

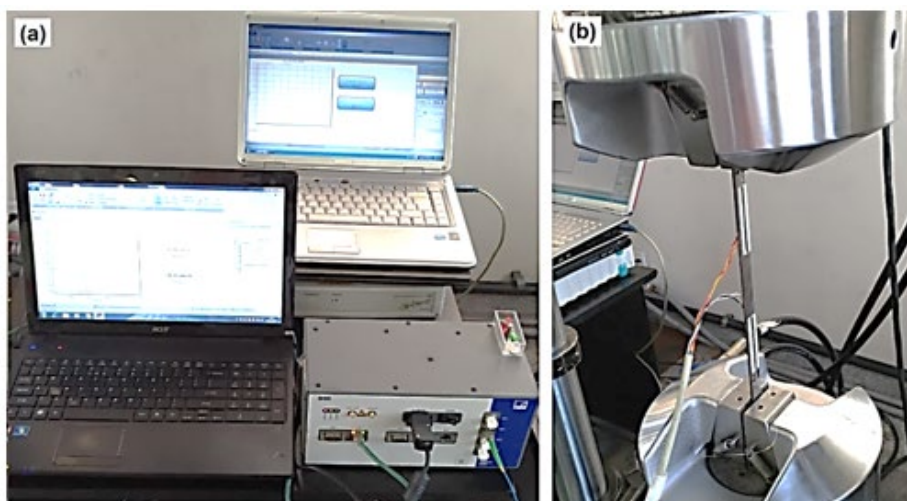
Figura 22 – Desenho esquemático da instrumentação dos arames para realização da avaliação estática.



Fonte: (O AUTOR).

As amostras foram ensaiadas em uma máquina de tração da marca MTS, modelo Landmark, com capacidade de carga de 120 kN e capacidade de deslocamento de 160 mm. Os testes foram conduzidos com velocidade controlada de 1 mm/min, enquanto foram monitoradas as deformações tanto nos sensores elétricos quanto nos sensores de fibra óptica, além do monitoramento da força aplicada nos arames. Para o monitoramento das deformações nos sensores ópticos foi utilizado um interrogador óptico modelo DI-410 da empresa HBM e o *software* Catman Easy[®]. Para o monitoramento dos sensores elétricos foi utilizado o equipamento Spider 8 e como *software* também o Catman Easy[®]. Na Figura 23.a é possível observar os equipamentos de aquisição utilizados durante os ensaios de caracterização estática dos sensores, já na Figura 23.b é mostrada uma amostra posicionada na máquina de tração para a execução do teste.

Figura 23 – a) Sistemas de aquisição utilizados e b) amostra posicionada na máquina de tração.



Fonte: (O AUTOR).

3.4 METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO

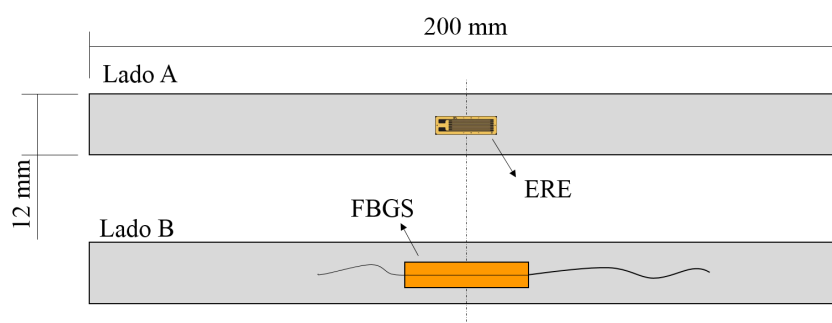
Outra forma de avaliação dos sensores produzidos foi quanto à sua vida em fadiga. Os sensores foram submetidos a carregamentos cíclicos de flexão em 4 pontos, com objetivo de verificar a confiabilidade das medições e a resistência dos sensores quando aplicado sobre eles carregamentos de longa duração. As configurações de sensores que não apresentaram resultados satisfatórios na avaliação de desempenho estático foram descartadas.

Foram instrumentadas quatro amostras de segmento de arames de 3 x 12 x 200 mm. Em uma das faces do arame foi feita a instrumentação com os sensores ópticos, sendo utilizadas as configurações 5, 6, 7 e 8 da Tabela 1. Estas configurações de instrumentação foram escolhidas

por terem apresentado os melhores resultados nos ensaios de avaliação de desempenho estático. A instrumentação dos sensores foi realizada exatamente no centro do arame. Na outra face do arame, também no centro, foi feita a instrumentação com os sensores elétricos, sendo utilizados extensômetros de resistência elétrica de 120Ω e 5 mm de comprimento de grade de medição.

Na Figura 24 é apresentado o desenho esquemático com a instrumentação utilizada na instrumentação das amostras para os ensaios de desempenho dinâmico.

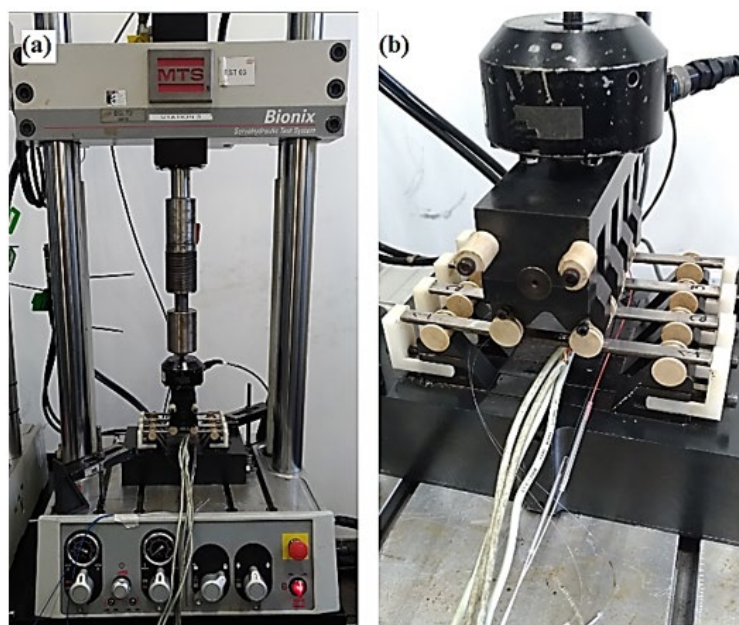
Figura 24 – Desenho esquemático da instrumentação dos arames para realização da avaliação dinâmica.



Fonte: (O AUTOR).

As quatro amostras preparadas foram posicionadas em uma máquina servo-hidráulica modelo MTS Bionix, com capacidade de carga de 25 kN, utilizando-se um dispositivo de flexão em 4 pontos. Na Figura 25 é possível observar a máquina utilizada no teste, bem como as amostras posicionadas no dispositivo de fixação.

Figura 25 – a) Máquina servo-hidráulica e b) amostras posicionadas no dispositivo de flexão em 4 pontos.



Fonte: (O AUTOR).

As amostras foram posicionadas de forma a garantir que os sensores ópticos ficariam submetidos a esforços de tração, enquanto que os sensores elétricos estariam submetidos a esforços de compressão. O carregamento utilizado foi do tipo tração-tração e a magnitude do carregamento foi escolhida levando-se em conta a máxima variação de deformação observada em um ensaio anterior de um duto flexível submetido a ensaio de fadiga em escala real. Através da avaliação deste ensaio anterior, verificou-se que durante o ciclo máximo de carregamento da amostra, as deformações nos arames ficaram em média entre 200 e 2.000 $\mu\text{m}/\text{m}$, gerando uma amplitude de deformação de 1.800 $\mu\text{m}/\text{m}$. Desta forma, para alcançar níveis de deformações próximos aos do ensaio analisado, foram utilizados ciclos de carregamentos de 200 a 2.000 N. Inicialmente foi utilizado uma frequência de 3 Hz, sendo alterada para 10 Hz após 200.000 ciclos.

Após 1 milhão de ciclos, o carregamento do ensaio foi aumentado para 200 a 2.500 N e foram realizados mais 5,5 milhões de ciclos com uma frequência de 10 Hz, totalizando 6,5 milhões de ciclos de ensaio.

Para o monitoramento das deformações nos sensores ópticos, foi utilizado um interrogador óptico modelo DI-410 da empresa HBM e um *software* desenvolvido no próprio laboratório. Para o monitoramento dos sensores elétricos, foi utilizado o equipamento Spider 8 e como *software* o Catman Easy®.

3.5 APLICAÇÃO DOS SENSORES EM ESTRUTURAS *OFFSHORE*

Após o desenvolvimento e qualificação dos sensores FBGS, foi realizada a aplicação destes sensores em algumas estruturas *offshore* com as quais o laboratório já desenvolve análises e pesquisas. As estruturas escolhidas para este trabalho foram um segmento de duto flexível submetido a ensaio de fadiga em escala real, uma amostra de tubo compósito de polímero reforçado com fibra de vidro com sensores ópticos embebidos na estrutura durante a fabricação, submetido a um ensaio hidrostático e duas amostras de tubos compósitos de PRFV submetidas a ensaio de explosão.

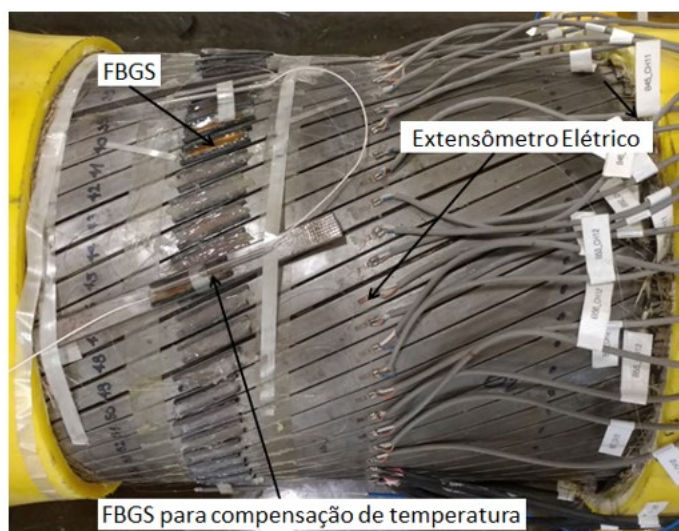
3.5.1 Instrumentação da amadura de tração de um duto flexível submetido a ensaio de fadiga em escala real

O sistema de monitoramento foi aplicado a uma amostra de duto flexível submetida a ensaio de fadiga em escala real. Os dutos flexíveis são tubulações compostas por múltiplas camadas

metálicas e poliméricas intercaladas e sobrepostas que tem como função o transporte de água, óleo, gás e seus derivados durante a exploração e produção de petróleo em alto mar (BORGES, 2017). Mais informações sobre dutos flexíveis podem ser encontradas em Fergestad e Lotveit (2014) e em Bay e Bai (2005). Cada um dos 58 arames que compõem a armadura externa do duto utilizado foi instrumentado com um sensor do tipo rede de Bragg. A condição de montagem selecionada para a instrumentação foi a Condição 5, que foi a configuração que apresentou melhor desempenho nos testes de qualificação dos sensores realizados neste trabalho.

A fim de permitir acesso aos arames da armadura de tração externa, uma janela de 300 mm foi aberta na capa externa do duto flexível. Em cada arame foi colocado um extensômetro de resistência elétrica de 120 Ω de resistência e comprimento ativo de 3 mm. Os ERE foram instrumentados exatamente no centro da janela aberta na capa do duto, a uma distância de 150 mm das extremidades da janela, enquanto os FBGS foram instrumentados a uma distância de 75 mm de uma das extremidades da janela. Todos os sensores foram instalados no sentido longitudinal dos arames. Para a instrumentação foram utilizados 59 sensores ópticos, 1 sensor para cada arame e um sensor extra para compensação de temperatura. Esses sensores foram distribuídos em 4 cadeias de sensores. Extensômetros de resistência elétrica também foram instalados em todos os arames da armadura externa permitindo também o monitoramento das deformações com essa técnica de medição. Na Figura 26 é apresentada uma visão geral dos sensores instalados no duto flexível.

Figura 26 – Instrumentação de um duto flexível com sensores FBG.



Fonte: (O AUTOR).

O segmento de duto flexível foi montado em uma bancada de ensaios conforme mostrado na Figura 27. A amostra foi submetida a ciclos de pressão e carregamento de acordo com procedimentos de ensaio pré-definidos.

Figura 27 – Segmento de duto flexível posicionado na bancada de ensaio.



Fonte: (O AUTOR).

É importante ressaltar que a instrumentação com os ERE foi realizada em um momento prévio ao início do ensaio, enquanto que a instrumentação com os sensores FBGS foi realizada em uma etapa posterior, já com o ensaio em andamento. Por esta razão, o instante de definição do valor zero dos extensômetros de resistência elétrica não é coincidente com o momento da definição do valor zero dos sensores FBG. Desta forma, as magnitudes de deformação medidas com as duas técnicas são diferentes. No entanto, durante o carregamento cíclico, a variação da amplitude de carregamento deve ser a mesma para qualquer ponto ao longo de um mesmo arame e, conseqüentemente, as amplitudes de deformação também devem ser as mesmas. Portanto, para a comparação dos resultados obtidos com FBGS e com ERE, são consideradas apenas as amplitudes medidas por cada técnica. Além disso, por se tratar de dados confidenciais de ensaio, os resultados são apresentados de forma adimensionais.

3.5.2 Instrumentação de uma amostra de material compósito com sensores de fibra óptica embebidos na estrutura

Para a instrumentação da amostra PRFV foram testadas duas configurações de sensores: com encapsulamento e sem encapsulamento. Para a condição sem encapsulamento, a instrumentação foi realizada diretamente com a fibra óptica durante o processo de fabricação

do tubo. Já os sensores encapsulados foram produzidos com um substrato intermediário de poliimida entre a superfície de medição e o sensor e recoberto com resina epóxi.

O tubo, produzido pelo processo de *filament winding*, foi projetado para ter diâmetro interno de 6". As principais características dos materiais utilizados para a construção do tubo compósito são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais características dos materiais utilizados para produção da amostra de vaso de pressão.

Item	Característica
Resina	Éster Vinílica (EV)
Roving de enleamento	740
Catalisador	Peróxido de metiletilcetona
Nº de camadas	12
Ângulo de enrolamento	55°
Liner	1 véu sintético 25 gr/m ²
	2 mantas 300 gr/m ²
Temperatura de cura	Ambiente

Fonte: (O AUTOR).

Os sensores FBG foram inseridos no centro do comprimento do tubo e logo após o *liner*, seguindo a direção do ângulo de enrolamento, sendo a retirada do cabo de fibra óptica realizada pela direção radial do tubo. Os sensores foram instalados de modo a permitir o monitoramento de deformação nas direções de enrolamento, +55° e -55°.

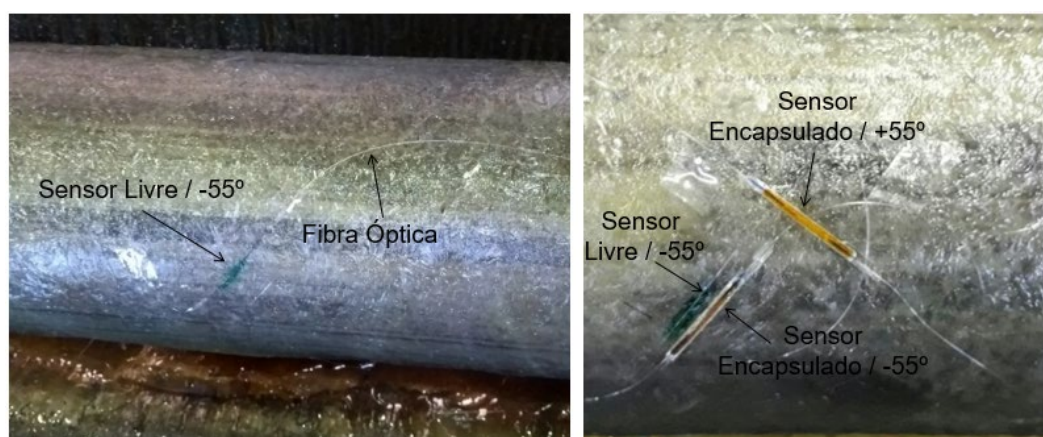
Ao todo, quatro cadeias, compostas por quatro sensores cada uma, foram instaladas na amostra em quatro diferentes posições ao longo da circunferência, como apresentado na Tabela 3. Na Figura 28 pode ser vista a instrumentação da amostra com os sensores instalados sobre o *liner*.

Tabela 3 – Configuração dos sensores FBGS instalados no tubo compósito.

Cadeia de Sensores	Nº do Sensor	Montagem do Sensor	Posição Circunferencial	Direção
1	1	Livre	0°	+55°
	2	Livre	90°	+55°
	3	Livre	180°	+55°
	4	Livre	270°	+55°
2	5	Livre	0°	-55°
	6	Livre	90°	-55°
	7	Livre	180°	-55°
	8	Livre	270°	-55°
3	9	Encapsulado	0°	+55°
	10	Encapsulado	90°	+55°
	11	Encapsulado	180°	+55°
	12	Encapsulado	270°	+55°
4	13	Encapsulado	0°	-55°
	14	Encapsulado	90°	-55°
	15	Encapsulado	180°	-55°
	16	Encapsulado	270°	-55°

Fonte: (O AUTOR).

Figura 28 – Detalhe da instrumentação do vaso de pressão com sensores FBGS.



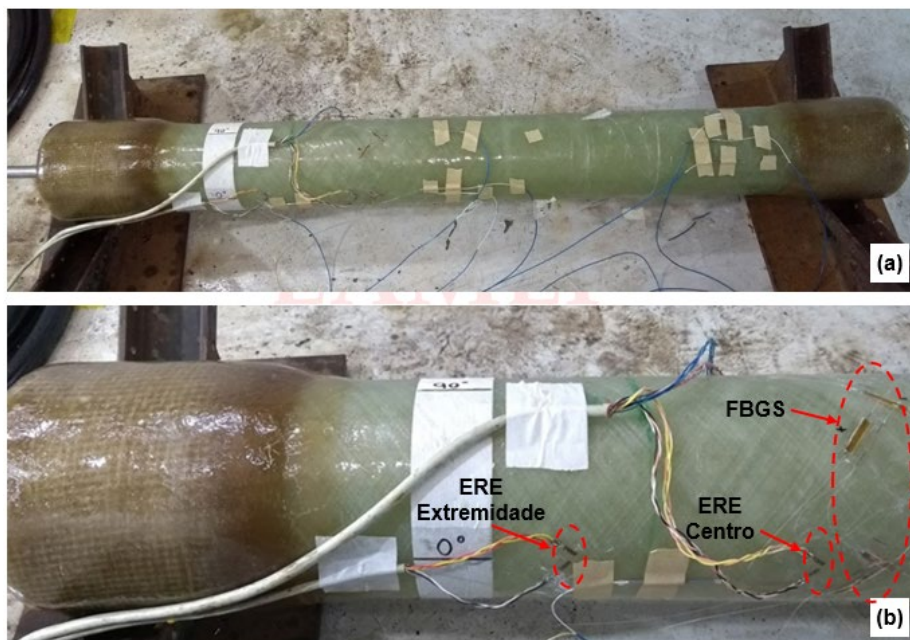
Fonte: (O AUTOR).

A fim de permitir a retirada das fibras ópticas pela direção radial do tubo, o processo automatizado de enrolamento das fibras era interrompido quando o carrinho se aproximava da região onde os sensores foram instalados. Durante a passagem por esta região, o avanço era controlado manualmente a fim de permitir a passagem das fibras de uma camada para a outra.

Na sequência, foi realizado o processo de cura da resina e por último, o fechamento da amostra com tampões de aço resinados nas extremidades.

A instrumentação da amostra foi complementada com a instalação de sensores FBGS na parede externa do tubo na mesma posição dos sensores embebidos na resina. A fim de permitir um comparativo entre diferentes técnicas de medição de deformação, sensores do tipo extensômetro de resistência elétrica também foram instalados no centro da amostra nas posições circunferenciais 0° e 180° . Para verificar a possível variação de deformação ao longo do comprimento da amostra, dois ERE's foram instalados em uma cota mais afastada do centro da amostra, próxima a uma das extremidades do tubo. Os extensômetros utilizados para esta instrumentação foram *strain gages* de 120Ω e 5 mm de grade de medição. Na Figura 29, é apresentada a amostra com a instrumentação final, já com sensores do tipo rede de Bragg e extensômetros de resistência elétrica instalados na parede externa.

Figura 29 – Instrumentação final da amostra com a) visão geral da amostra e b) detalhe do posicionamento dos sensores instalados na parede externa.



Fonte: (O AUTOR).

Para os testes, a amostra foi colocada em um *bunker* e conectada a um sistema hidráulico para aplicação de pressão interna. Na Figura 30, é possível ver a amostra posicionada no *bunker* com a bomba e o cilindro hidráulicos utilizados para aplicação da pressão. Na Figura 31, são apresentados os sistemas de aquisição para os sensores FBGS e ERE, bem como o sistema de monitoramento de vídeo, composto por 4 câmeras com as quais foram monitoradas as imagens

da amostra durante os ensaios. Os carregamentos foram controlados através de controladores servo hidráulicos.

Figura 30 – Amostra posicionada no *bunker*, bomba e cilindro hidráulicos utilizados para execução dos testes.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 31 – Sistemas de monitoramento do ensaio.



Fonte: (O AUTOR).

3.5.3 Instrumentação de amostras de tubo de PRFV para ensaio de explosão

As amostras de tubo compósito de polímero reforçado com fibra de vidro utilizadas nesta etapa do trabalho foram produzidas utilizando o mesmo processo da amostra mencionada anteriormente, porém, sem a realização do fechamento das extremidades com tampões de aço resinados. Esse fechamento foi realizado de forma posterior, com dispositivos projetados para garantir a vedação dos tubos.

Foram utilizadas duas amostras com 1.195 mm de comprimento e diâmetro interno de 150 mm. Na Figura 32, é mostrada uma das amostras já fechada com os dispositivos de vedação.

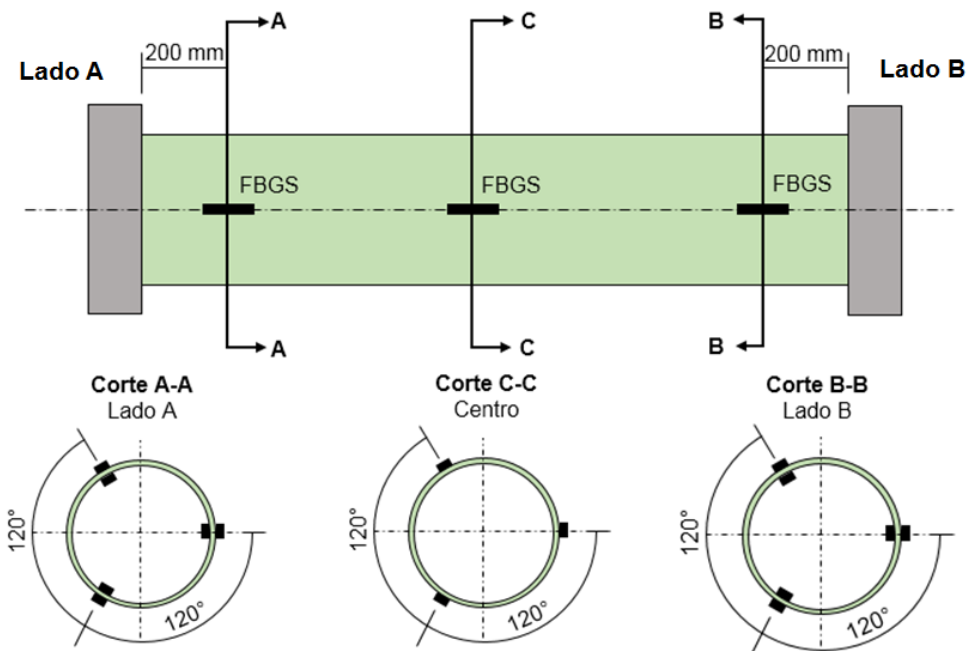
Figura 32 – Amostra de tubo compósito com dispositivos de vedação.



Fonte: (O AUTOR).

A amostra denominada como LD_BST_01 foi instrumentada com sensores FBGS conforme ilustrado no desenho esquemático da Figura 33.

Figura 33 – Representação esquemática da instrumentação com sensores FBGS da amostra LD_BST_01.

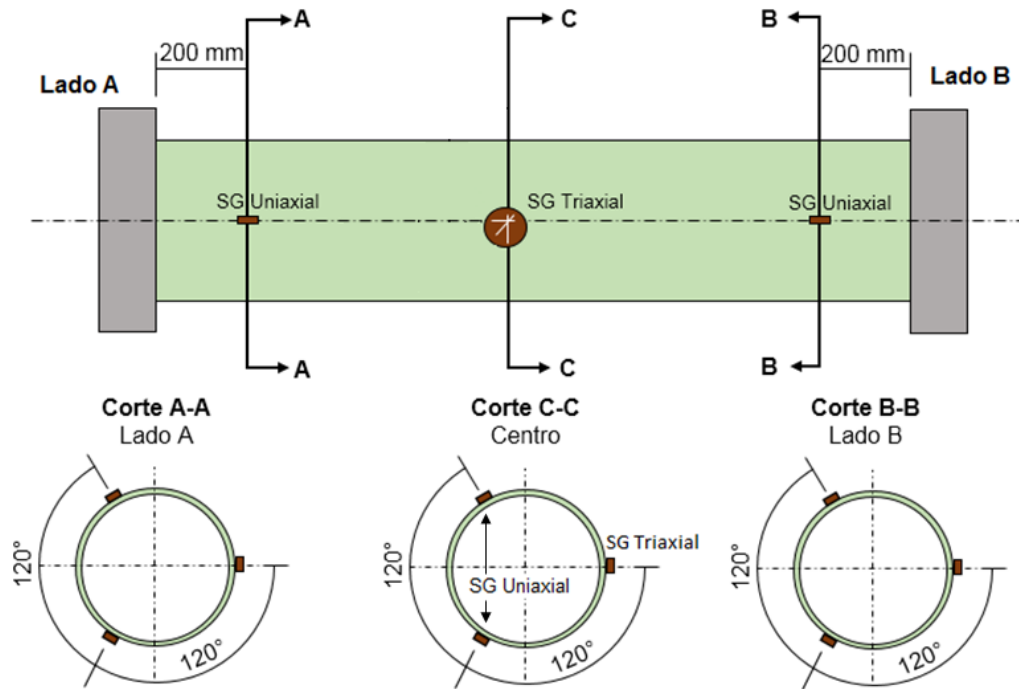


Fonte: (O AUTOR).

Pode-se ver na Figura 33 que em cada um dos lados foram colocados 3 sensores FBGS internos e 3 sensores externos, posicionados a 200 mm do dispositivo de fechamento do tubo. Os sensores FBGS foram posicionados ao redor do tubo, defasados em 120° . O centro da amostra foi instrumentado apenas com os 3 sensores FBGS externos defasados em 120° .

Na Figura 34, é mostrada a instrumentação com extensômetros de resistência elétrica utilizada na amostra LD_BST_01.

Figura 34 – Representação esquemática da instrumentação com ERE's da amostra LD_BST_01.

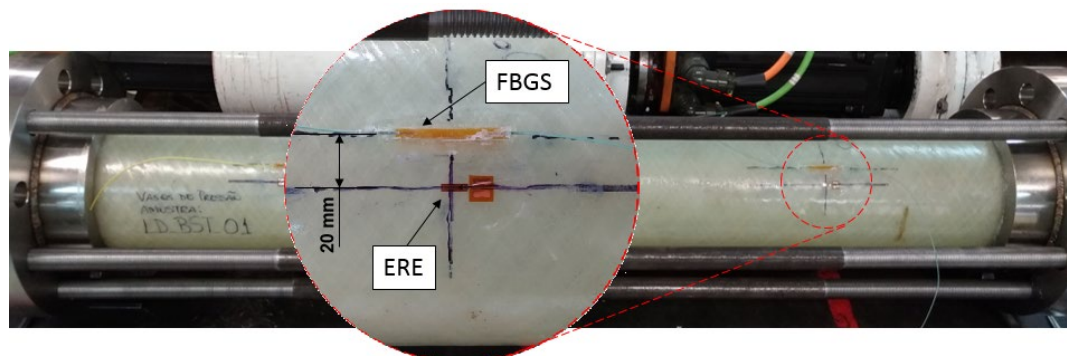


Fonte: (O AUTOR).

A amostra foi instrumentada em cada uma das extremidades com 3 extensômetros de resistência elétrica uniaxiais defasados em 120° , posicionados também a 200 mm do dispositivo de fechamento. No centro da amostra foi posicionado um extensômetro triaxial, na posição de 0° , e 2 extensômetros uniaxiais, nas posições de 120 e 240° . Todos os extensômetros utilizados possuíam comprimento ativo de sensor de 5 mm e resistência de 120Ω .

Os sensores foram todos posicionados de forma longitudinal ao tubo compósito, sendo que os ERE's foram instrumentados a uma distância circunferencial de 20 mm dos sensores FBGS, conforme mostrado na Figura 35.

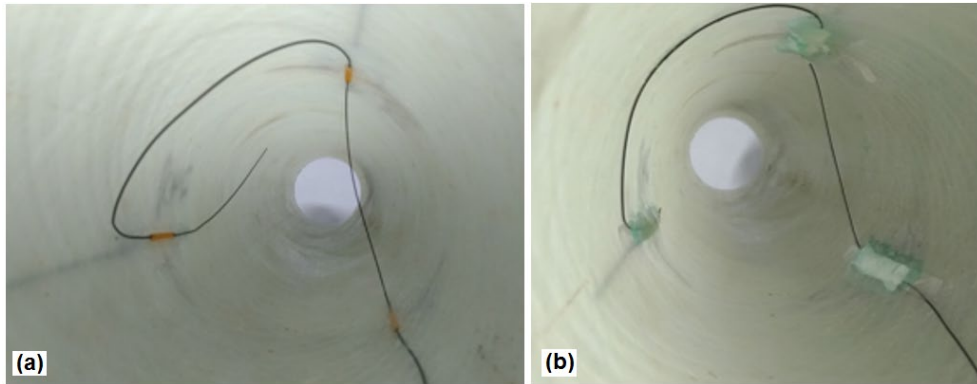
Figura 35 – Posicionamento dos sensores ópticos e elétricos no tubo compósito.



Fonte: (O AUTOR).

Na Figura 36.a, é possível ver a instrumentação interna do tubo com os sensores FBGS, enquanto que, na Figura 36.b, são mostrados os sensores FBGS recobertos com resina epóxi para proteção contra a pressão interna exercida pela água dentro do tubo.

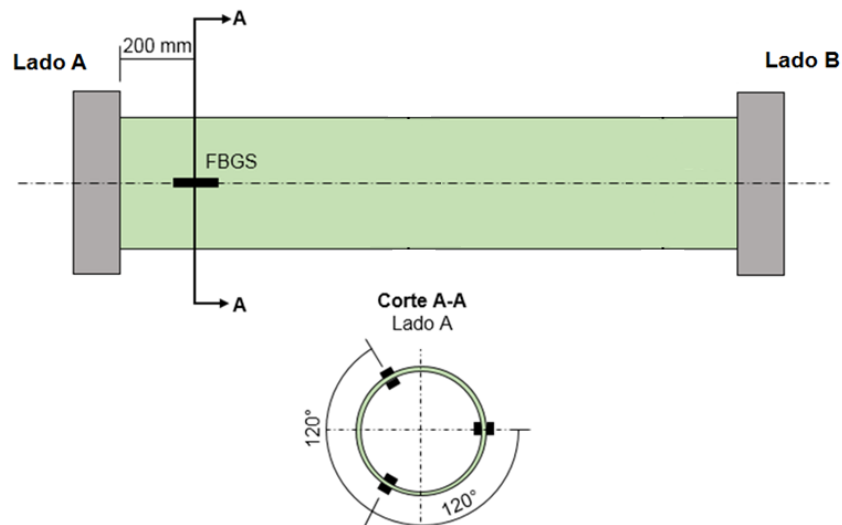
Figura 36 – a) Instrumentação interna com sensores FBGS e b) sensores internos recobertos com resina epóxi.



Fonte: (O AUTOR).

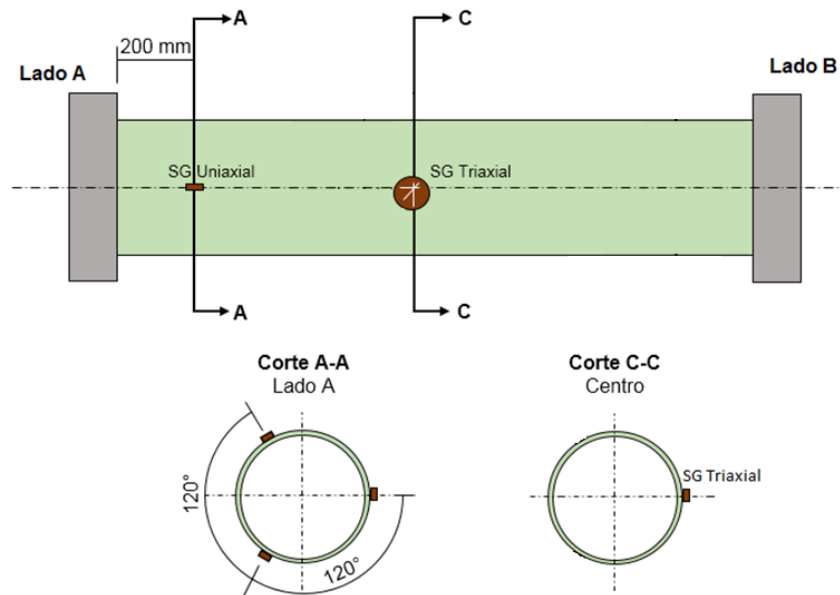
Com base na análise dos resultados obtidos no ensaio da amostra LD_BST_01 definiu-se uma redução na quantidade de sensores para a segunda amostra, denominada como LD_BST_02. A Figura 37 apresenta o desenho esquemático com os sensores FBGS utilizados na instrumentação dessa amostra, enquanto a Figura 38 mostra o desenho esquemático da instrumentação com sensores elétricos.

Figura 37 – Representação esquemática da instrumentação com sensores FBGS da amostra LD_BST_02.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 38 – Representação esquemática da instrumentação com ERE's da amostra LD_BST_02.



Fonte: (O AUTOR).

Nesta amostra, apenas um dos lados foi instrumentado com 3 sensores FBGS internos, 3 sensores FBGS externos e 3 sensores de resistência elétrica, todos mantendo a defasagem de 120° entre si. Foi mantida também a distância de 20 mm entre os sensores ópticos e os sensores elétricos. No centro da amostra, na posição circunferencial de 0° , foi colado um extensômetro de resistência elétrica triaxial. Os sensores foram também instrumentados no sentido longitudinal do tubo.

Para a realização dos ensaios de explosão foi utilizada a mesma infraestrutura usada para o ensaio hidrostático da amostra de vaso de pressão, mostrada nas Figura 30 e Figura 31. Na Figura 39 é mostrada uma das amostras posicionada no *bunker* para o ensaio de explosão.

Figura 39 – Amostra de tubo compósito de PRFV posicionada no *bunker* para ensaio de explosão.



Fonte: (O AUTOR).

3.6 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

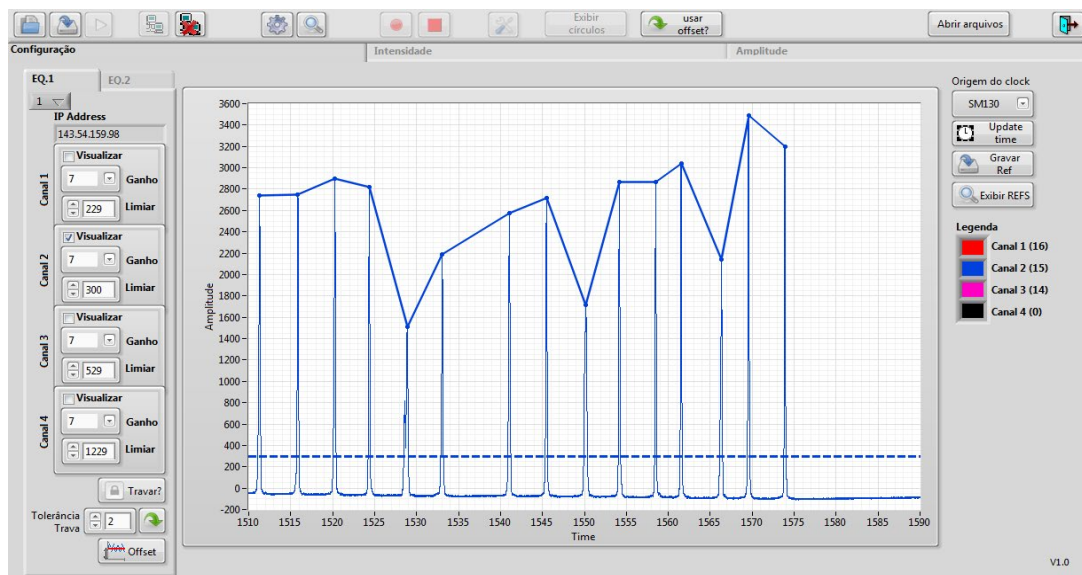
3.6.1 Programação do software

O sistema de aquisição, condicionamento, visualização e armazenamento de dados do sistema óptico de monitoramento de armadura de tração de dutos flexíveis foi escrito na plataforma de programação LabVIEW. Trata-se de uma plataforma de programação amplamente utilizada, sendo apresentada em trabalhos anteriores para desenvolvimento de *software* de monitoramento utilizando sensores do tipo FBGS (SILVA, 2016).

O *software* foi desenvolvido para a interface com o *hardware* DI410 da HBM. Os critérios para a escolha deste *hardware* foram a taxa de aquisição de até 1 kHz em modo *streaming*, o fato de permitir configuração e controle da aquisição através de porta serial e a possibilidade de utilização de multiplexador. O *software* permite que até dois equipamentos, com um multiplexador cada, operem em conjunto.

O interrogador opera utilizando dois tipos de execução: modo de configuração e modo *streaming*. No modo configuração, a comunicação serial funciona com perguntas e respostas; ou seja, o interrogador só altera alguma configuração ou envia alguma informação se o *software* explicitamente solicitar a ação. Nesse modo, pode-se analisar o estado de cada sensor através do gráfico de espectro para cada canal, conforme mostrado na Figura 40. Nesta tela pode-se também ajustar o nível do ruído e o ganho de cada canal, além de definir os *offsets* para cada sensor.

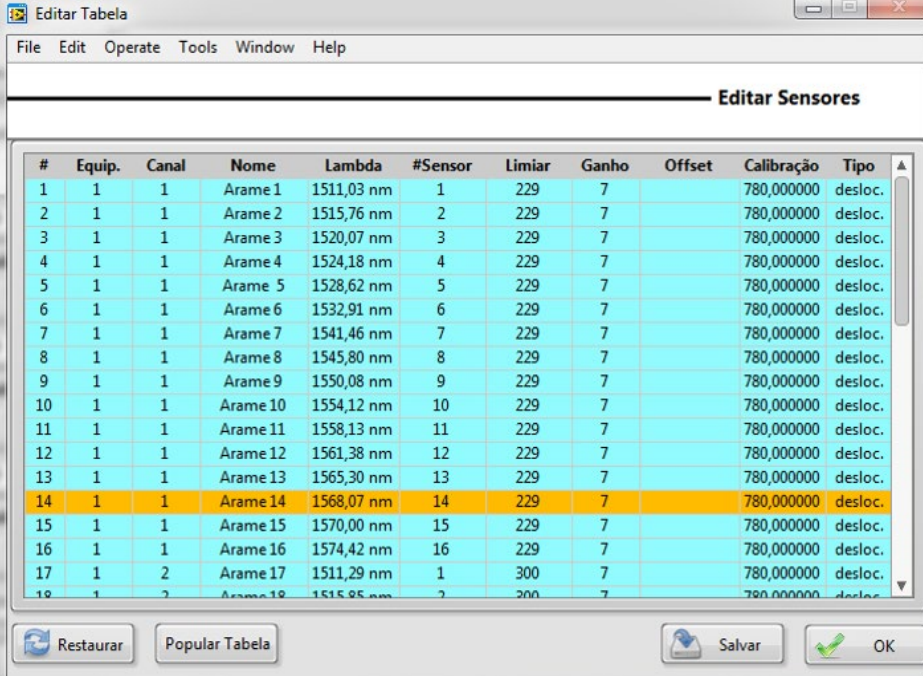
Figura 40 – Tela de configuração dos sensores FBGS.



Fonte: (O AUTOR).

A área de configuração também possui uma estrutura em forma de tabela onde é possível selecionar o nome e ajustar a calibração para cada sensor, posicionar cada sensor na tabela, de modo a refletir a ordem em que os sensores foram colados na amostra, além de atribuir a um ou mais sensores a compensação de temperatura. A tabela de edição de sensores é mostrada na Figura 41.

Figura 41 – Tabela de edição de sensores.



#	Equip.	Canal	Nome	Lambda	#Sensor	Limiar	Ganho	Offset	Calibração	Tipo
1	1	1	Arame 1	1511,03 nm	1	229	7		780,000000	desloc.
2	1	1	Arame 2	1515,76 nm	2	229	7		780,000000	desloc.
3	1	1	Arame 3	1520,07 nm	3	229	7		780,000000	desloc.
4	1	1	Arame 4	1524,18 nm	4	229	7		780,000000	desloc.
5	1	1	Arame 5	1528,62 nm	5	229	7		780,000000	desloc.
6	1	1	Arame 6	1532,91 nm	6	229	7		780,000000	desloc.
7	1	1	Arame 7	1541,46 nm	7	229	7		780,000000	desloc.
8	1	1	Arame 8	1545,80 nm	8	229	7		780,000000	desloc.
9	1	1	Arame 9	1550,08 nm	9	229	7		780,000000	desloc.
10	1	1	Arame 10	1554,12 nm	10	229	7		780,000000	desloc.
11	1	1	Arame 11	1558,13 nm	11	229	7		780,000000	desloc.
12	1	1	Arame 12	1561,38 nm	12	229	7		780,000000	desloc.
13	1	1	Arame 13	1565,30 nm	13	229	7		780,000000	desloc.
14	1	1	Arame 14	1568,07 nm	14	229	7		780,000000	desloc.
15	1	1	Arame 15	1570,00 nm	15	229	7		780,000000	desloc.
16	1	1	Arame 16	1574,42 nm	16	229	7		780,000000	desloc.
17	1	2	Arame 17	1511,29 nm	1	300	7		780,000000	desloc.
18	1	2	Arame 18	1515,85 nm	2	200	7		780,000000	desloc.

Fonte: (O AUTOR).

Um elemento de fundamental importância no modo de configuração é a trava de sensores. Cada canal do interrogador é capaz de ler certo número de sensores FBGS, entregando as leituras na forma de um vetor de valores lidos no sensor em ordem crescente de comprimento de onda. Se, por algum motivo, o sinal de algum dos sensores cair abaixo do limiar de ruído definido para o canal, seu valor não será lido pelo interrogador e todas as leituras subsequentes do canal serão entregues uma posição antes no vetor de leituras, como é mostrado na Linha 3 da Figura 42.

O sistema de trava opera delimitando faixas de valores para cada sensor. Quando um determinado sensor cair abaixo do limiar de ruído, o sistema fará a correção do vetor, inserindo valores nulos na posição que se encontra sem leitura.

Figura 42 – Vetor de leitura dos sensores.



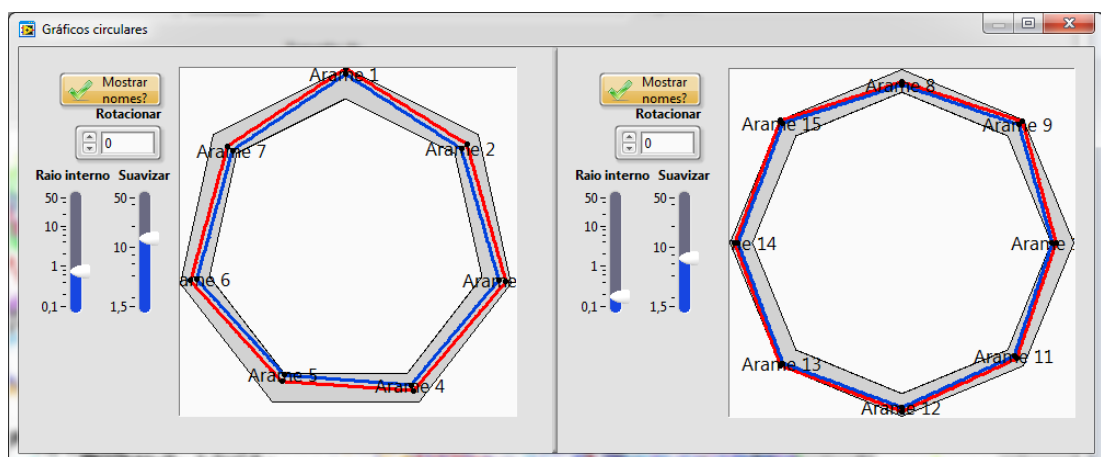
Fonte: (O AUTOR).

Analisando-se a Figura 42, pode ser observado que na Linha 1 temos todos os sensores funcionais. Na Linha 2 o sensor S4 apresenta problemas de leitura. Na Linha 3 temos o conjunto de dados com o sensor S5 na posição do sensor S4 e na Linha 4 temos o conjunto de dados com o sensor S5 na posição correta, corrigido pelo sistema de trava.

Diferentemente do modo de configuração, o modo de aquisição opera com o interrogador enviando os dados lidos seguindo uma base de tempo configurável, sem solicitação do *software* para tal, configurando o *streaming*.

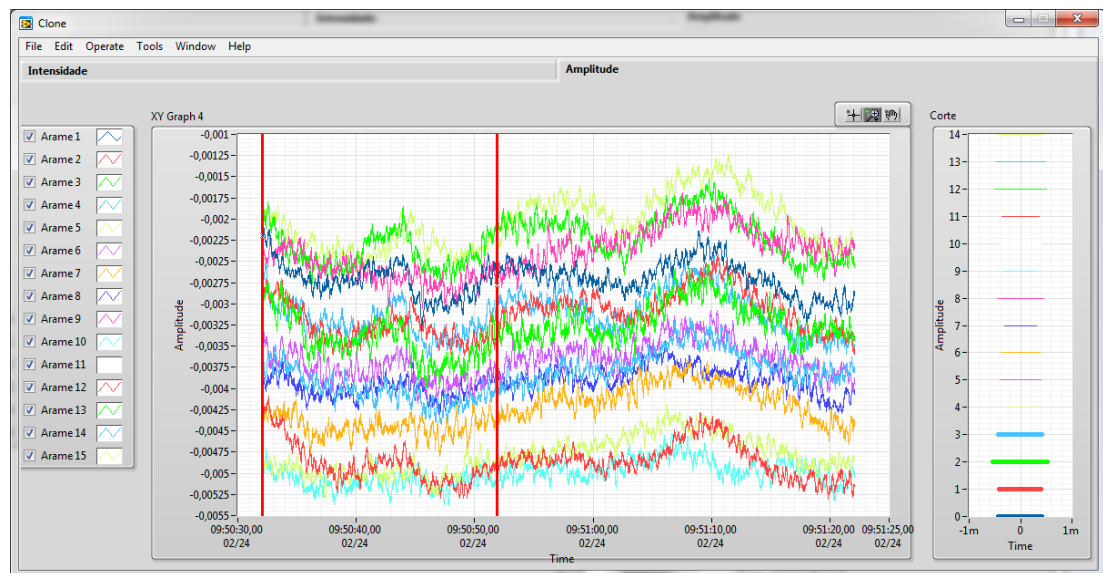
O modo aquisição permite a configuração radial dos sensores em até dois anéis de sensores (Figura 43), seleção da taxa de aquisição, número de médias, exibição dos dados em modo *streaming* em gráficos de amplitude e de diferença de centro (Figura 44) além de gráficos de intensidade (Figura 45). Este modo permite ainda salvar os dados lidos do ensaio.

Figura 43 – Modo de aquisição configuração radial.



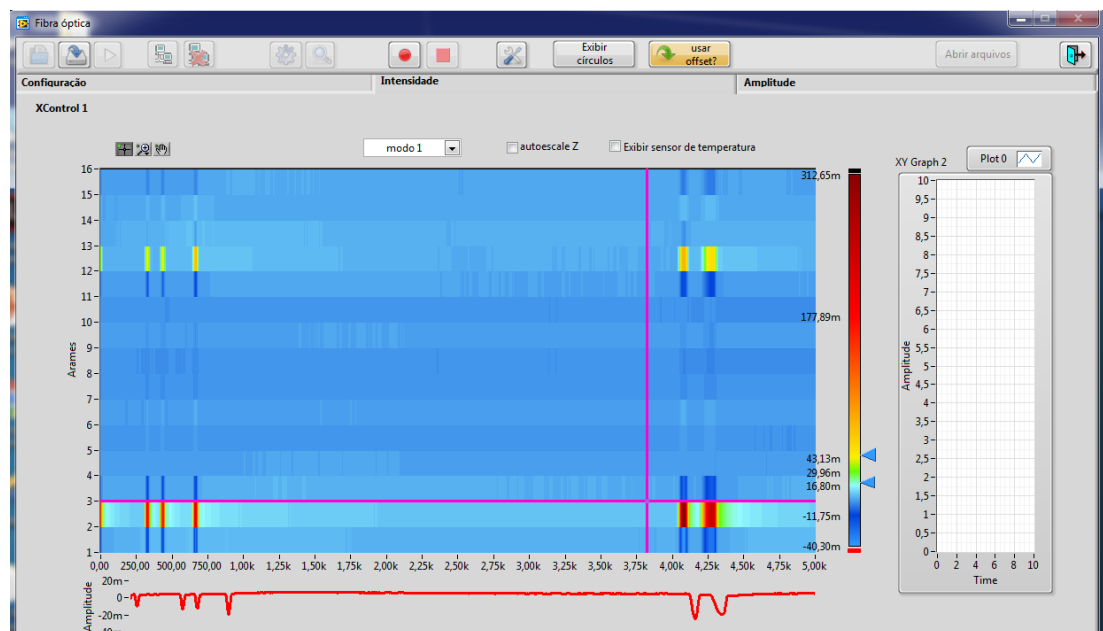
Fonte: (O AUTOR).

Figura 44 – Modo de aquisição *streaming* em gráficos de amplitude e de diferença de centro.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 45 – Modo de aquisição gráfico de intensidade.



Fonte: (O AUTOR).

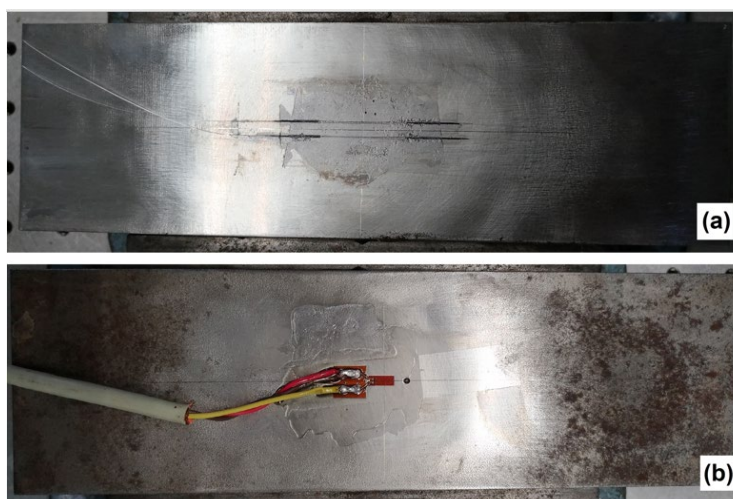
O sistema pode exibir janelas com quantidades variáveis de dados, valor que pode ser alterado em qualquer instante da aquisição. Os gráficos de amplitude e intensidade possuem dois cursores para selecionar um subconjunto de dados dos respectivos gráficos para exibí-los no gráfico de diferença de centro. O *software* pode também criar um clone dos gráficos para facilitar a análise do estado atual dos dados.

Uma vez iniciada a gravação dos dados, vários controles são travados e o usuário fica limitado às telas dos gráficos, não podendo mais acessar o módulo de configuração. Os dados são salvos em arquivos em formato binário, de modo a diminuir o processamento e o uso do disco rígido, deixando o sistema mais leve tanto para a visualização de dados quanto para o pós-processamento, visto que o sistema consegue abrir dados nesse formato mais rapidamente se comparado com o padrão ASCII.

3.6.2 Metodologia para comparação entre o *software* desenvolvido e o *software* comercial

De forma a validar o *software* desenvolvido no laboratório foi elaborado um experimento para comparar os valores obtidos com o *software* próprio e os valores obtidos com o *software* comercial Catman Easy[®]. Uma barra metálica de 200 x 60 x 10 mm foi instrumentada em uma das faces com dois sensores FBGS posicionados no centro da amostra no sentido longitudinal. Um dos sensores foi monitorado utilizando o *software* produzido, enquanto o outro sensor foi monitorado utilizando o *software* comercial. Na face oposta da amostra foi colado um extensômetro de resistência elétrica de 3 mm de comprimento de grade e 120 Ω de resistência elétrica, também no sentido longitudinal e no centro da amostra. Na Figura 46 pode-se ver a amostra instrumentada com os sensores FBGS e com o ERE.

Figura 46 – Amostra instrumentada com a) sensores FBGS e b) ERE.

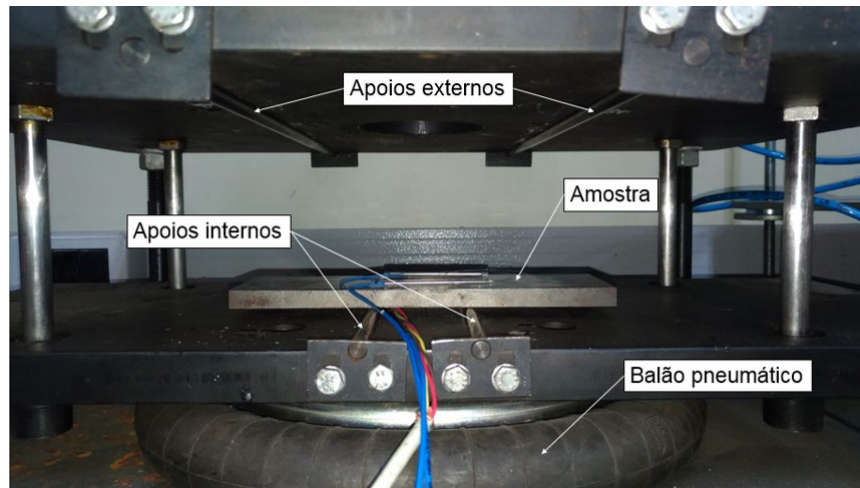


Fonte: (O AUTOR).

A amostra foi posicionada em um dispositivo de flexão a 4 pontos de forma a manter a área na qual os sensores foram instrumentados entre os 4 apoios. A área central de uma amostra submetida à uma flexão a 4 pontos apresenta um campo de tensões com distribuição homogênea (CARVALHO; DUARTE, 2000). A amostra foi posicionada no equipamento mantendo a face

instrumentada com os sensores FBGS submetidos à tração, enquanto que o ERE estava submetido à compressão. A Figura 47 mostra a amostra posicionada no dispositivo de flexão a 4 pontos.

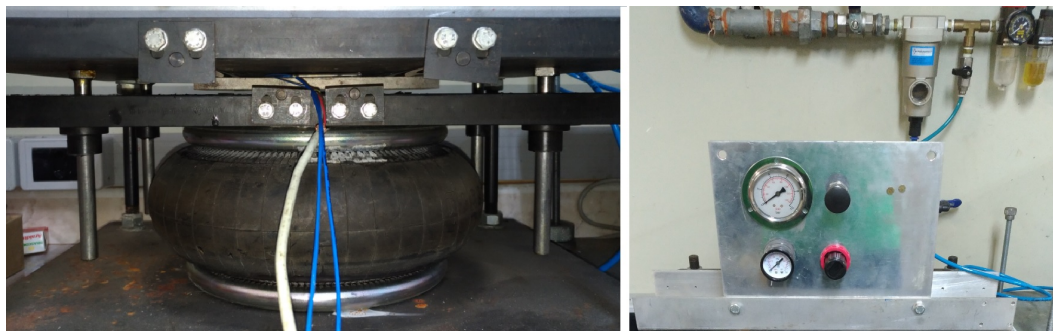
Figura 47 – Amostra posicionada no dispositivo de flexão a 4 pontos.



Fonte: (O AUTOR).

O dispositivo é composto por uma plataforma superior fixa, onde ficam posicionados os dois apoios externos e por uma plataforma inferior móvel, onde ficam posicionados os dois apoios internos. A plataforma móvel fica instalada em cima de um balão pneumático, sendo que este balão pneumático é controlado com ar comprimido. Ao inflar o balão pneumático com ar comprimido, ele movimenta a plataforma inferior em direção à plataforma superior, fazendo com que os 4 apoios flexionem a amostra. Na Figura 48, é possível observar à esquerda a amostra sobre flexão devido ao balão inflado e à direita o sistema de controle do balão pneumático.

Figura 48 – Amostra flexionada (esquerda) e sistema de controle do balão pneumático (direita).



Fonte: (O AUTOR).

Utilizando-se este dispositivo, a amostra foi submetida aos patamares de pressão demonstrados na Tabela 4, enquanto foram monitoradas as deformações nos sensores instrumentados na amostra. Um dos sensores FBGS foi monitorado utilizando o software desenvolvido no laboratório, enquanto o outro sensor FBGS e o ERE foram monitorados utilizando-se o Catman Easy[®].

Tabela 4 – Patamares de pressão utilizados no ensaio de flexão a 4 pontos.

Patamar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pressão											
[bar]	0	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0

Fonte: (O AUTOR).

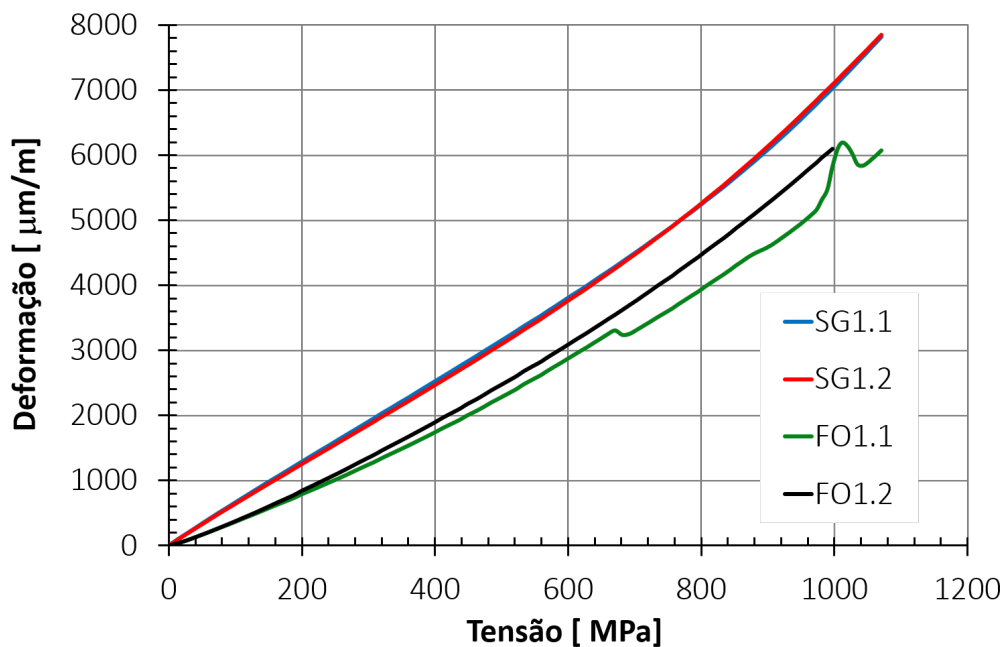
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos ao longo desse trabalho são apresentados e discutidos neste tópico. São analisados os desempenhos estático e dinâmico dos sensores desenvolvidos, bem como sua aplicação prática em diferentes estruturas. Neste tópico é também apresentado o funcionamento do *software* de monitoramento desenvolvido.

4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTÁTICO DOS SENSORES

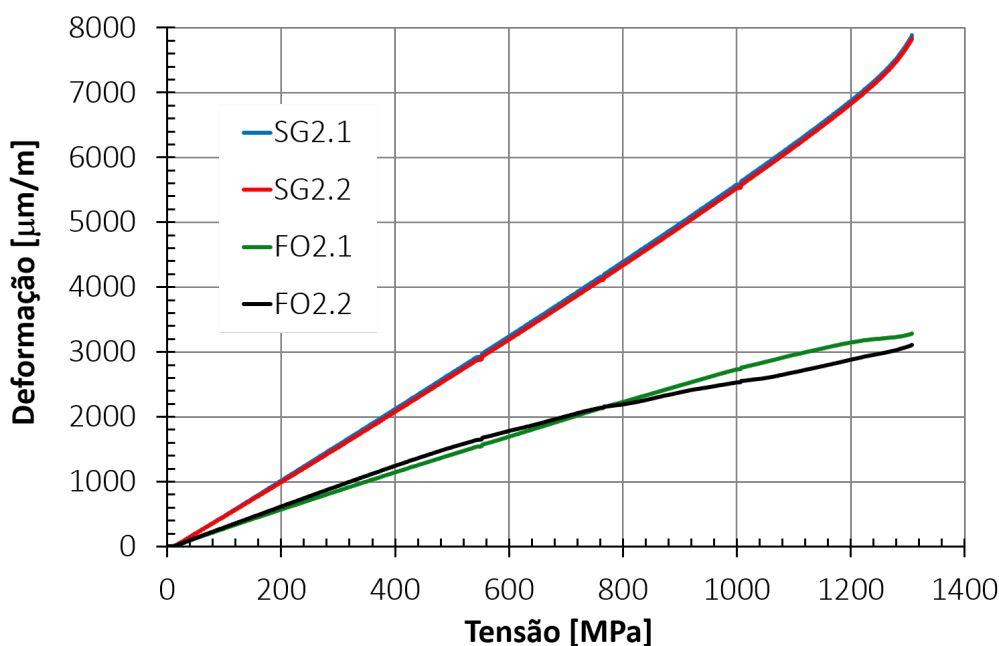
Nas Figuras 49 e 50 são apresentados, em forma de gráficos de deformação em função da tensão, os resultados obtidos na realização dos ensaios de tração das amostras instrumentadas com os sensores das Condições 1 e 2, apresentadas na Tabela 1, sendo essas as condições com a instrumentação da fibra óptica direto na superfície de medição, sem a utilização de um substrato intermediário.

Figura 49 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 1.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 50 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 2.

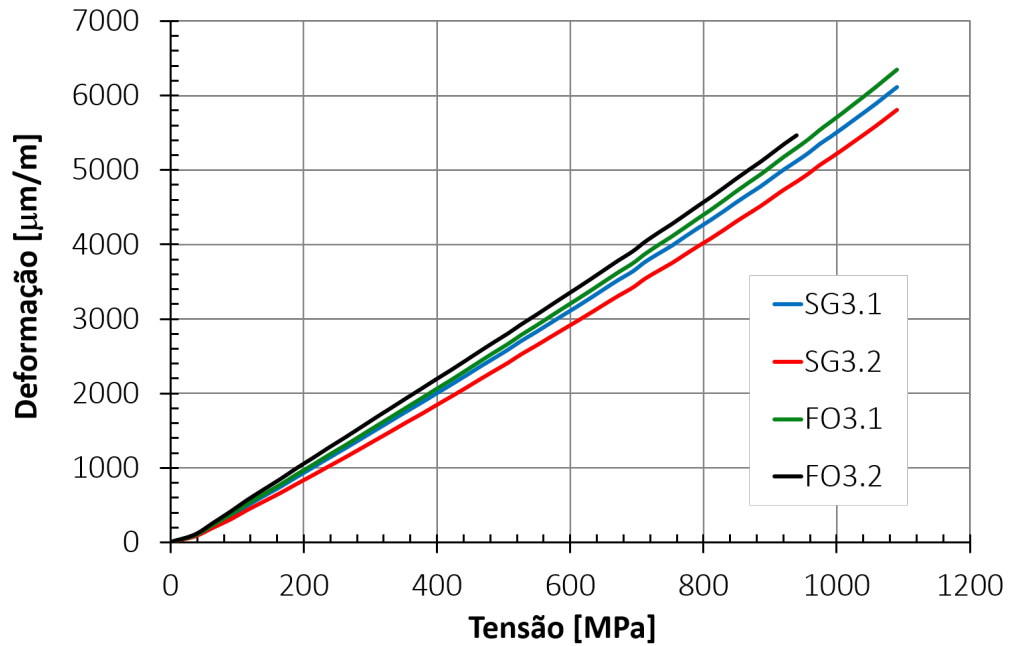


Fonte: (O AUTOR).

Na Figura 49 (Condição 1) o sensor FO1.1 apresentou problemas de medição em um nível de deformação próximo a 3.300 $\mu\text{m}/\text{m}$, enquanto o sensor FO1.2 suportou um nível de deformação próximo a 6.000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Além disso, os sensores ópticos apresentaram um desvio significativo nos valores de medição quando comparados aos sensores elétricos, mostrando que a transferência de deformação da superfície de medição para os sensores ópticos não foi adequada. A Condição 1, com o sensor colado diretamente na amostra com cola do tipo cianocrilato, não se mostrou eficaz para o monitoramento da deformação. A adesão do sensor diretamente na superfície de medição apenas com a resina epóxi estudada neste trabalho (Condição 2) teve um desempenho insatisfatório na transferência de deformação da amostra para o sensor, os valores medidos com os sensores FBGS desviaram-se significativamente dos valores encontrados com os ERE. A transferência de deformação da superfície de medição para a resina epóxi e da resina para a fibra óptica não aconteceu de forma homogênea. A Condição 2, com a resina epóxi comercial, não foi para o monitoramento da deformação da amostra.

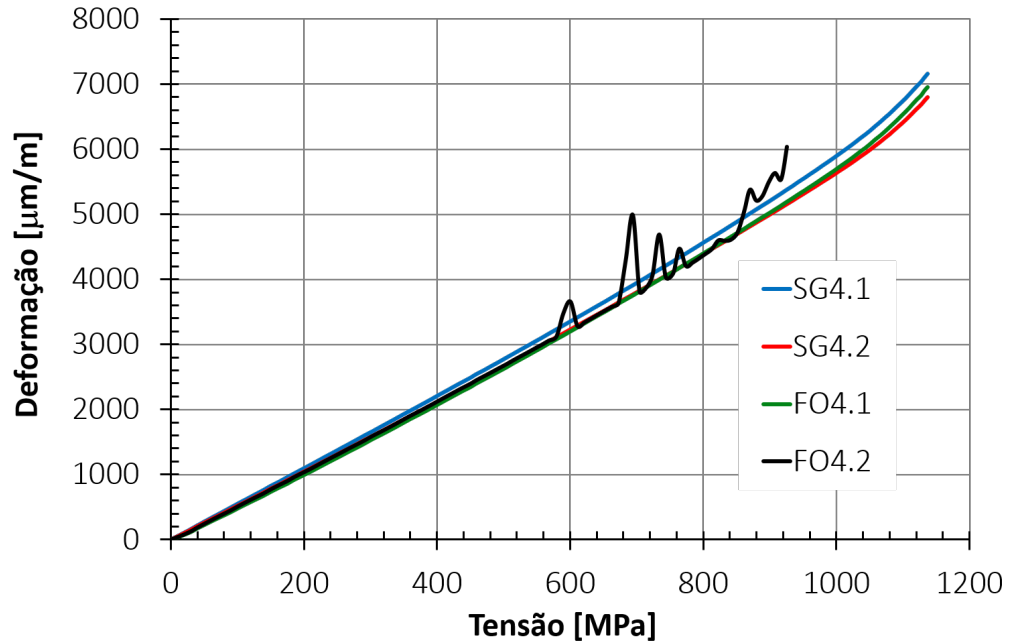
O gráfico da Figura 51 mostra os resultados obtidos no ensaio de tração das amostras instrumentadas com a Condição 3 de montagem, enquanto o gráfico da Figura 52 apresenta os resultados obtidos com as amostras instrumentadas com a Condição 4. As Condições 3 e 4 são os sensores FBGS encapsulados com silicone, conforme descrito na Tabela 1.

Figura 51 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 3.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 52 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 4.



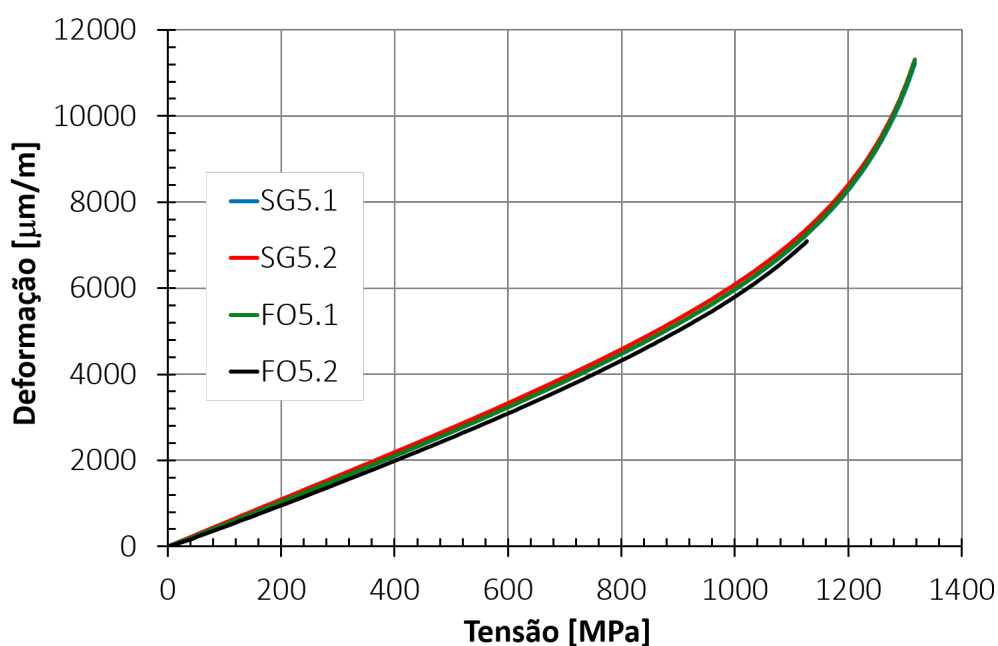
Fonte: (O AUTOR).

A Condição 3 teve a proteção do sensor feita com silicone e a colagem da fibra óptica no substrato realizada apenas nas extremidades, deixando a rede de Bragg livre. Essa configuração de montagem apresentou uma diferença significativa entre os valores obtidos com todos os

sensores utilizados. O fato de os sensores elétricos apresentarem diferença entre si pode significar que a amostra não estava muito bem alinhada na máquina. Os sensores FO3.1 e FO3.2 alcançaram níveis de deformações próximos a 6.400 e 5.400 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente, não suportando altos níveis de carregamento. A Condição 4 (Figura 52) também foi produzida com proteção de silicone, porém, diferentemente da Condição 3, foi realizada a colagem de toda a rede de Bragg no substrato polimérico. Essa configuração apresentou uma boa transferência de deformação da amostra para os sensores, ficando próximos os resultados das medições com sensores ópticos e elétricos. Porém, no quesito resistência, o sensor FO4.2 apresentou ruídos para deformações acima de 3.000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Estes ruídos são consequência de danos na rede de Bragg, fazendo com que ocorra um fenômeno chamado de birrefringência. A birrefringência faz com que o pico de Bragg divida-se em dois picos, fazendo com que o equipamento se perca na hora de identificar o comprimento de onda de Bragg corretamente. O sensor FO4.1 atingiu deformações próximas a 7.000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os resultados das Condições 3 e 4 mostram que o encapsulamento com silicone avaliado neste estudo não apresentou ganhos significativos para monitoramento de deformações elevadas.

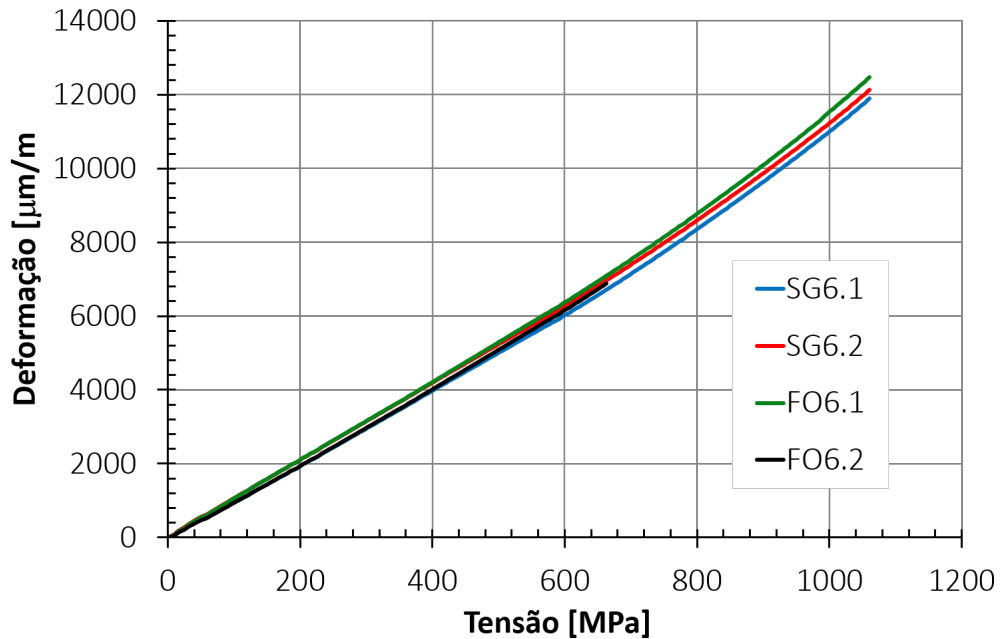
Nas Figuras 53 e 54 são apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios de tração das amostras instrumentadas com os sensores das Condições 5 e 6 apresentados na Tabela 1.

Figura 53 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 5.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 54 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 6.

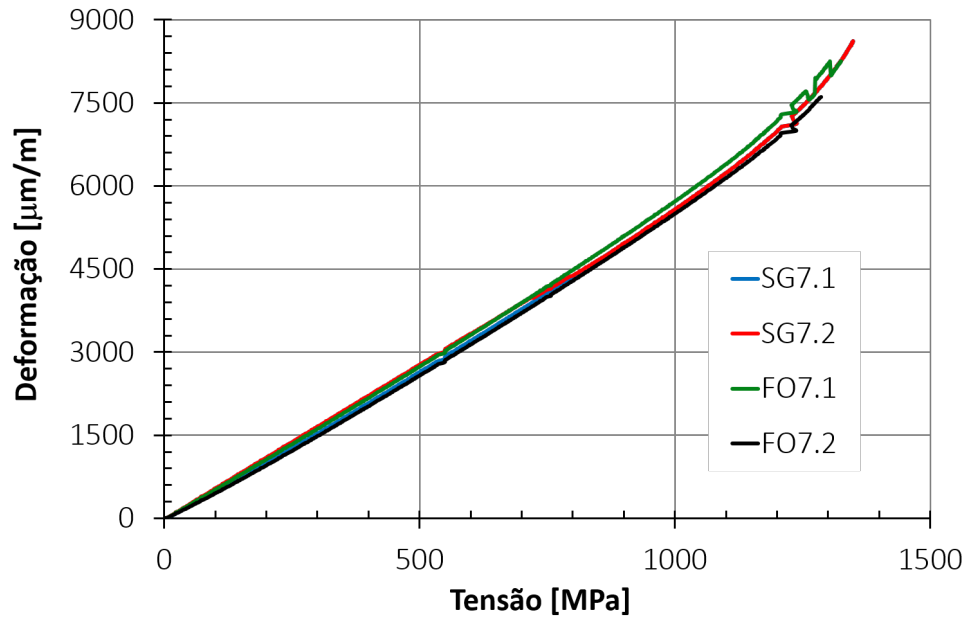


Fonte: (O AUTOR).

Os sensores com as Condições 5 e 6 apresentaram desempenho satisfatório durante os ensaios de tração aos quais foram submetidos. A proteção com resina epóxi mostrou-se uma solução viável para o problema da transferência de deformação da superfície de medição para o sensor, bem como para o aumento de resistência do sensor para deformações elevadas. Nota-se que, nos resultados das Condições 5 e 6, os valores obtidos com os sensores ópticos ficaram muito próximos aos valores obtidos por extensometria de resistência elétrica. Os sensores que possuíam a rede de Bragg livre (Condição 5) suportaram deformações próximas de 7.100 $\mu\text{m/m}$ para o sensor FO5.2 e de 11.300 $\mu\text{m/m}$ para o sensor FO5.1, enquanto os sensores que tiveram toda a rede de Bragg colada (Condição 6) mediram deformações próximas de 12.500 $\mu\text{m/m}$ para o sensor FO6.1 e de 6.900 $\mu\text{m/m}$ para o sensor FO6.2. Comparando-se os resultados obtidos na Figura 53 e na Figura 54, nota-se que a região de colagem da fibra no substrato de poliamida não resultou em grandes diferenças no desempenho de cada um dos sensores, sendo que ambas as condições apresentaram um desempenho semelhante.

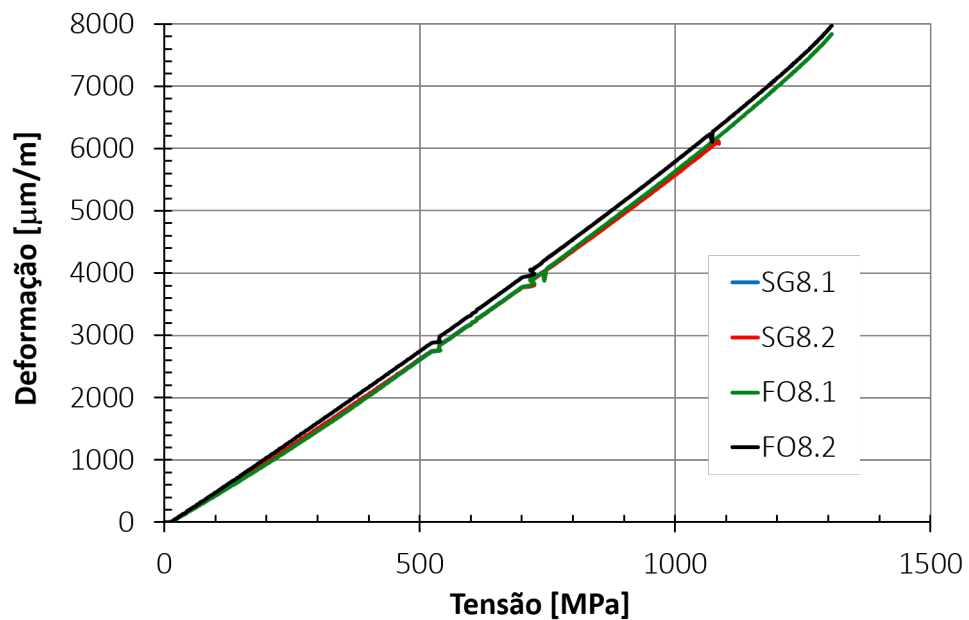
Para as duas últimas amostras analisadas no ensaio estático foi realizado o encapsulamento dos sensores de forma prévia, ao contrário das amostras anteriores onde era realizada a proteção do sensor durante a instrumentação na amostra. Os resultados obtidos para as Condições 7 e 8 podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 55 e 56.

Figura 55 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 7.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 56 – Resultado comparativo entre medições com sensores ópticos e elétricos para a Condição 8.



Fonte: (O AUTOR).

O encapsulamento prévio dos sensores FBGS com resina epóxi mostrou-se uma solução viável no quesito transferência de deformação da amostra para o sensor. Observando-se os gráficos das Figura 55 e 56 é possível ver que, tanto a Condição 7, quanto a Condição 8, apresentaram valores bem próximos entre as medições com sensores ópticos e elétricos. Na

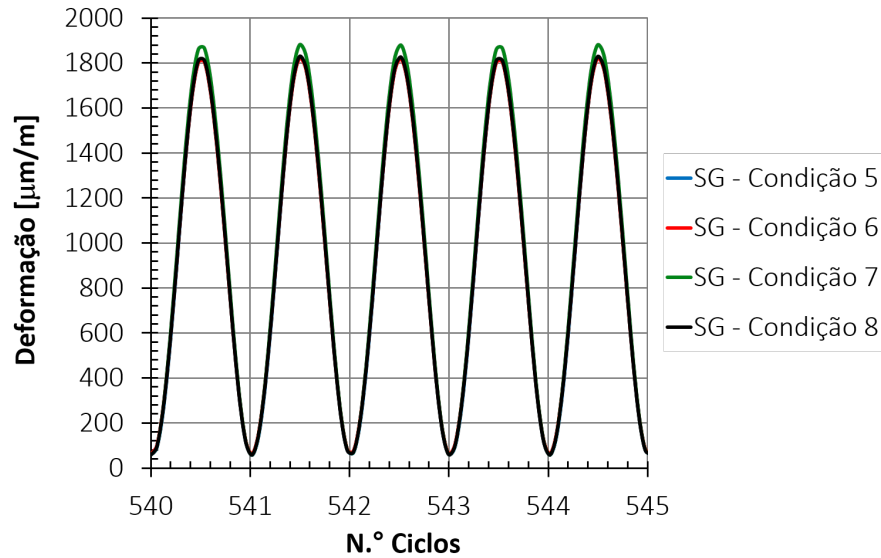
Condição 7 o sensor FO7.1 suportou deformações próximas de 8.250 $\mu\text{m}/\text{m}$, enquanto o sensor FO7.2 alcançou deformações da ordem de 7.600 $\mu\text{m}/\text{m}$. Para a Condição 8 os sensores FO8.1 e FO8.2 alcançaram níveis de deformação de 7.850 e 8.000 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ambas as condições avaliadas tiveram um desempenho bastante semelhante, mostrando novamente que a região de colagem da fibra óptica no substrato não afeta significativamente a performance dos sensores desenvolvidos. As Condições 7 e 8 suportaram níveis relativamente elevados de deformação, apresentando um ganho de resistência se comparado à fibra crua.

Analisando-se o desempenho estático de todos os sensores desenvolvidos neste trabalho nota-se que os sensores que apresentaram os melhores resultados foram os que tiveram a proteção realizada com resina do tipo epóxi. A região de colagem da fibra óptica no substrato polimérico não afetou o desempenho dos sensores de forma significativa. Os sensores protegidos com silicone avaliados neste estudo não apresentaram resultados satisfatórios na transferência de deformação da amostra para o sensor e a proteção com silicone testada não resultou em um ganho de resistência dos sensores para níveis elevados de deformação. A colagem da fibra óptica diretamente na amostra com cola do tipo cianocrilato mostrou-se ineficaz para o monitoramento de altas deformações. A resina epóxi avaliada neste trabalho não foi eficaz para a realização da colagem do sensor de fibra óptica na amostra. Como a resina epóxi testada neste trabalho foi uma resina comercial comum e por existirem diversos tipos diferentes de resina epóxi, um estudo posterior pode ser realizado para avaliar a utilização de diferentes resinas, com a finalidade de definir uma resina mais adequada para esta utilização.

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DOS SENSORES

Na Figura 57, é apresentado um intervalo de tempo, no início do ensaio, monitorando as deformações nos arames com os extensômetros de resistência elétrica.

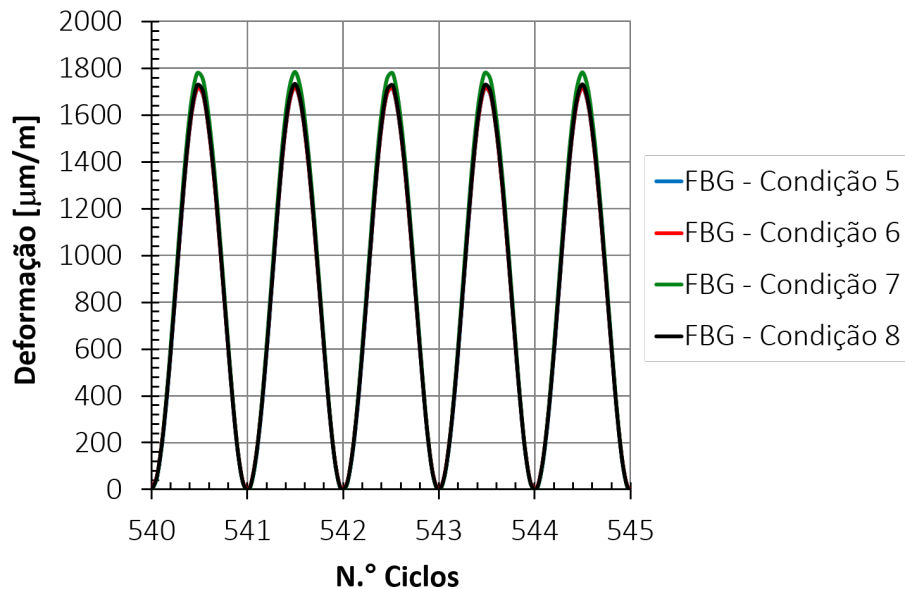
Figura 57 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos no início do ensaio.



Fonte: (O AUTOR).

A Figura 58 apresenta o mesmo intervalo de tempo com o monitoramento das deformações realizado através dos sensores de fibra óptica.

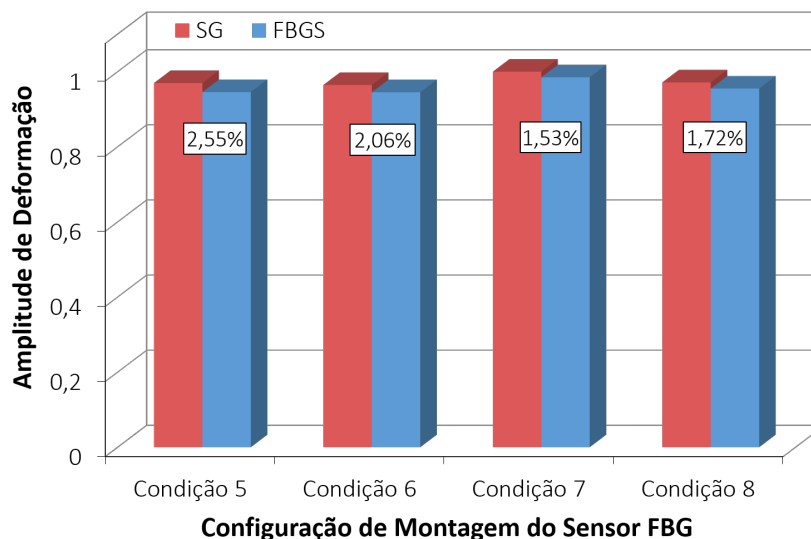
Figura 58 – Valores de deformação obtidos com sensores ópticos no início do ensaio.



Fonte: (O AUTOR).

Com base nos dados adquiridos neste intervalo de tempo analisado, foi realizada uma comparação entre as médias das amplitudes normalizadas medidas com cada sensor, nas quatro amostras, como mostrado na Figura 59.

Figura 59 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para um intervalo de tempo no início do ensaio.

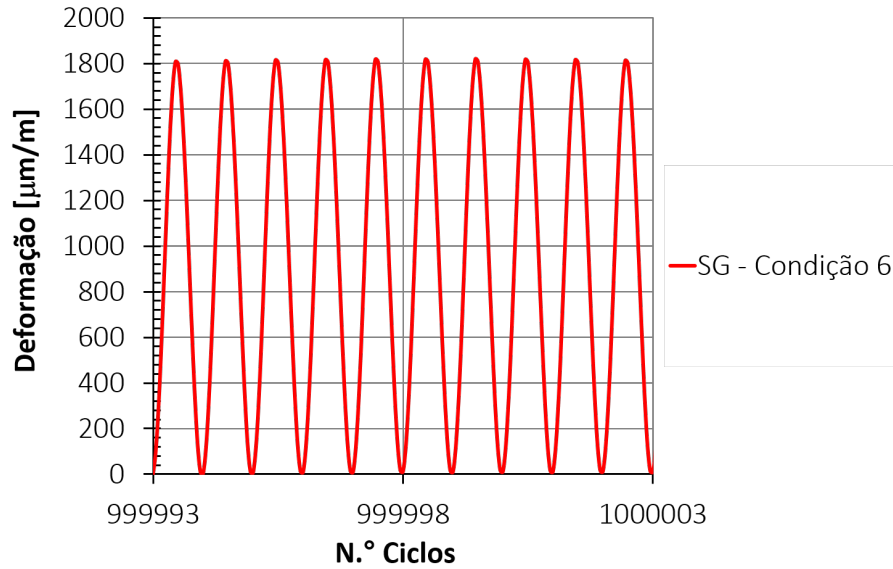


Fonte: (O AUTOR).

É possível observar que as duas técnicas de monitoramento utilizadas apresentaram comportamento semelhante para todas as amostras. A amplitude média de deformação obtida com os ERE no início do ensaio foi de 1770 $\mu\text{m/m}$, enquanto a amplitude média obtida com os sensores FBG foi de 1736 $\mu\text{m/m}$. As medições realizadas com os sensores elétricos apresentaram valores levemente superiores aos encontrados com os sensores ópticos em todas as amostras, sendo que a maior diferença percentual encontrada foi de 2,55%, na amostra com a Condição 5 de encapsulamento. A diferença percentual média entre as técnicas de medição foi de 1,96%. As quatro amostras monitoradas apresentaram níveis de deformação bem próximos entre si, com pequenas variações devido ao posicionamento de cada amostra no dispositivo de fixação. A amplitude de deformação nas amostras ficou próxima aos 1.800 $\mu\text{m/m}$ definidos para o ensaio.

A Figura 60 apresenta os valores de medição obtidos com os sensores ERE para um intervalo de tempo após a realização de 1 milhão de ciclos de ensaio.

Figura 60 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos após 1 milhão de ciclos.

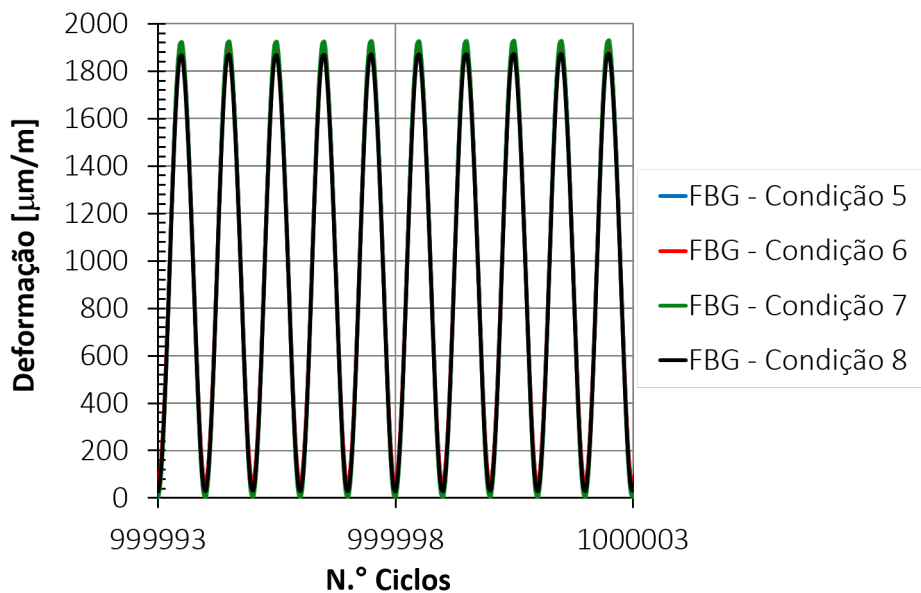


Fonte: (O AUTOR).

É possível observar que o gráfico da Figura 60 apresenta resultados apenas para uma das amostras, para as demais amostras os extensômetros de resistência elétrica apresentaram problemas de medição, pois os fios de ligação dos extensômetros acabaram se desprendendo da resistência.

Na Figura 61, são mostrados, para o mesmo intervalo de tempo, os resultados obtidos com os sensores de fibra óptica.

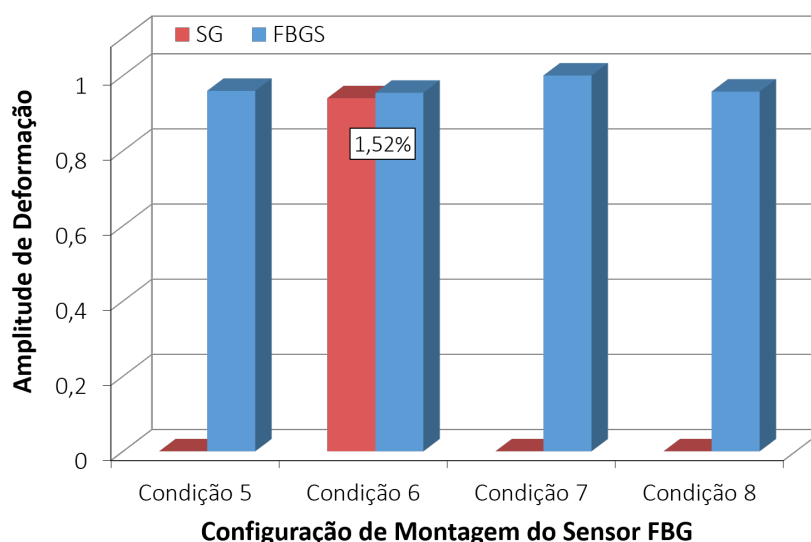
Figura 61 – Valores de deformação obtidos com sensores ópticos após 1 milhão de ciclos.



Fonte: (O AUTOR).

Todos os sensores ópticos mantiveram-se funcionais após a realização de 1 milhão de ciclos de ensaio, não apresentando problemas de medição ou perda de sinal. Devido ao problema de medição apresentado por alguns dos sensores elétricos, para esta etapa do ensaio só foi possível fazer a comparação entre as técnicas para o arame instrumentado com a Condição 6 de encapsulamento, como mostrado na Figura 62.

Figura 62 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para um intervalo de tempo após 1 milhão de ciclos.



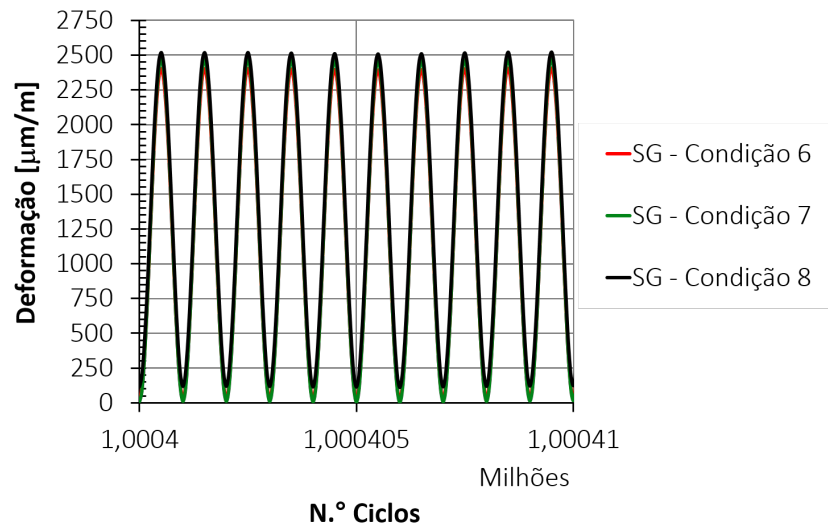
Fonte: (O AUTOR).

Para a amostra em que não ocorreu problemas no ERE a diferença percentual de amplitude entre os valores obtidos com as duas técnicas ficou em 1,52%, sendo a amplitude medida com o sensor elétrico de 1.805 µm/m e com o sensor óptico de 1.833 µm/m. Diferentemente do início do ensaio, nesta etapa a amplitude obtida com o sensor óptico foi superior à amplitude medida com o sensor elétrico.

Outro comportamento que pode ser observado foi na amostra instrumentada com a Condição 7 de encapsulamento, que apresentou uma amplitude de deformação levemente superior às demais amostras, indicando que este arame estava sendo submetido a uma tensão superior aos demais arames durante o ensaio. Para a amostra instrumentada com a Condição 7, a amplitude de deformação foi de 1.922 µm/m, enquanto para as amostras com as Condições 5, 6 e 8 foram de 1.843, 1.833 e 1.839 µm/m, respectivamente.

A Figura 63 apresenta os resultados de deformação para um intervalo de tempo após o aumento da amplitude de carregamento. Antes do aumento do carregamento, foi realizada uma manutenção nos sensores elétricos que apresentaram perda de sinal durante o ensaio.

Figura 63 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos após aumento da amplitude de carregamento.

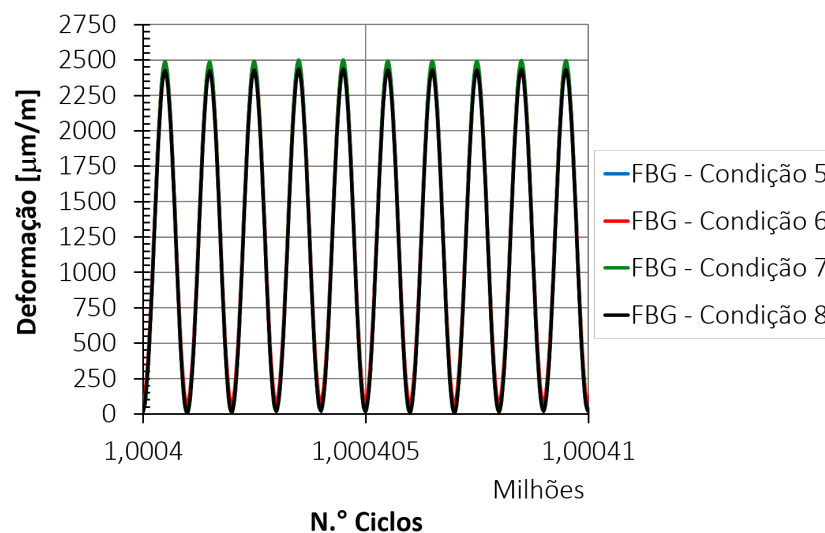


Fonte: (O AUTOR).

Não foi possível realizar a manutenção do extensômetro de resistência elétrica da amostra instrumentada com a Condição 5 de encapsulamento. O ensaio prosseguiu com o monitoramento apenas das três amostras restantes.

Na Figura 64, são mostrados para o mesmo intervalo de tempo os resultados de deformação obtidos com os sensores FBGS.

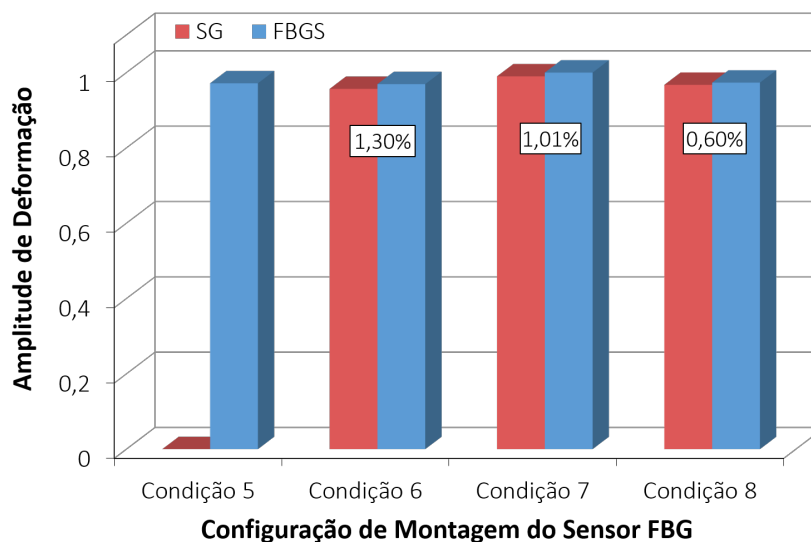
Figura 64 – Valores de deformação obtidos com sensores elétricos após aumento da amplitude de carregamento.



Fonte: (O AUTOR).

Todos os sensores ópticos mantiveram-se funcionais após o aumento da amplitude de carregamento. Na Figura 65 é apresentada a comparação entre as medições obtidas com os sensores elétricos e os sensores ópticos.

Figura 65 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para um intervalo de tempo logo após aumento da amplitude de carregamento.



Fonte: (O AUTOR).

A amplitude média monitorada com os ERE foi de 2.409,51 $\mu\text{m}/\text{m}$, enquanto a amplitude média obtida com os sensores FBG foi de 2.427 $\mu\text{m}/\text{m}$. A máxima diferença na amplitude de deformação encontrada entre as técnicas foi de 1,30%, na amostra instrumentada com a Condição 6 de encapsulamento.

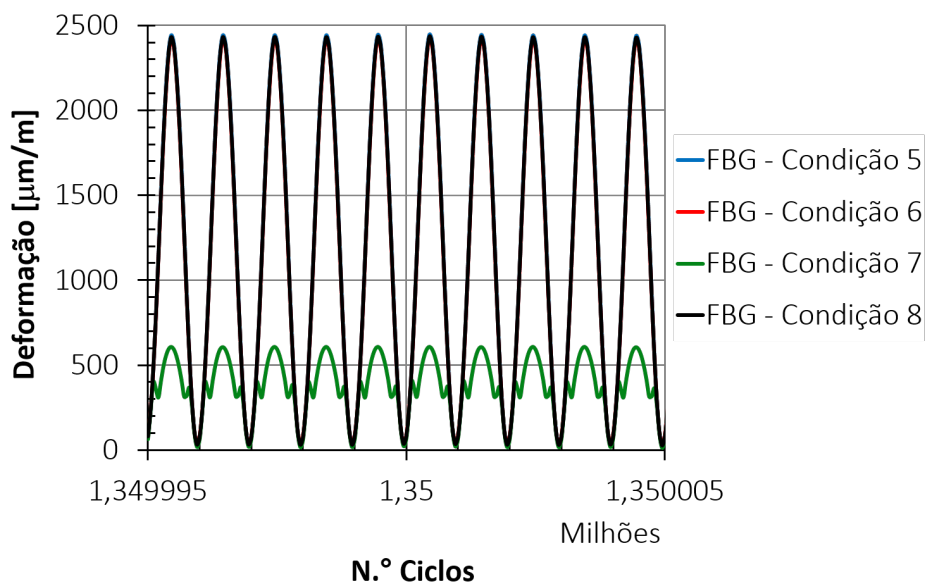
Novamente os sensores ópticos apresentaram valores de deformação levemente superiores aos resultados obtidos com os sensores elétricos. A amostra instrumentada com a Condição 7 de encapsulamento manteve-se como a que apresentou os maiores níveis de deformação, alcançando uma amplitude de 2.4556 $\mu\text{m}/\text{m}$ medida com o ERE e de 2.481 $\mu\text{m}/\text{m}$ na medição com o sensor FBG.

Os sensores de fibra óptica do tipo rede de Bragg desenvolvidos mantiveram-se apresentando resultados de medição confiáveis após a realização de 1 milhão de ciclos de ensaio e após o aumento da amplitude de carregamento.

Após um total de aproximadamente 1,350 milhão de ciclos ocorreu uma pausa no ensaio devido a um problema hidráulico ocorrido no equipamento. Posteriormente o ensaio foi

reiniciado, porém o sensor óptico da amostra instrumentada com a Condição 7 de encapsulamento retornou com problemas de medição, conforme mostrado Figura 66.

Figura 66 – Perda de sinal do sensor óptico encapsulado com a Condição 7 (após 1,350 milhão de ciclos).

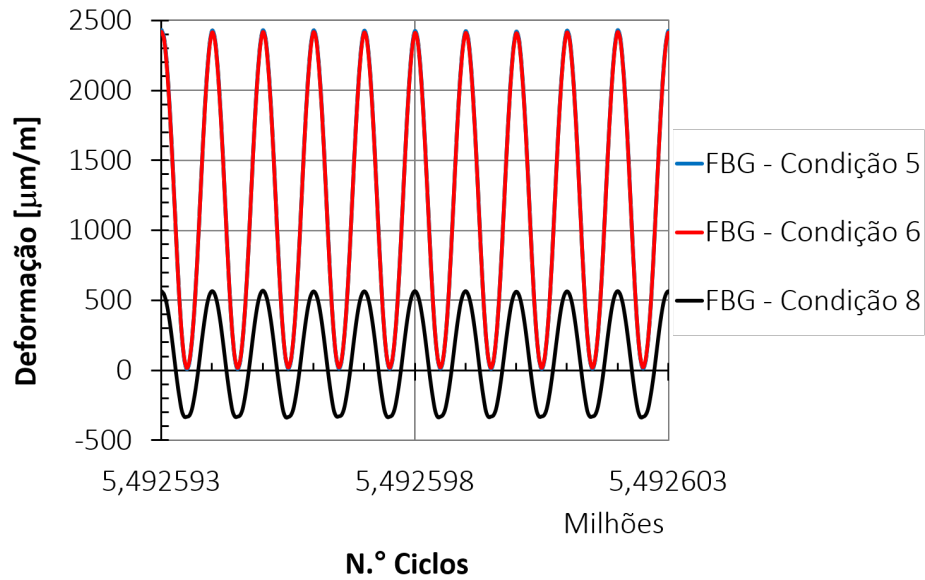


Fonte: (O AUTOR).

É possível notar que esse sensor apresenta resultados de medição corretos para baixos níveis de deformação, porém, quando os níveis de deformação aumentam ocorre uma perda de sinal e o sensor apresenta resultados incoerentes. Esse comportamento ocorre quando temos birrefringência no nosso sensor de rede de Bragg, ou seja, quando o pico de Bragg divide-se em dois devido à danos na rede de Bragg. Os demais sensores mantiveram-se funcionando corretamente e o ensaio prosseguiu com o monitoramento apenas com os 3 sensores ópticos restantes.

Decorridos aproximadamente 5,5 milhões de ciclos de ensaio, o sensor da amostra instrumentada com a Condição 8 de encapsulamento começou a apresentar problemas na medição, como pode ser visto na Figura 67.

Figura 67 – Perda de sinal do sensor óptico encapsulado com a Condição 8 (após 5,5 milhões de ciclos).

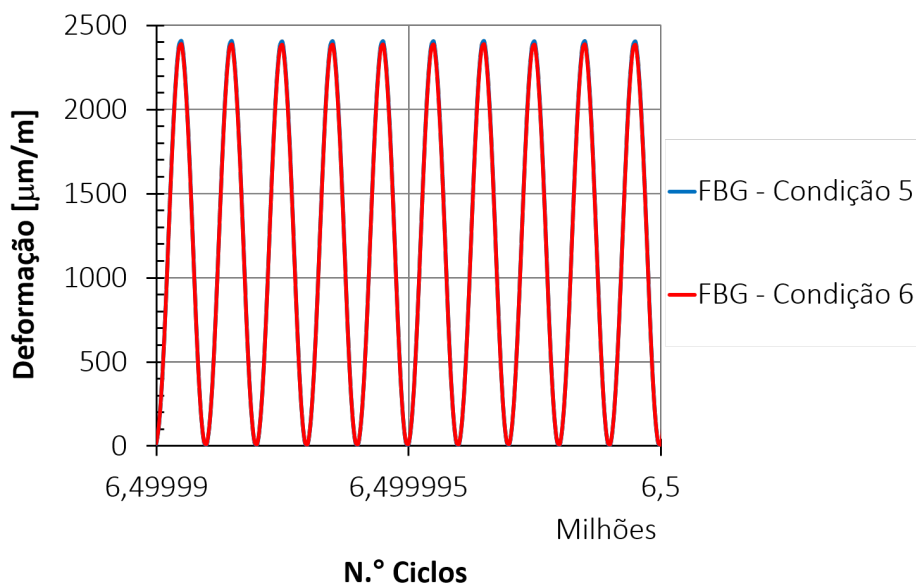


Fonte: (O AUTOR).

É possível observar na Figura 67 que o sensor encapsulado com a Condição 8 de encapsulamento passou a apresentar leituras de amplitude de deformações não condizentes com o carregamento aplicado na amostra, enquanto as Condições 5 e 6 mantiveram-se monitorando corretamente as deformações. A falha apresentada por este sensor é característica de uma perda de adesão do sensor na superfície da amostra, uma vez que o sensor continua apresentando o sinal característico do ensaio, porém com amplitude reduzida, indicando uma perda na transferência das deformações da superfície da amostra para o sensor.

O ensaio prosseguiu por mais 1 milhão de ciclos, totalizando 6,5 milhões de ciclos de ensaio. Na Figura 68, são apresentados os resultados dos dois sensores FBGS restantes (Condições 5 e 6 de encapsulamento). Nesta etapa do ensaio, todos os ERE haviam apresentado perda de sinal, não sendo possível realizar a comparação entre as duas técnicas.

Figura 68 – Valores de deformação obtidos com sensores ópticos após 6,5 milhões de ciclos.



Fonte: (O AUTOR).

Os sensores das Condições 5 e 6, que foram as condições de encapsulamento com resina epóxi diretamente na amostra suportaram 6,5 milhões de ciclos de carregamento sem apresentar perda de sinal ou qualquer tipo de problema de medição. Os dois sensores terminaram o teste apresentando resultados bem semelhantes, sendo a amplitude média de deformação do sensor encapsulado com a Condição 5 após 6,5 milhões de ciclos de 2.395 µm/m e da Condição 6 de 2.374 µm/m.

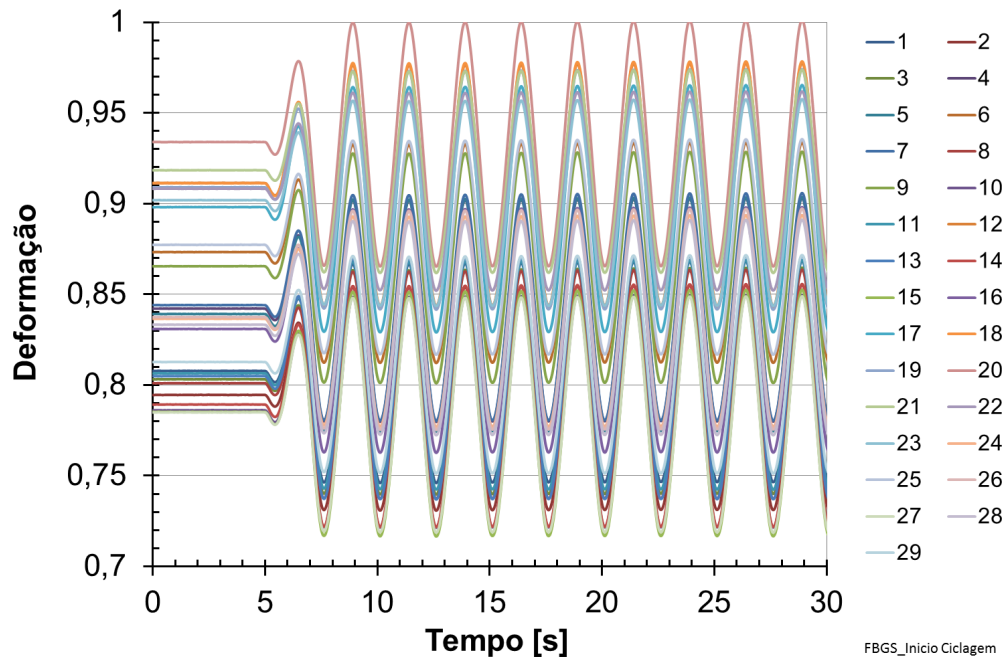
Analisando-se o desempenho dinâmico dos sensores desenvolvidos pode-se perceber que os sensores produzidos com resina epóxi e encapsulados diretamente na superfície da amostra (Condições 5 e 6) foram os que apresentaram os melhores resultados, suportando 6,5 milhões de ciclos de ensaio. Os sensores produzidos com resina epóxi e com encapsulamento prévio (Condições 7 e 8) apresentaram um desempenho levemente inferior, sendo que no sensor encapsulado com a Condição 7 ocorreu falha de medição após aproximadamente 1,350 milhões de ciclos e o sensor encapsulado com a Condição 8 apresentou problema de medição após aproximadamente 5,5 milhões de ciclos.

4.3 APLICAÇÃO DOS SENSORES EM ESTRUTURAS *OFFSHORE*

4.3.1 Instrumentação da amadura de tração de um duto flexível submetido a ensaio de fadiga em escala real

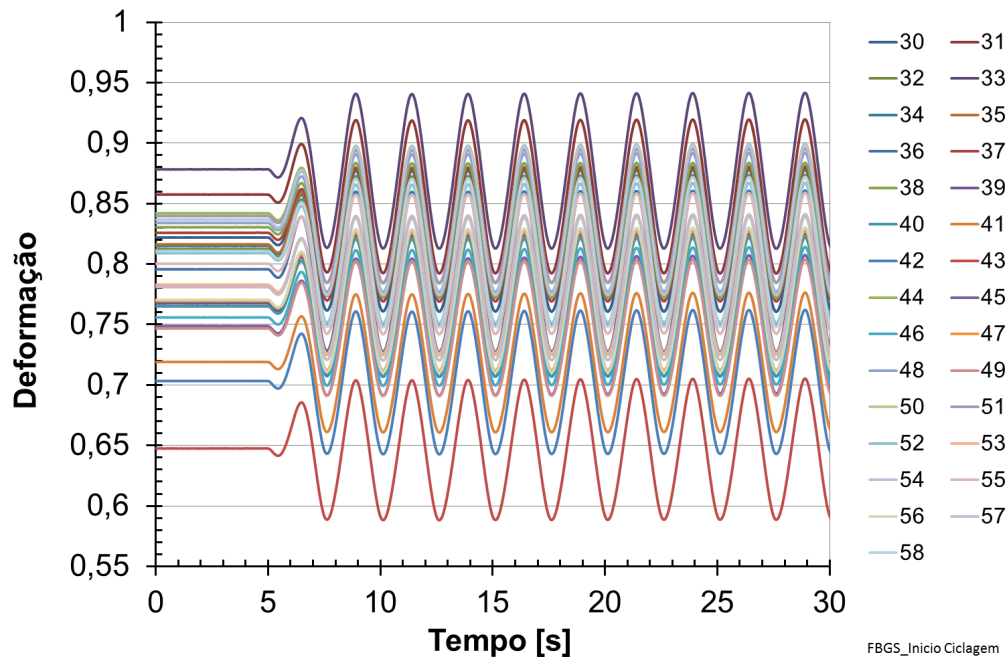
Os resultados obtidos na aplicação prática do sistema de monitoramento em uma amostra de duto flexível são apresentados a seguir. Devido ao caráter confidencial dos resultados do ensaio, os valores de deformação aqui apresentados são valores normalizados. A Figura 69 apresenta os resultados obtidos no início da ciclagem para os sensores FBGS instrumentados nos arames 1 ao 29, enquanto a Figura 70 apresenta os resultados dos sensores FBGS para os arames 30 ao 58.

Figura 69 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os sensores FBGS para os arames 1 ao 29.



Fonte: (O AUTOR).

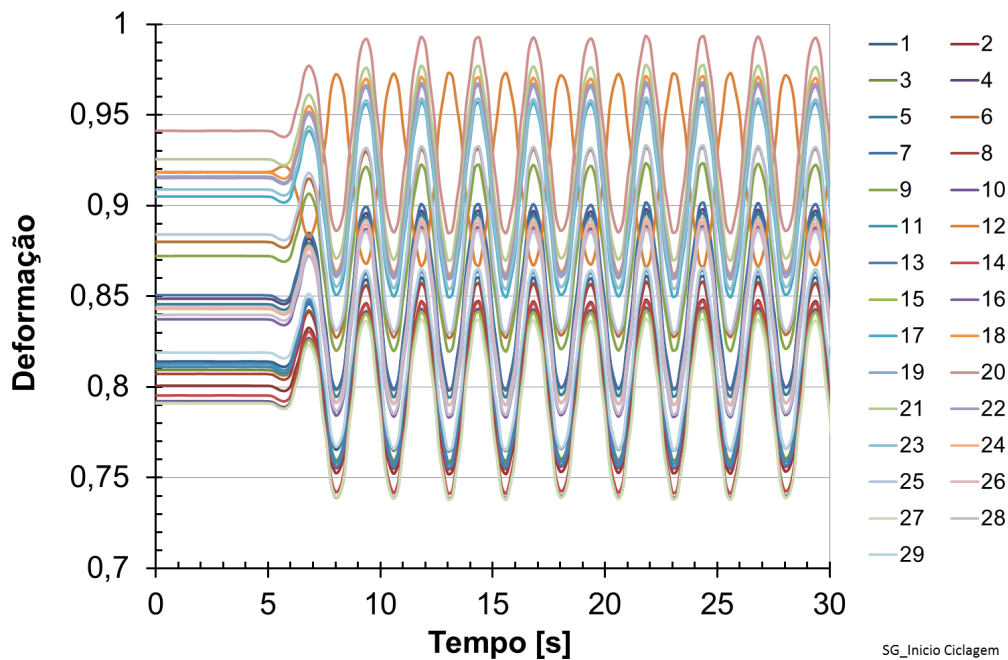
Figura 70 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os sensores FBGS para os arames 30 ao 58.



Fonte: (O AUTOR).

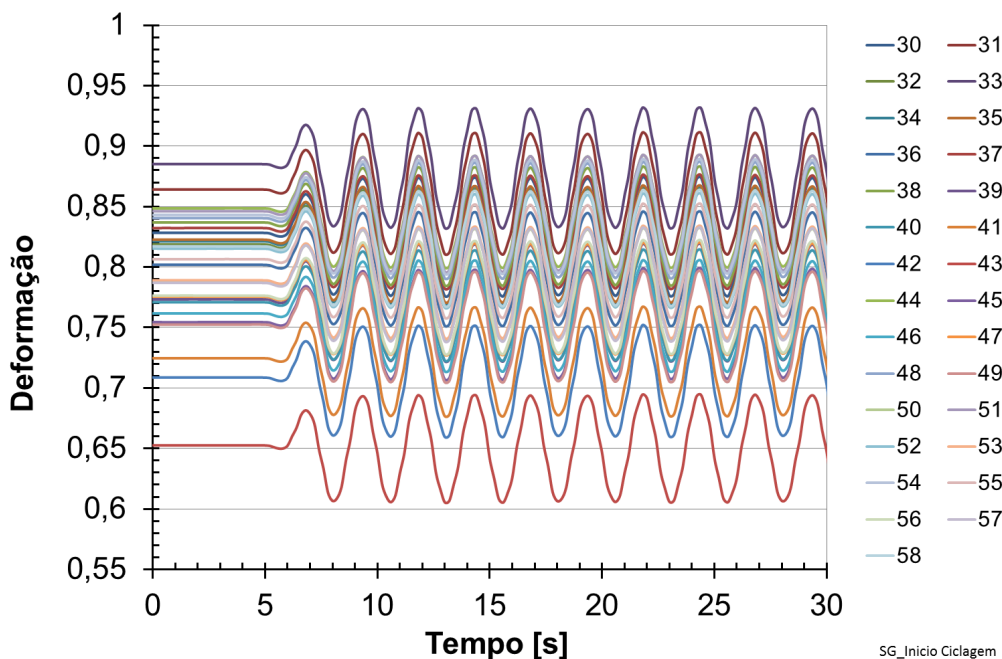
As Figuras 71 e 72 apresentam os mesmos gráficos mostrados nas figuras anteriores, porém com os resultados da técnica de extensometria de resistência elétrica.

Figura 71 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os ERE's para os arames 1 ao 29.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 72 – Valores de deformação para o período inicial de um dos ciclos de fadiga. Resultados obtidos com os ERE's para os arames 30 ao 58.

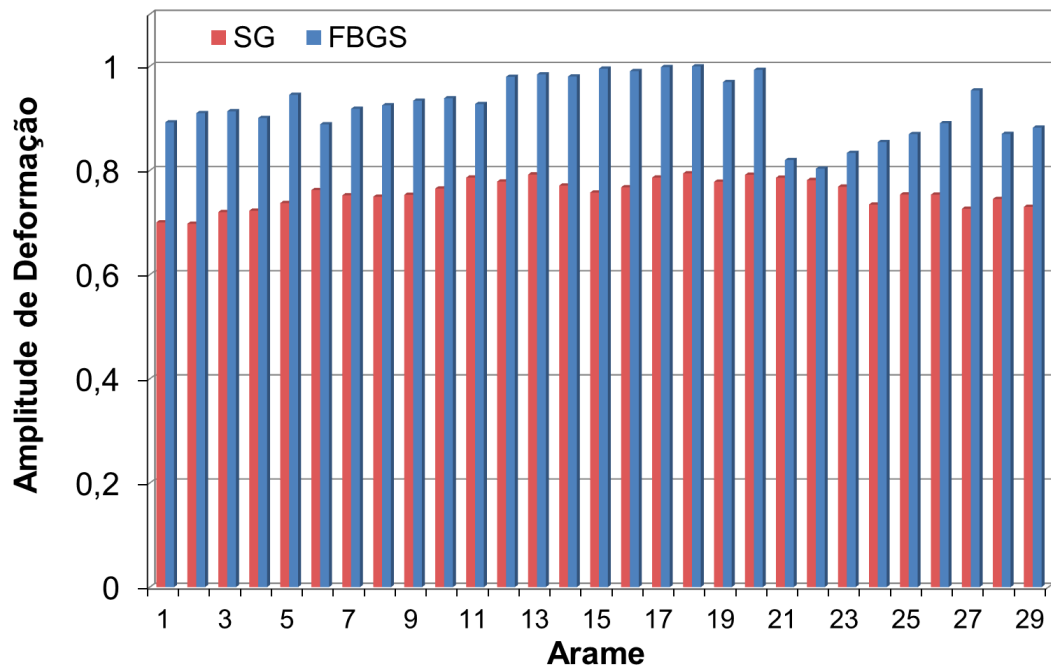


Fonte: (O AUTOR).

Para o início do ensaio o carregamento foi elevado até uma carga pré-determinada e depois estabilizado, o que explica os patamares horizontais observados no início dos gráficos das Figuras 69 a 72. Após a estabilização do carregamento foi iniciada a ciclagem com amplitude e frequência estabelecidas pelo procedimento de ensaio. É possível observar nas Figuras 69 a 72 que tanto os sensores FBGS quanto os extensômetros de resistência elétrica obtiveram sucesso no monitoramento da ciclagem do ensaio, apresentando resultados em fase, exceto por um arame no monitoramento com ERE que apresentou uma medição fora de fase com os demais. Esse resultado fora de fase pode significar que este arame já se encontrava rompido no início deste monitoramento.

A partir dos dados obtidos com os sensores ópticos e com os sensores de resistência elétrica, foi possível realizar uma comparação entre as amplitudes medidas por ambas as técnicas. Na Figura 73 é apresentado um gráfico de barras com a comparação entre os valores de amplitude medidos com FBGS e com ERE para os arames 1 a 29.

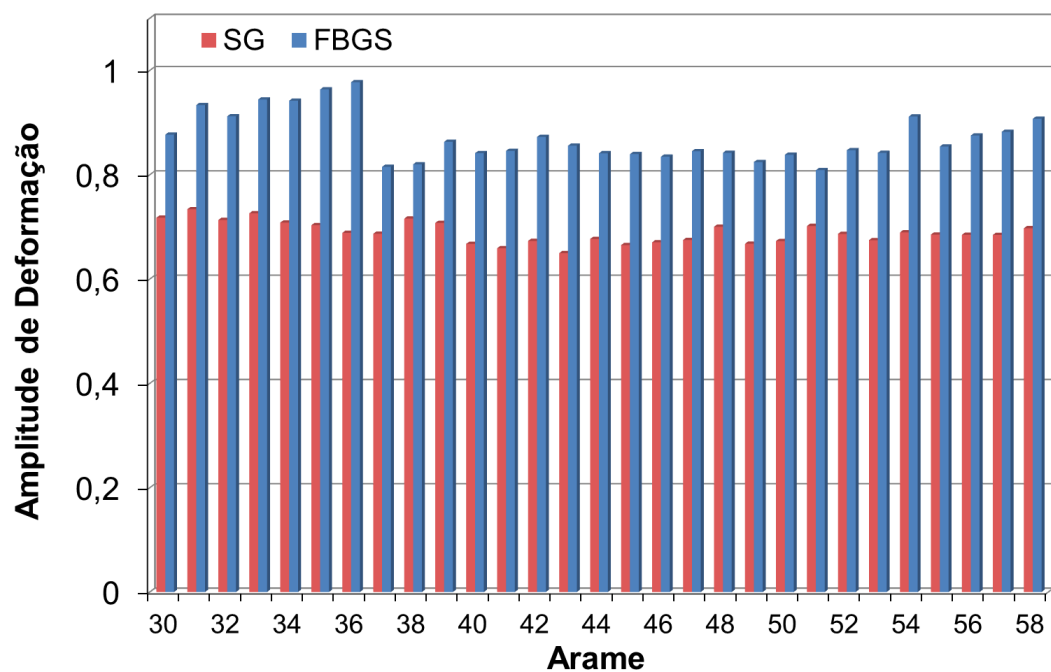
Figura 73 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para os arames 1 a 29.



Fonte: (O AUTOR).

Na Figura 74 é apresentada a mesma comparação anterior para o restante dos arames (arames 30 a 58).

Figura 74 – Comparação entre os resultados de deformação obtidos com sensores do tipo FBGS e ERE para os arames 30 a 58.



Fonte: (O AUTOR).

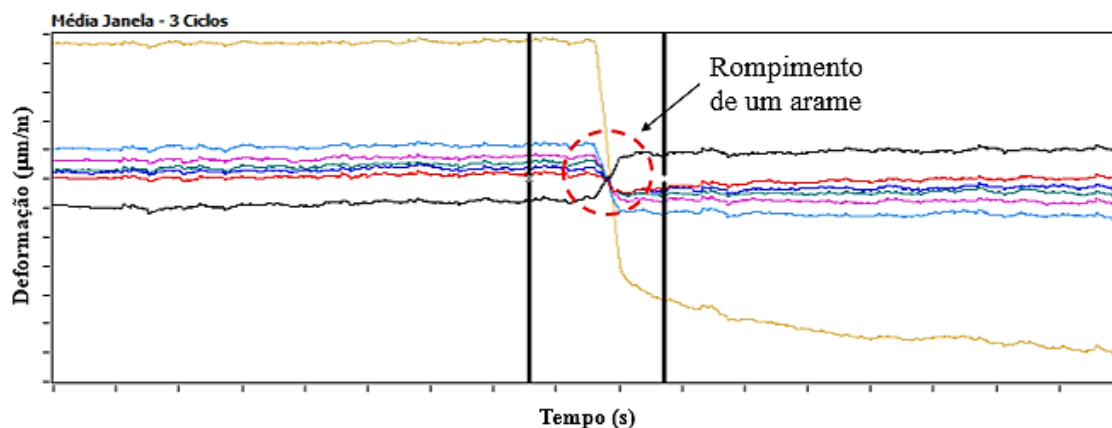
Analisando os gráficos das Figuras 73 e 74 é possível notar que os sensores FBGS apresentaram, para todos os arames, valores acima dos obtidos por extensometria de resistência elétrica, sendo que a diferença percentual média entre as técnicas foi de aproximadamente 19%. A menor diferença percentual foi observada no arame 22, sendo essa diferença de 3% e a maior diferença foi encontrada no arame 36, com diferença de 29%.

Não foi possível determinar com certeza qual a causa das diferenças de resultados obtidos com as diferentes técnicas de medição, sobretudo pelo fato dessa diferença variar ao longo da direção circunferencial. Uma hipótese é a de que esteja ocorrendo problemas de leitura dos sensores, nesse caso, mais provavelmente com os sensores do tipo FBGS. Uma segunda hipótese é a de que a distribuição de tensão não é homogênea em todo o comprimento do arame exposto na região da janela de instrumentação e que essa diferença varie de arame para arame dependendo do efeito cabrestante e da interação de cada arame com os arames vizinhos. No caso da segunda hipótese ser real, as diferenças poderiam ser justificadas devido ao fato de que os diferentes tipos de sensores foram instalados em posições diferentes do arame em relação a janela de instrumentação, como mostrado na Figura 26. Os sensores do tipo ERE foram instalados no centro da janela de instrumentação enquanto que os FBGS foram instalados numa distância intermediária entre o centro da janela e uma das extremidades. Outra hipótese avaliada leva em conta a suspeita de já haver um arame rompido no início do carregamento, fazendo com que ocorra o efeito *spring back*.

Outro fator que de alguma maneira pode colaborar para esta diferença nos valores é o comprimento ativo de cada sensor utilizado. O sensor FBGS tem um comprimento ativo de 10 mm, enquanto que o extensômetro de resistência elétrica apresenta um comprimento ativo de 3 mm. Como a deformação medida pelos sensores é uma média da deformação da área em que os sensores estão colados, a diferença de comprimento ativo dos sensores pode influenciar nos valores encontrados por cada uma das técnicas. Alguns fatores de menor relevância também podem ser citados como fonte desta diferença de resultados encontrados entre as duas técnicas monitoradas, como o erro associado a cada uma das técnicas e o alinhamento dos sensores durante a etapa de instrumentação.

Durante o andamento do ensaio alguns sensores apresentaram problemas de medição e perda de sinal. Os sensores que resistiram até o final do ensaio mostraram-se aptos a detectar o momento da ruptura de arames do duto flexível, como mostra a Figura 75.

Figura 75 – Instante da ruptura de um arame do duto flexível.



Fonte: (O AUTOR).

A ruptura do arame é percebida na Figura 75 através de uma mudança súbita nos valores de deformação medidos em cada um dos sensores. Com o rompimento de um arame na estrutura acontece uma redistribuição dos carregamentos nos demais arames, alterando o perfil de deformação anterior dos sensores.

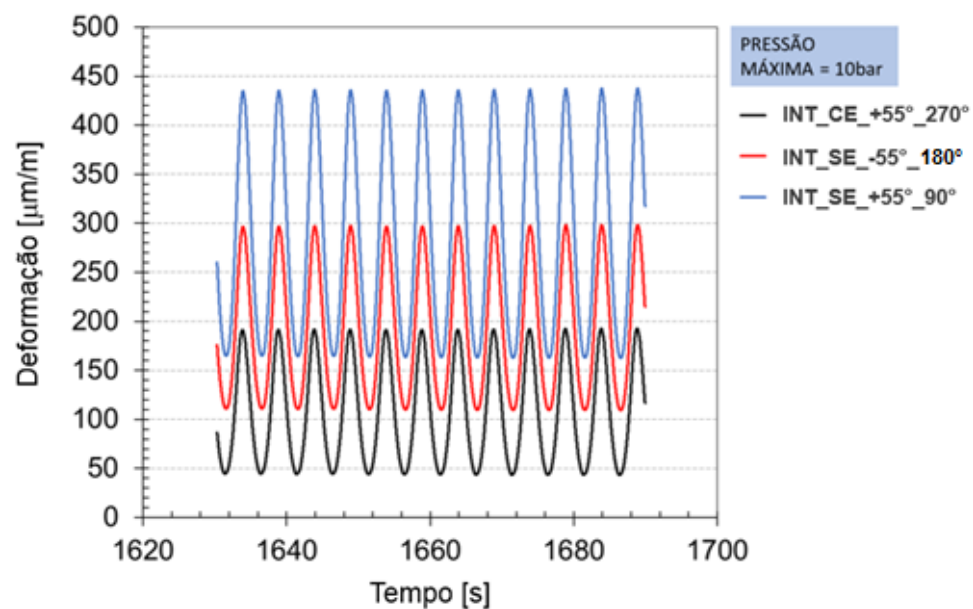
Maiores estudos ainda são necessários a fim de evitar que aconteça a perda de sensores durante o ensaio e também para aumentar a sensibilidade na detecção da ruptura dos arames, entretanto, os sensores desenvolvidos mostraram-se capazes de monitorar as deformações nos arames do duto flexível e detectar o momento de ruptura de algum arame.

4.3.2 Instrumentação de uma amostra de material compósito com sensores de fibra óptica embebidos na estrutura

A maior parte dos sensores de fibra óptica que foram embebidos na resina acabaram apresentando perda de sinal devido aos esforços causados pelo processo de *filament winding* utilizado na produção do tubo laminado, que acabou quebrando as fibras embebidas no material. Ao final do processo, apenas três sensores puderam ser utilizados para monitoramento das deformações durante os testes com pressão interna, dois destes sem encapsulamento, posicionados a 90° e 180°, e um com encapsulamento, posicionado a 270°. As deformações para esses sensores são apresentadas nos gráficos das Figuras 76 a 80, para carregamentos ciclos de pressões de 10, 30, 50, 70 e 80 bar, respectivamente. A nomenclatura utilizada na legenda dos gráficos seguintes é:

- INT_CE_+55°_270° - sensor FBGS com encapsulamento embebido na resina na direção de enrolamento +55° na posição circunferencial de 270°;
- INT_SE_-55°_180° - sensor FBGS sem encapsulamento embebido na resina na direção de enrolamento -55° na posição circunferencial de 180°;
- INT_SE_+55°_90° - sensor FBGS sem encapsulamento embebido na resina na direção de enrolamento +55° na posição circunferencial de 90°.

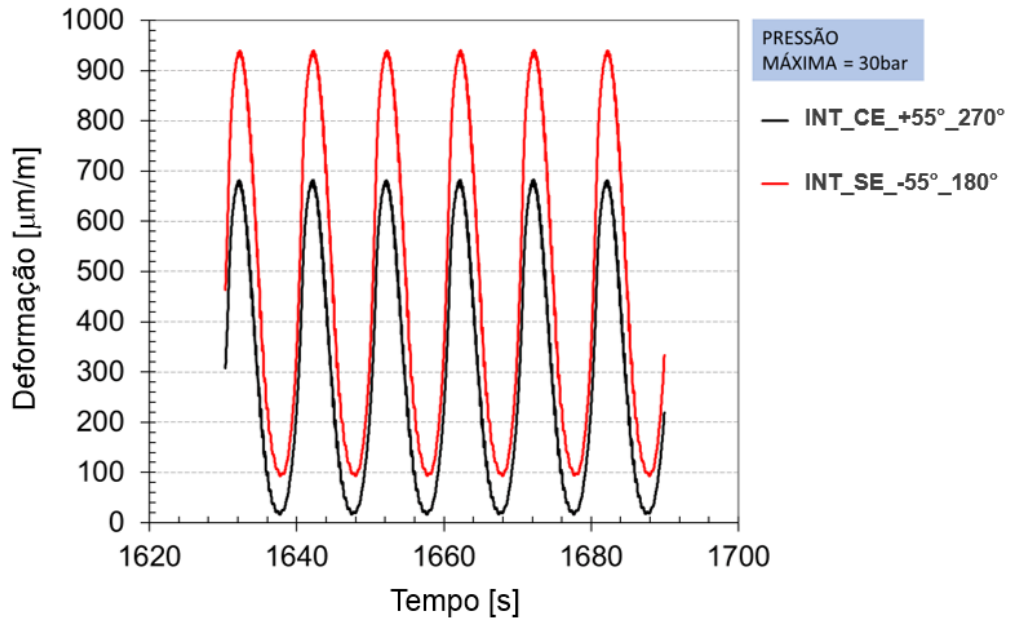
Figura 76 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 10 bar.



Fonte: (O AUTOR).

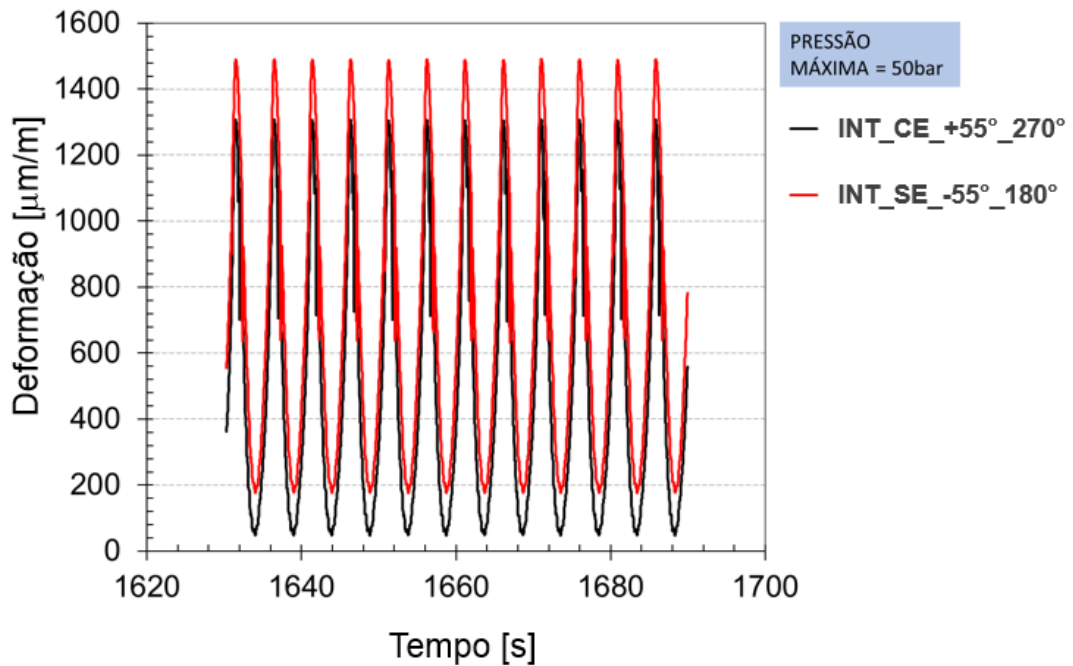
Durante a aplicação do carregamento cíclico com pressões entre 0 e 10 bar, os três sensores embebidos mantiveram-se funcionais. Quando o carregamento foi alterado para pressão cíclica entre 0 e 30 bar, o sensor INT_SE_+55°_90° apresentou defeito e parou de medir, sendo assim, os próximos gráficos irão mostrar apenas os resultados dos outros dois sensores.

Figura 77 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 30 bar.



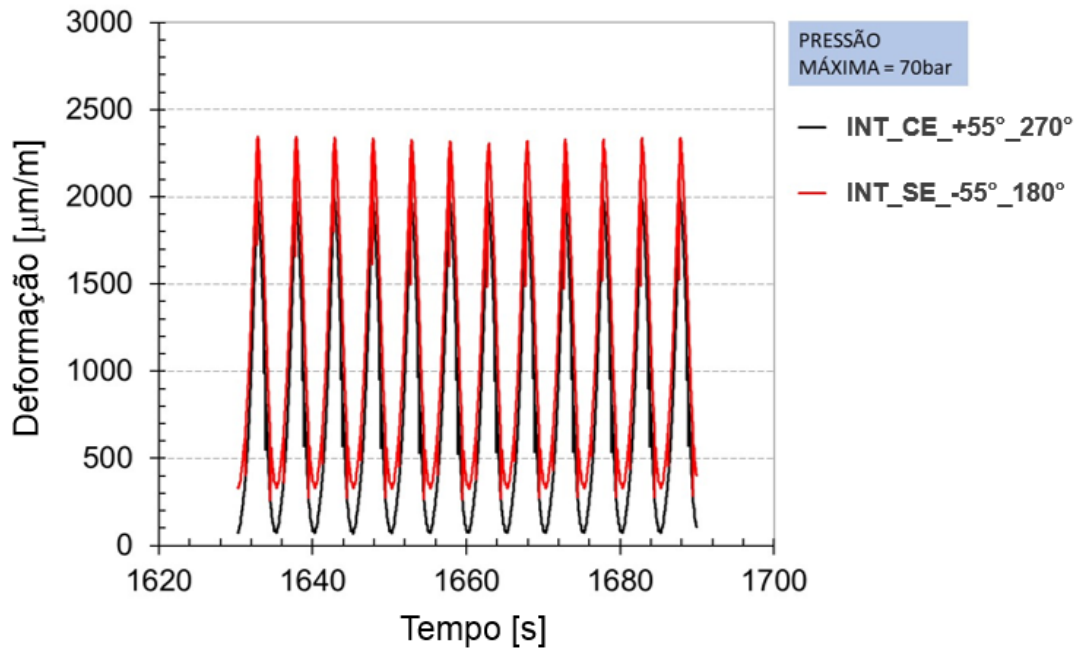
Fonte: (O AUTOR).

Figura 78 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 50 bar.



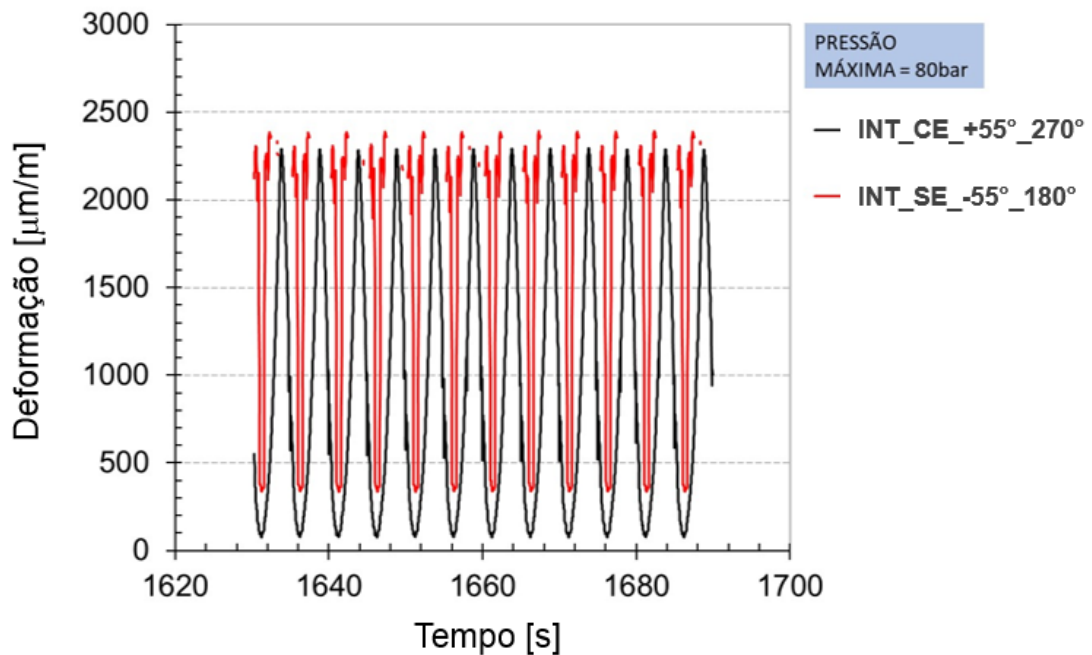
Fonte: (O AUTOR).

Figura 79 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 70 bar.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 80 – Valores de deformação obtidos com FBGS embebidos na resina para ciclo de carregamento dinâmico com pressão máxima de 80 bar.



Fonte: (O AUTOR).

O procedimento utilizado para a instrumentação com FBGS embebidos na resina, inseridos no interior da parede do tubo entre o *liner* e a camada estrutural, mostrou-se adequado do ponto

de vista de atingir os objetivos de realizar a instalação dos sensores durante o processo de produção e com a retirada das fibras pela direção radial do tubo. Este foi o primeiro tubo produzido no Brasil com sensores de fibra óptica embebidos na resina durante o processo de produção em ambiente fabril. No entanto, o procedimento mostrou-se ineficiente, pois acabou resultando na perda da maior parte dos sensores. De um total de 16 sensores distribuídos em 4 cadeias de sensores, apenas 3 sensores apresentaram sinal após o processo de fabricação da amostra. Isso denota que o procedimento utilizado não foi adequado pois não foi prevista uma proteção apropriada dos sensores para resistir às solicitações mecânicas impostas pelos tramos de fibra de vidro durante o processo de *filament winding*. Talvez o dano não tenha ocorrido em todos os sensores que não apresentaram sinal, uma vez que se um sensor da cadeia for danificado pode ocorrer a perda de todos os outros sensores em série nesta cadeia. Uma solução possível seria a aplicação de um véu com resina sobre os sensores e aguardar a cura parcial desta resina antes de prosseguir com a produção da camada estrutural do tubo. No entanto, isso resultaria na necessidade de uma avaliação mais aprofundada das implicações oriundas da interação do sensor e proteção do sensor com o *liner* e com a camada estrutural.

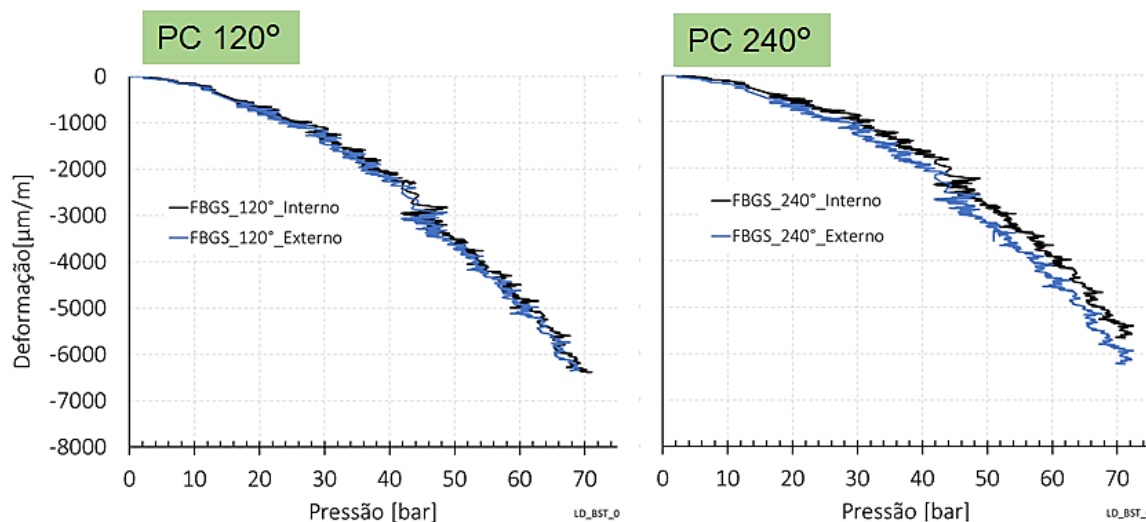
De uma maneira geral, foi possível verificar uma variação significativa dos valores de deformação ao longo da posição circunferencial do tubo. Essa diferença é mantida praticamente constante com a variação da pressão interna. Dos três sensores FBGS embebidos na resina e que apresentavam sinal no início do ensaio, um era com encapsulamento e dois sem encapsulamento. Um dos sensores sem encapsulamento apresentou perda de sinal durante a transição de pressão de 10 bar para 30 bar. O restante dos sensores permitiu o monitoramento até pressão da ordem de 70 bar.

4.3.3 Instrumentação de amostras de tubo de PRFV para ensaio de explosão

A seguir são apresentados os resultados obtidos no ensaio de explosão da amostra LD_BST_01. A cadeia de sensores instalada internamente no Lado A da amostra foi danificada durante o processo de tamponamento e acabou apresentando falha no sinal, não sendo possível obter resultados destes sensores. Desta forma, foi possível obter resultados de medidas internas apenas para o Lado B. Além disso, o sensor posicionado em 0° na parede externa no Lado B apresentou problema durante a instrumentação e não pode ser monitorado, ficando assim apenas 2 sensores externos no Lado B.

A Figura 81 apresenta a comparação entre as medições realizadas com os sensores FBGS internos e externos instalados na amostra no Lado B, nas posições circunferenciais de 120 e 240°.

Figura 81 – Comparação entre os sensores FBGS internos e externos para as posições circunferenciais de 120° (esquerda) e 240° (direita) da amostra LD_BST_01.

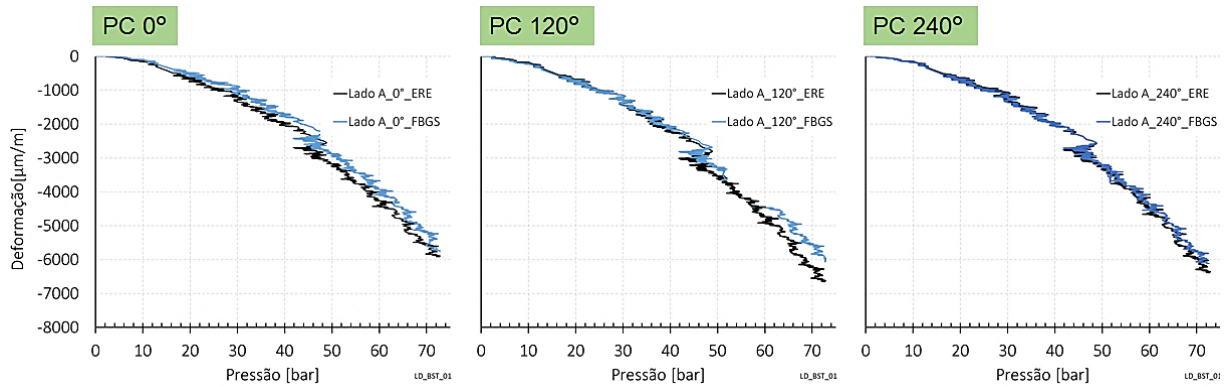


Fonte: (O AUTOR).

Os sensores ópticos suportaram pressões da ordem de 70 bar, chegando a níveis de deformações próximos de 6.500 μm/m. Os resultados não mostram diferenças significativas entre os valores de deformação na parede externa e na parede interna do tubo. Esse resultado torna-se promissor para o monitoramento de ensaios de longa duração, onde espera-se uma degradação mais acelerada na parede interna no tubo compósito, podendo essa degradação interna ser detectada através da diferença de comportamento entre os sensores internos e os sensores externos. A característica do sensor óptico de ser inerte na presença de água torna-se uma vantagem para essa aplicação, sendo possível o monitoramento de uma região onde seria complicado o uso de sensores elétricos.

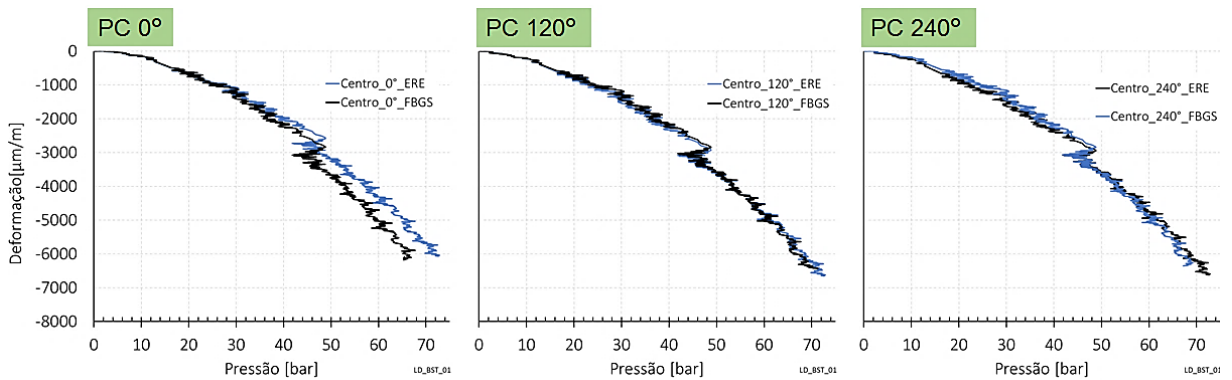
Nas Figuras 82, 83 e 84 são apresentados os gráficos com as comparações entre os valores obtidos com os sensores externos ópticos e elétricos na amostra LD_BST_01, para o lado A, centro e lado B, respectivamente.

Figura 82 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o lado A da amostra LD_BST_01.



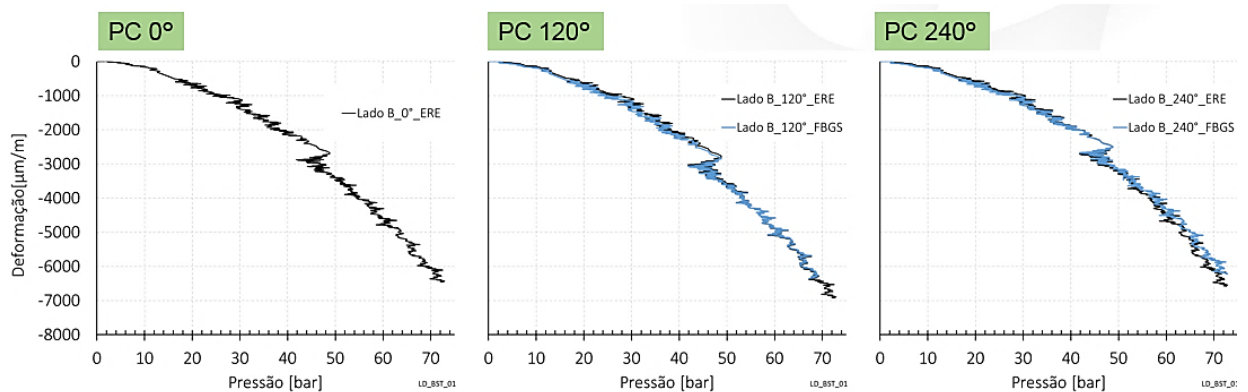
Fonte: (O AUTOR).

Figura 83 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o centro da amostra LD_BST_01.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 84 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o lado B da amostra LD_BST_01.



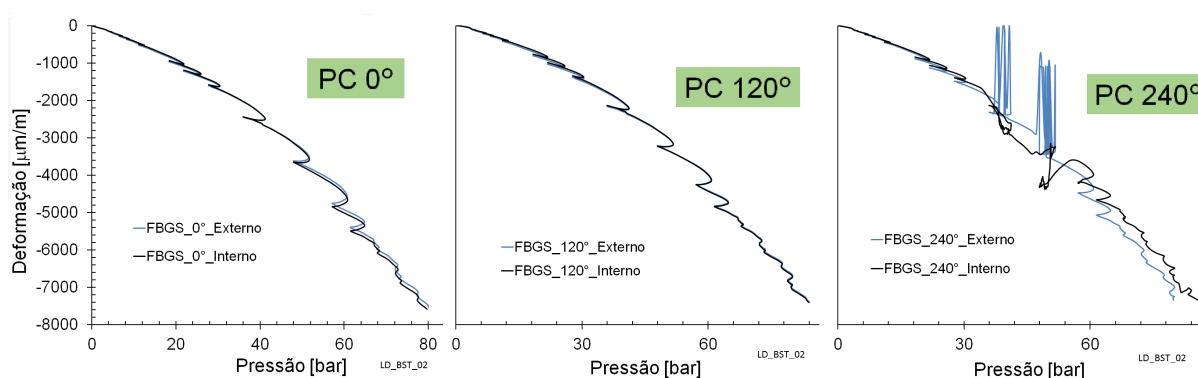
Fonte: (O AUTOR).

A comparação entre os sensores de fibra óptica e os ERE mostra que os valores encontrados por ambas as técnicas se encontram próximos para todos os pontos de medição realizados. É

possível verificar que existe uma correlação muito boa entre os resultados obtidos com as diferentes técnicas. O respaldo da técnica de FGBS pela consagrada técnica de ERE permite vislumbrar a utilização dos sensores ópticos como uma ótima opção para o monitoramento de vasos de pressão em campo, dada a série de vantagens intrínsecas a este tipo de tecnologia, citadas na revisão da literatura deste trabalho. Embora o range de medição dos sensores ópticos seja bem inferior ao dos ERE, a tecnologia óptica permitiu o monitoramento de deformações até um nível de pressão consideravelmente alto, em torno de 70 bar. Os sensores FGBS conseguiram detectar o possível início de falha do componente, indicado pela queda repentina de pressão ocorrida próximo a 48 bar. Na Figura 84, o gráfico da esquerda, que representa a posição circunferencial de 0° não mostra as medições com o sensor FGBS pois foi o sensor que apresentou problemas durante a instrumentação da amostra.

A seguir são apresentados os resultados obtidos no ensaio de explosão da amostra LD_BST_02. Na Figura 85 são apresentados os resultados obtidos na comparação entre os sensores FGBS internos e externos instrumentados no lado A da amostra.

Figura 85 – Comparação entre os sensores FGBS internos e externos para as posições circunferencial de 0° (esquerda), 120° (centro) e 240° (direita) da amostra LD_BST_02.



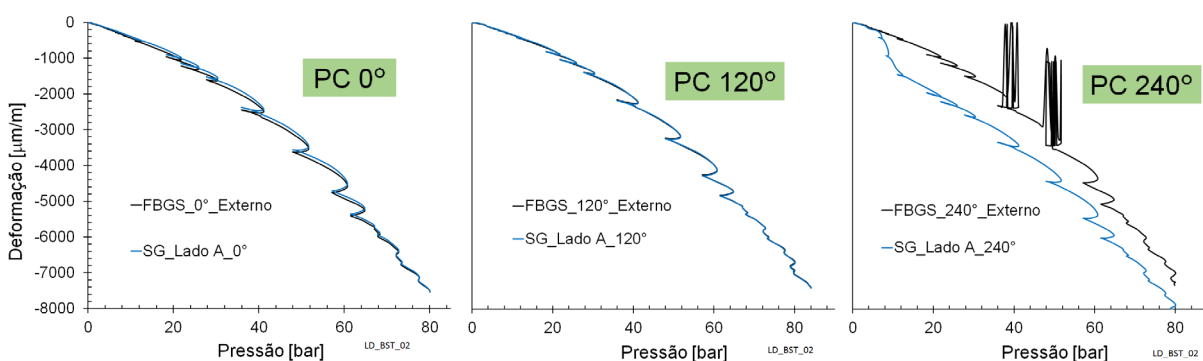
Fonte: (O AUTOR).

Os resultados obtidos não mostram diferenças significativas entre os valores de deformação na parede externa e na parede interna do tubo para os sensores das posições circunferências de 0° e 120° da amostra LD_BST_02. Os sensores internos e externos apresentaram comportamento semelhante durante a realização do ensaio, chegando a níveis de pressão da ordem de 80 bar e suportando deformações próximas de $7.400 \mu\text{m/m}$. Na posição circunferencial PC 240° tanto o sensor interno quanto o sensor externo apresentam ruídos e um comportamento anormal após a pressão de 35 bar, mantendo-se até o final do ensaio com uma diferença significativa de valores entre si. Um estudo mais aprofundado é necessário para

certificar se esses resultados obtidos foram devido a problemas dos sensores ou alguma falha na amostra localizado na região da posição circunferencial de 240°.

A Figura 86 apresenta em forma de gráfico de deformação em função da pressão os resultados comparativos entre as técnicas óptica e elétrica para a amostra LD_BST_02.

Figura 86 – Comparação entre as técnicas óptica e elétrica para o lado A da amostra LD_BST_02.



Fonte: (O AUTOR).

Os gráficos mostram uma excelente correlação entre as técnicas para as posições circunferenciais de 0° e 120°. As duas técnicas apresentam comportamentos semelhantes entre si, com os sensores ópticos suportando um carregamento superior a 80 bar e alcançando limites de deformação próximos de 7.400 µm/m. Assim como já visto nos sensores ópticos da posição circunferencial de 240° na Figura 85, o ERE instrumentado nesta posição também apresentou uma variação anormal no sinal de medição, fortalecendo então a hipótese de que a amostra poderia apresentar alguma falha localizada nesta posição.

A utilização dos sensores FBGS produzidos neste trabalho mostrou-se satisfatória para a aplicação em tubos compósitos de polímero reforçado com fibra de vidro. Os sensores foram utilizados no monitoramento de ensaios de explosão das amostras de tubos de PRFV apresentando resultados aceitáveis quando comparados aos resultados obtidos com os sensores elétricos.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

4.4.1 Comparativo entre o *software* desenvolvido e o *software* comercial

A seguir são apresentados os resultados obtidos na comparação entre o *software* desenvolvido e o *software* comercial, usando como parâmetro os valores obtidos com o extensômetro de resistência elétrica.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de deformação obtidos com os três sensores instrumentados na amostra, bem como o erro associado a cada um dos sensores FBGS quando comparados com a técnica de extensometria de resistência elétrica.

Tabela 5 – Resultados de deformação encontrados com os sensores FBGS e o ERE.

Pressão [bar]	ERE	<i>Software LAMEF</i>		<i>Software Comercial</i>	
	Deformação [$\mu\text{m/m}$]	Deformação [$\mu\text{m/m}$]	Erro [%]	Deformação [$\mu\text{m/m}$]	Erro [%]
0	0	0	-	0	-
0,2	112,17	112,25	-0,82	112,3	0,12
0,5	274,27	273,6	-0,24	274,9	0,23
0,8	405,03	405,2	0,04	406,2	0,29
1,1	568,03	570,07	0,36	570,1	0,36
1,3	666,32	670,9	0,69	668,84	0,38
1,4	759,68	765,8	0,81	764,3	0,61
1,6	834,02	840,15	0,73	841,27	0,87
1,7	907,68	915,6	0,87	915,6	0,87
1,9	977,09	986,9	1,00	986,4	0,95
2,0	1048,51	1058,85	0,99	1059,2	1,02

Fonte: (O AUTOR).

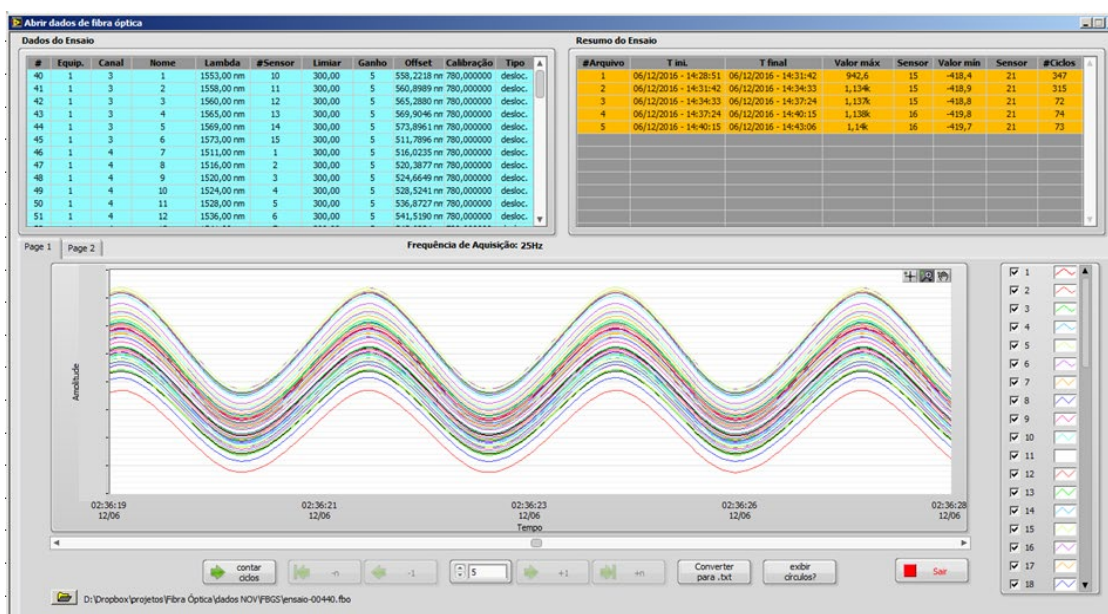
Analisando-se a Tabela 5 percebe-se que os valores obtidos com os sensores FBGS ficaram muito próximos aos valores encontrados com o ERE, tanto nas medidas realizadas com o *software* comercial, quanto nas medidas realizadas com o *software* desenvolvido no laboratório. A diferença máxima entre os valores obtidos com o extensômetro de resistência elétrica e os sensores FBGS não foi superior a 1% para valores de deformação de até aproximadamente 1.050 $\mu\text{m/m}$, para ambos *softwares* utilizados. Os valores estão coerentes para todos os patamares de pressão. As diferenças apresentadas nas medidas podem estar relacionadas à instrumentação da amostra, podendo haver alguma diferença no posicionamento dos sensores, bem como ao erro associado a cada técnica de medição. Portanto, os valores obtidos com o

software desenvolvido mostram que o mesmo apresenta bom funcionamento, podendo ser utilizado no monitoramento de sensores FBGS.

4.4.2 Aplicação prática do *software* desenvolvido

O funcionamento do *software* desenvolvido neste trabalho é mostrado a seguir. O *software* foi utilizado no monitoramento do ensaio de fadiga em escala real do segmento de duto flexível. A Figura 87 apresenta o ambiente do *software* onde é possível fazer a visualização dos dados antes de convertê-los para a realização do pós-processamento.

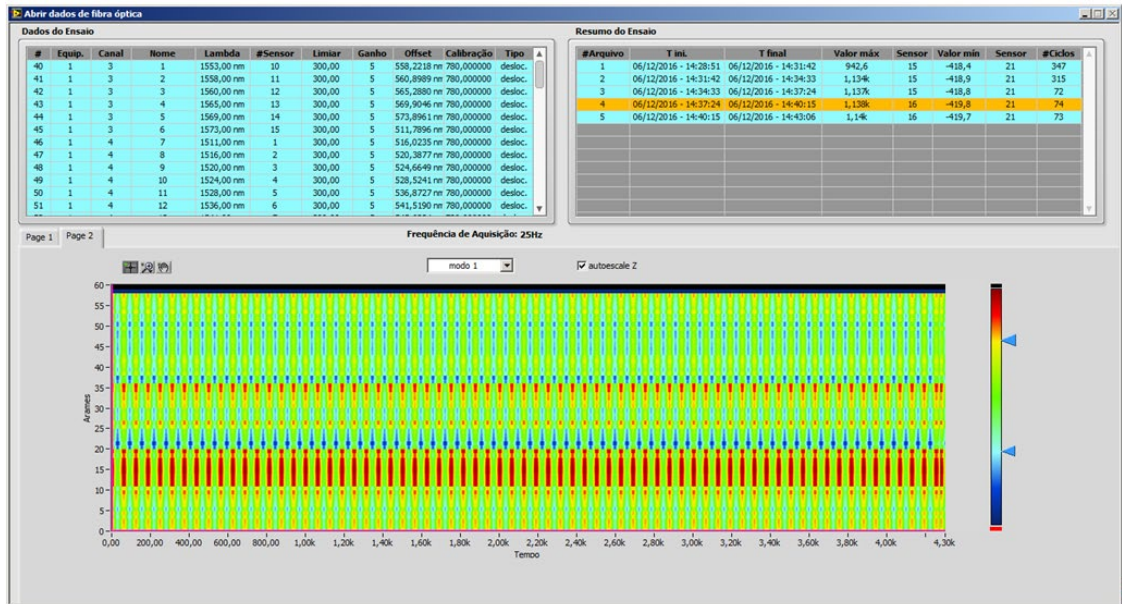
Figura 87 – Exibição dos dados na forma de amplitude.



Fonte: (O AUTOR).

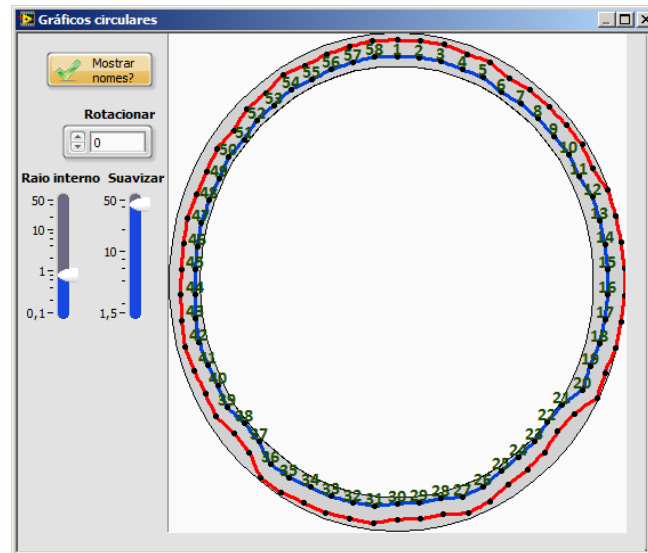
Este ambiente apresenta todos os dados salvos do ensaio, como o nome e o canal de cada sensor, o ganho utilizado, a calibração e os offsets utilizados. Nesta tela é possível fazer a escolha de quais arquivos se quer visualizar e ainda a seleção de quais sensores exibir. Ainda nesta mesma tela é possível realizar a visualização dos dados na forma de gráficos de intensidade (Figura 88) e na forma de gráficos circulares que apresentam os valores máximos e mínimos para cada arame no período de tempo selecionado para exibição (Figura 89).

Figura 88 – Exibição dos dados na forma de intensidade.



Fonte: (O AUTOR).

Figura 89 – Exibição do círculo de máximo e mínimo.



Fonte: (O AUTOR).

A exibição dos dados nos gráficos circulares proporciona um panorama geral do ensaio de forma simples e de fácil avaliação. Este ambiente do *software* possibilita uma forma rápida de fazer a análise prévia dos resultados obtidos durante o ensaio antes de realizar o pós-processamento. O *software* desenvolvido permitiu uma maior flexibilidade na configuração dos parâmetros do ensaio, facilitando no ajuste inicial do ensaio.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma investigação sobre o potencial de aplicação dos sensores ópticos do tipo rede de Bragg para a avaliação de integridade estrutural de estruturas de engenharia, sendo avaliada a confiabilidade dos resultados obtidos com a técnica e a possibilidade de customização dos sensores e *software* de aquisição para atender demandas específicas.

A metodologia utilizada para a construção e qualificação dos sensores e o *software* desenvolvido permitiram a aplicação da tecnologia de sensoriamento óptico para monitoramento de ambas aplicações investigadas neste trabalho.

Através da comparação dos resultados dos sensores FBG com os resultados dos extensômetros elétricos foi possível avaliar a confiabilidade dos resultados de medição dos FBGS desenvolvidos. O estudo revelou que as diferentes configurações de construção e instalação dos sensores influenciam diretamente na confiabilidade dos valores medidos, na resistência em altas deformações e na vida em fadiga dos sensores.

Através da análise dos desempenhos estático e dinâmico foi possível definir a melhor configuração para a produção dos sensores FBG encapsulados, sendo que, dentre as condições avaliadas neste estudo, a configuração que apresentou melhores resultados foi a proteção com resina epóxi realizada na amostra com utilização de um substrato de poliimida.

Os sensores ópticos desenvolvidos mostraram-se aptos para serem utilizados no monitoramento dos componentes da indústria do petróleo e gás avaliados neste trabalho. No ensaio de fadiga do segmento de duto flexível foi possível determinar o momento em que ocorreu a ruptura de um arame da armadura de tração.

A instalação de sensores FBG embebidos na estrutura de um duto de material compósito durante o processo de fabricação mostrou-se viável. São necessárias maiores investigações para o aperfeiçoamento do procedimento de inserção dos sensores durante o processo de *filament winding*.

O *software* desenvolvido para aquisição de dados e monitoramento de ensaio possibilitou autonomia para o usuário, permitindo uma maior flexibilidade na configuração dos parâmetros iniciais de ensaio.

6 TRABALHOS FUTUROS

A continuidade deste assunto é de grande importância e será dada através de mais estudos e ensaios com a finalidade de aperfeiçoar o desenvolvimento dos sensores ópticos e aumentar as possibilidades de aplicações da tecnologia destes sensores. Com base nos resultados obtidos nesse estudo, propõe-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Aumentar a amostragem e analisar os desempenhos estáticos e dinâmicos de sensores encapsulados com diferentes tipos de resina;
- Avaliar a influência do comprimento ativo do sensor no comportamento dos FBGS em seu desempenho estático e dinâmico;
- Aprofundar a análise da vida em fadiga dos sensores através de um maior número de ensaios com diferentes amplitudes de carregamento;
- Avaliar o comportamento do sensor quando instalado em uma geometria semelhante ao arame de duto flexível para analisar a influência de esforços laterais no sinal do sensor;
- Otimizar o procedimento de instalação dos sensores FBG durante o processo de *filament wilding*, para a produção de tubos inteligentes instrumentados.

7 REFERÊNCIAS

Acervo HBM. **Interrogadores ópticos FS22DI: con frecuencia de adquisición más alta y sincronización temporal.** Disponível em: < <https://www.hbm.com/es/6933/interrogador-optico-fs22-di-con-caracteristicas-mejoradas/>> Acesso em 31 de Outubro de 2017.

Acervo MRA Instrumentação. **Fibra ótica – redes de Bragg.** Grupo Álava. Disponível em:<<http://www.mra.pt/industria/produtos/sensores-aquisicao-de-dados-ecalibracao/medicao-com-fibra-optica/fibra-optica---redes-de-bragg/>> Acesso em: 31 de Outubro de 2017.

ANDERSON, D. Z.; MIZRAHI, V.; ERDOGAN, T.; WHITE, A.E. **Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element.** Electron. Lett., v. 29, pp. 566- 568, 1993.

ANSARI, F.; LIBO, Y. **Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors.** Journal of Engineering Mechanics, v. 124, n. 4, pp. 385-394, 1998.

ANSARI, F. **Sensing issues in civil structural health monitoring.** Springer, v. 1, 527 p., 2005.

BAI, Y., BAI, Q. **Subsea pipelines and risers.** Edição 1. Elsevier. 2005.

BARROS, R. E. B. A. **Sistema de interrogação de redes de Bragg: primeiros passos na criação de um protótipo.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

BERTHOLDS, A.; DANDLIKER, R. **High resolution photoelastic pressure sensor using low-birefringence fiber.** Appl. Opt., v. 25, pp. 340-343, 1986.

BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; MALO, B.; VINEBERG, K. A.; HILL, K. O. **Ultraviolet light photosensitivity in Er³⁺-Ge doped optical fiber.** Optics Letters, v. 15, pp. 1138-1147, 1990.

BORGES, M. F. **Correlação numérica-experimental da redução da vida em fadiga de dutos flexíveis operando com anular alagado na presença de CO₂.** Tese de Doutorado: PPGE3M-UFRGS, 2017.

CANNING, J.; SOMMER, K.; ENGLUND, M. **Fibre gratings for high temperature sensor applications.** Measurement Science And Technology, v. 12, pp. 824-828, 2001.

CAPAZ, R. B. **Rede Recíproca – Lei de Bragg.** Física da Matéria Condensada. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Cap. 4, pp. 45-56, Notas de aula, 2016.

CAMPELLO, G. C.; MORIKAWA, S. R. K. **Escotilha para monitoramento e inspeção de riser flexível**. Patente BRPI 1100228A2. Publicada em 14 de maio de 2013.

CARVALHO, E. A.; DUARTE, E. T. V. **Ensaio de Flexão: uma revisão dos modelos matemáticos empregados em sua análise**. Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, n. 14. São Pedro, SP, 2000.

CARVALHO, M. de C. **Redes de Bragg em fibras ópticas poliméricas (FOP)**. Tese de Doutorado, Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2010.

CHENG, C. C.; LO, Y. L.; LI, W. Y. **Accurate simulations of reflective wavelength spectrum of surface-bonded fiber Bragg grating**. Applied Optics, v. 49, n. 17, pp. 3394-3402, 2010.

CHENG-YU, H.; YI-FAN, Z.; MENG-XI, Z.; GORDON, L. L. M; LI-QIANG, L. **Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques**. Sensors and Actuators A, v. 244, pp. 184-197, 2016.

CHERIN, A. H. **An Introduction to Optical Fibers**. Bell Telephone Laboratories, 1983.

CHIRANJIT, G.; QUAZI, A.; BISWAJIT, G. **Spectral characteristics of uniform fiber Bragg grating with different grating length and refractive index variation**. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, v. 3, issue 1, pp. 456-462, 2015.

COROTTI, R. P. **Produção e caracterização de redes de Bragg gravadas em fibra multimodo e aplicadas ao setor de biocombustíveis**, 2015.

CORREIA, S.M.B. **Desenvolvimento de um interrogador de baixo custo para sensores de Bragg**. Dissertação de Mestrado, Física Aplicada, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, 2010.

CULLITY, B. D. **Elements of X ray Diffraction**. Addison-Wesley Pub.Company, Inc., London, 1967.

CULSHAW, B., **Optical fiber sensor Technologies: opportunities and – perhaps – pitfalls**. Journal of Lightwave Technology, v. 22, n. 1, pp. 39-50, Jan. 2004.

CURRAN, J.E. **Production of surface patterns by chemical plasma etching**. J. Phys. E., v. 14, pp. 393–407, 1981.

CUSANO, A. **Fiber optic sensors for industrial applications perspectives, challenges and new trends**. Optoelectronics Group, Engineering Department, University of Sannio, Benevento, Italy. 2014. 118 p. Notas de Aula.

DAI, Y.; ZHANG, Z.; LENG, J.; ASUNDI, A. **A novel fiber Bragg grating sensor interrogator based on time division multiplexing technique**. Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, v. 7493, 7 p., 2009.

DI SANTE, R. **Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: recent advances and applications**. Sensors, v. 15, pp. 18666-18713, 2015.

DIX, C.; MCKEE, P.F.; **High accuracy electron-beam grating lithography for optical and optoelectronic devices**. J. Vac. Sci. Technol, v. 10, n. 6, pp. 2667, 1992.

DONGSHENG, L.; ZHI, Z. **Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors**. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, v. 37, n. 4, pp. 435-441, 2005.

DOS SANTOS, A. D. F. **Proposta de gerenciamento de dados para monitoramento de saúde estrutural utilizando redes de sensores ópticos FBG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, PPGEE, Universidade Federal do Pará, 2014.

ELSMANN, T. *et al.* **High temperature sensing with fiber Bragg gratings in sapphire-derived all-glass optical fibers**. Optics Express, v. 22, n. 22, 2014.

ERDORGAN, T. **Fiber Grating spectra**. Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, pp. 1277-1294, Aug. 1997.

FASSARELLA, L. **Lei de Snell Generalizada**. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 29, n. 2, pp. 215-224, 2007.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes**. 3rd ed. Trondheim: Marintek, NTNU, 4Subsea, 2014.

FERNANDES, C. S., **Desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica para monitoramento estrutura**. Tese de D. Sc., PPGEE/ITEC/UFPA, Belém, PA, Brasil, 2016.

FERREIRA, L. A.; ARAÚJO, F.M.; MAIA, A.A.; ALVES, P.A.; SANTOS, J.L. **Redes de Bragg em fibra óptica – contribuições para o desenvolvimento de uma tecnologia**

revolucionária em monitorização estrutural. Encontro Nacional Betão Estrutural, 8 p., Porto, 2004.

FUJIWARA, E., **Sistema de sensoriamento a fibra óptica para determinação da concentração de sacarose e etanol aplicado a amostras de usinas sucroalcooleiras.** Tese de D. Sc., CP-EM/FEM/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2012.

GOLNABI, H. **Design and operation of different optical fiber sensors for displacement measurements.** Review of scientific instruments vol.70, number 6, june 1999.

GOWAR, J. **Optical Communication Systems.** Prantice-Hall, 1984.

GUO, Z. S.; FENG, J.; WANG, H. **Cryogenic temperature characteristics of the fiber Bragg gratings.** Cryogenics, v. 52, n. 10, pp. 457-460, 2012.

HALLIDAY, D. *et al.* **Fundamentos da Física.** LTC, 2004.

HAND, D. P.; RUSSEL, P. J. **Photoinduced Refractive-Index Changes in Germanosilicate Fibers.** Optics Letters, v. 15, pp. 102-113, 1990.

HILL, K. O.; FUJII, Y. JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. **Photosensitivity in optical waveguides: application to reflection filter fabrication.** Applied Physics Letter, 32 (10), pp. 647-649, May. 1978.

HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. **Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask.** Applied Physics Letters, v. 62, n. 10, pp. 1035-1037, Mar. 1993.

HILL, K. O.; MELTZ, G. **Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview.** Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, pp. 1263- 1276. Aug. 1997.

JACQUES, R.; CLARKE, T.; MORIKAWA, S.; STROHAECKER, T. **Monitoring the structural integrity of a flexible riser during dynamic loading with a combination of non-destructive testing methods.** NDT&E International, vol. 43, pp. 501-506, 2010.

JUN, L.; ZHANG, Y.; XU, W. **Research on enhancement sensitivity of embedded fiber Bragg grating sensor.** Optik, v. 125, pp. 7211-7214, 2014.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg gratings.** Academic Press, Elsevier. 2ª ed., USA, 2010.

KIM, M. J.; KIM, Y. H.; MUDHANA, G.; LEE, B. H. **Simultaneous measurement of temperature and strain based on double cladding fiber interferometer assisted by fiber grating pair.** IEEE Photon. Technol. Lett., n. 20, pp. 1290-1292, 2008.

KINET, D.; MÉGRET, P.; GOOSSEN, K.W.; QIU, L.; HEIDER, D.; CAUCHETEUR, C. **Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions.** *Sensors*, n. 14, pp. 7394-7419, 2014.

KREUZER, M. **Strain measurement with fiber Bragg grating sensors.** *The optical strain measurement from HBM*, pp. 12-15, 2006.

KROHN, D. A. **Fiber optic sensors: fundamentals and applications.** 3^a ed, ISA, Research Triangle, NC, 2000.

LAM, D. K.W.; GARSIDE, B. K., **Characterization of single-mode optical fiber filters.** *Applied Optics*, v. 20, n. 3, pp. 440-445, Feb/1981.

LIU, J. –G.; SCHIMIDT-HATTERNERBERGER, C.; BORM, G. **Dynamic strain measurement with fibre Bragg grating sensor system.** *Measurement*, v. 32, pp. 151-161, 2002.

LÓPEZ-HIGUERA, J.M.; COBO, L. R.; INCERA, A. Q.; COBO, A. **Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring.** *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 4, pp. 587-608, 2011.

LOUZADA, D. R. **Detecção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e redes neurais artificiais.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

MACHADO, R. **Comunicação de dados: Fibra óptica e sistemas de transmissão ópticos.** 2014. 9 p. Notas de aula.

MALO, B., HILL, K. O., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., ALBERT, J. **Point-by-Point Fabrication of Micro-Bragg Gratings in Photo Sensitive Fibre Using Single Excimer Pulse Refraction Index Modification Techniques.** *Electronics Letters*, v. 29, pp. 1668-1672, 1989.

MARKETWATCH. **At 25.3% CAGR, Fiber Bragg Grating (FBG) Market Size is expected Growth, Forecast to 2024 - Research Report by 360 Research Report.** Disponível em: <https://www.marketwatch.com/press-release/at-253-cagr-fiber-bragg-grating-fbg-market-size-is-expected-growth-forecast-to-2024---research-report-by-360-research-report-2019-11-08>. Acesso em: 14 de janeiro de 2020.

MARQUES, L. M. P. **Optimização de processos de produção de sensores de Bragg em fibra óptica.** Tese de Doutorado. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2008.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. **Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method.** Optics Letters, v. 14, n. 15, pp. 823-825, Aug. 1989.

MÉNDEZ, A. **Fiber Bragg grating sensors: a market overview.** Third European Workshop on Optical Fibre Sensors Proceedings of SPIE, 2007.

MIHAILOV, S. J., GOWER, M. C. **Recording of efficient high-order Bragg reflectors in optical fibres by phase mask image projection and single pulse exposure with an excimer laser.** Electron. Lett., v. 30, pp. 707-709, 1994.

MOREIRA, M. F. **Desenvolvimento e caracterização de um sistema laser de cristal líquido colestérico acoplado à fibra óptica.** Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

MORIKAWA, S. R. K.; CAMERINI, C. S.; BRAGA, A. M. B.; LLERENA, R. W. A. **Real time Continuous Structural Integrity Monitoring of Flexible Risers with Optical Fiber Sensors.** Offshore Technology Conference, OTC 20863, USA, Mai 2010.

MOYO, P.; BROWNJOHN, J. M. W.; SURESH, R.; TJIN, S. C. **Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure.** Engineering Structures, v. 27, pp. 1828-1834, 2005.

OLIVEIRA, L. H. P. **Análise metrológica de redes de Bragg de alta temperatura voltadas para aplicações em sensoriamento.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing,** Artech House, Boston, MA, 1999.

PETROBRAS. **Relatório de Tecnologia Petrobras.** Resultados – Exploração & Produção. Ilustração cedida por George Campello, 2014.

QUERES, L. S. A.; TEIXEIRA, R. C. **Monitoramento tecnológico sobre fibra óptica aplicada à indústria de energia: estudo do mercado brasileiro.** Cadernos de Prospecção, Salvador, BA, v. 7, n. 1, pp. 20-31, Jan/Mar. 2014.

QUINTERO, S. M. M. **Aplicações de sensores a rede de Bragg em fibras ópticas na medição de pH e deformação de filmes finos de alta dureza.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.

RASHLEIGH, S. C. **Acoustic sensing with a single coiled monomode fiber.** OPT. Lett., v. 5, pp. 392-394, 1980.

SADKOWSKI, R. *et al.* **Multiplexed interferometric fiber-optic sensors with digital signal processing.** Appl. Opt., Vol. 34(25), pp 5861-5866, 1995.

SCHMID, M. J.; MÜLLER, M. S.; KOCH, A. W. **Fiber Bragg grating technology in industry.** AMA Conferences 2015 – SENSOR 2015 and IRS² 2015, pp. 545-549, 2015.

SENGUPTA, D. Fiber Bragg Grating sensors and interrogation systems. In: RAJAN, G. **Optical Fiber Sensors – Advanced techniques and applications.** New York: CRC Press – Taylor & Francis Group, 2015. Cap. 9, pp. 207-256.

SHEN, W.; WANG, X., XU, L.; ZHAO, Y. **Strain transferring mechanism analysis of the substrate-bonded FBG sensor.** Optik – International Journal for Light and Electron Optics, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.10.097>, 2017.

SHIN, C. S.; LIAW, S. K; YANG, S. W. **Post impact fatigue damage monitoring using fiber Bragg grating sensors.** Sensors, v. 14, pp. 4144-4153, 2014.

SILVA, R. A. R. **Aplicação Inovadora de Sensores de Fibra Óptica em Solos para Avaliação de Parâmetros de Rigidez a muito Pequenas Deformações.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto. Portugal, 2016.

SIMÕES, T. B. **Monitoramento de Risers Flexíveis com Sensores a Fibra Óptica.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

SOUSA, M. J.; SANTOS, A. D. F.; SALES, C. S.; SANTOS, R. C.; OLIVEIRA, H. P. C.; KLAUTAU, A.; COSTA, J. C. W. A. **Desenvolvimento de software simulador para um sistema de interrogação óptico.** XV SBMO & X CBMAG – MOMAG, João Pessoa, 2012.

SWANTON, A.; ARMES, D.J.; YOUNG-SMITH, K.J.; DIX, C.; KASHYAP, R. **Use of e-beam written, reactive ion etched, phase masks for the generation of novel photorefractive fibre gratings.** Special Issue, J. Micro. Electron. Eng., v. 30, pp. 509-512, 1996.

UDD, E. **Fiber Optic Sensors,** Wiley Series in Pure and Applied Optics, USA, 1990.

WERNECK, M.M; ALLIL, R. C. S. B; RIBEIRO, B. A; NAZARÉ, F. V. B. A guide to fiber Bragg Grating sensors. In: CUADRADO-LABORDE, C. **Current Trends in short-and long- period fiber gratings.** Intech Open, Cap. 1, pp. 1-24, 2013.

WU, R. J.; ZHENG, B.; LIU, Z.; HE, P.; TAN, Y. **Analysis on strain transfer of a pasted FBG strain sensor.** International Journal for Light and Electron Optics, v. 125, n. 17, pp. 4924-4928, 2014.

ZHANG, G. **Strain transfer of bonded FBG sensor for coal mining similar model.** Journal of Basic and Applied Physics, v. 4, n. 3, pp. 20-28, 2015.

ZHANG, Q., BROWN, D. A., REINHART, L., MORSE, T. F. **Simple prism-based scheme for fabricating Bragg gratings in optical fibers.** Opt. Lett., v. 19, pp. 2030-2032, 1994.

ZHI, Z.; JI-LONG, L.; JIN-PING, O. **Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensor.** Journal of Harbin Institute of Technology, v. 38, n. 1, pp. 49-54, 2006.

ZHAO, X. **Research on wind turbine blade monitoring based on FBG strain sensors.** Power and Energy Engineering Conference, pp. 588-590, 2010.