



SENSOR DE INCLINAÇÃO BASEADO EM FBG

Roberto Wu Mok

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro

Março de 2019

SENSOR DE INCLINAÇÃO BASEADO EM FBG

Roberto Wu Mok

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

Prof^a. Maria José Pontes, D.Sc.

Dr. Alex Dante, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2019

Mok, Roberto Wu

Sensor de Inclinação Baseado em FBG/Roberto Wu
Mok. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIII, 73 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Elétrica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 62 – 66.

1. Grade de Bragg. 2. Inclinômetro Óptico. 3.
Sensor de Inclinação. I. Werneck, Marcelo Martins.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*My brain is only a receiver, in
the Universe there is a core from
which we obtain knowledge,
strength and inspiration.*

Nikola Tesla

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais Mok Chi Yeong e Wu Bi Xian, por sempre estarem comigo nas melhores e piores horas e nunca desconfiarem da minha capacidade para a conclusão desta fase da minha vida. Não menos importante, ao meu irmão Jorge Wu Mok por sempre estar comigo durante este período da minha vida.

Aos meus amigos de longa data, João Pedro Gonçalves Freitas, Natasha de Oliveira Medeiros e Paulo Henrique Silva Pinto, que estiveram comigo durante a graduação e agora na conclusão de outra importante fase.

Aos meus colegas, Gustavo Marques Mattos e Pedro Cardoso Silveira, que me acompanharam desde o início desta fase, dentro e fora do LIF. À equipe LIF que teve a paciência de me aguentar durante esse tempo. A Alex Dante em especial pelas sugestões e conselhos fornecidos que corroboraram para a elaboração deste trabalho e a publicação que foi feita.

Ao professor e orientador Marcelo Martins Werneck, pela confiança depositada em minha habilidade para conclusão deste trabalho.

Ao professor Manoel Perez, pelas conversas e conselhos sobre o mundo acadêmico da engenharia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento por meio da bolsa de M.Sc.

Mais uma vez agradeço a todas as pessoas com quem eu tive o privilégio de estudar e conviver durante esse ciclo que se está por se encerrar na minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SENSOR DE INCLINAÇÃO BASEADO EM FBG

Roberto Wu Mok

Março/2019

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sensor óptico de inclinação, independente de temperatura baseado em tecnologia de grades de Bragg (FBG). O sensor proposto apresenta uma topologia modular, no qual cada módulo é composto de um par de FBGs que é fixado à faces opostas de uma viga de metal em que uma massa conhecida é fixada na extremidade livre. Quando uma inclinação é aplicada, a viga será curvada devido à ação da força gravitacional que agirá na massa, que resulta em um alongamento do par de FBGs em direções opostas, que ocasiona em um deslocamento relativo da diferença de comprimento de onda do par de FBGs. O par de sensor FBGs é fixado a suportes, para aumentar a sensibilidade de deformação mecânica. Como as medições são codificadas em comprimentos de onda, o sensor proposto não sofre pelas flutuações de intensidade óptica que acontecem nas fontes de luz. O protótipo final foi calibrado e testado em bancada no intervalo de -40° a $+40^\circ$ de inclinação e foi obtido uma acurácia de $\pm 0,46^\circ$, resolução de $\pm 0,025^\circ$ e uma excelente linearidade. Além disso, a estabilidade térmica alcançada pelo sensor proposto foi de $\pm 0,64^\circ$ na faixa de temperatura de 25°C à 50°C . Por fim o trabalho apresentado se torna uma opção para substituir os equipamentos convencionais que são atualmente utilizados na indústria.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INCLINATION SENSOR BASED ON FBG

Roberto Wu Mok

March/2019

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

In this work, the development of an optical temperature-independent tilt sensor based on fiber Bragg grating technology (FBG) is presented. The proposed sensor has a modular topology, in which each module is composed of a pair of FBGs which is fixed to the opposing faces of a metal beam in which a known mass is attached to the free end. When a slope is applied, the beam will be curved due to the action of the gravitational force acting on the mass, which results in an elongation of the pair of FBGs in opposite directions, resulting in a relative displacement of the wavelength difference of the FBGs pair. The FBG sensor pair is attached to supports to increase the sensitivity of mechanical deformation. Since the measurements are encoded in the wavelength, the proposed sensor does not suffer from the optical intensity fluctuations that occur in the light sources. The final prototype was calibrated and bench-tested in the range of -40° to $+40^\circ$ inclination and an accuracy of $\pm 0,46^\circ$, resolution of $\pm 0,25^\circ$, and an excellent linearity. In addition, the thermal stability achieved by the proposed sensor was $0,64^\circ$ in the temperature range of 25°C to 50°C . Finally, the work presented becomes an option to replace the conventional equipment that is currently used in the industry.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Revisão Bibliográfica	2
1.2.1 Instrumentação	2
1.2.2 Inclinômetro convencional	4
1.2.3 Inclinômetro fixo	7
1.2.4 Sensores ópticos	9
1.3 Objetivos	16
1.4 Estrutura do Texto	17
2 Fundamentos Teóricos	18
2.1 Fundamentos das Grades de Bragg	18
2.1.1 Sensibilidade das FBGs à temperatura e <i>strain</i>	19
2.1.2 Compensação da sensibilidade cruzada	21
2.2 Mecânica de materiais	22
2.3 Modelamento dos sensores	25
2.3.1 Modelo matemático preliminar	25
2.3.2 Modelo matemático do sensor proposto	28

3	Metodologia	30
3.1	Descrição	30
3.2	Metodologia	31
3.2.1	Teste preliminar	31
3.2.2	Testes de sensibilidade	32
3.2.3	Medição Diferencial	35
3.2.4	Metodologia de compensação térmica	36
3.3	Materiais e Equipamentos	37
3.3.1	FBGs utilizadas	37
3.3.2	Interrogação óptica e Interrogador	39
3.4	Montagens Experimentais	40
3.4.1	Montagem Preliminar	40
3.4.2	Montagem do sensor proposto	42
4	Resultados Experimentais e Discussões	43
4.1	Testes experimentais	43
4.1.1	Teste preliminar	43
4.1.2	Testes de sensibilidade do sensor proposto	47
4.2	Protótipo Final	49
4.2.1	Caracterização térmica	55
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	60
5.1	Trabalhos Futuros	61
	Referências Bibliográficas	62
A	Trabalho publicado	67

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de Blocos de um instrumento genérico	3
1.2	Torpedo eletrônico e a unidade de leitura 3Geo Tecnologia.	5
1.3	Realização de medidas em campo em uma infraestrutura civil.	5
1.4	Princípio de funcionamento de um inclinômetro.	6
1.5	Medição realizada por inclinômetro em muro de arrimo.	7
1.6	Funcionamento do inclinômetro fixo	8
1.7	Inclinômetro fixo modelo INC500 Geodaq.	9
1.8	<i>Set-up</i> do sistema SOFO.	10
1.9	Inteferometria de Fabry-Perot formado por planos refletivos.	11
1.10	Sensor Fabry-Perot intrínseco em fibra óptica.	11
1.11	Sensor de cavidade FP utilizado para medida de extensão e temperatura	12
1.12	Cavidade Fabry-Perot extrínseco em fibra óptica.	12
1.13	Esquemático do sistema de medição de angulação.	13
1.14	Diagrama esquemático do sensor de inclinação FBG.	14
1.15	Esquemático do sistema de medição de angulação.	14
1.16	Esquemático do sensor de angulação.	15
1.17	Sensor de inclinação FS64 HBM.	16
2.1	Estrutura de uma FBG	18
2.2	Efeitos de variação de temperatura e <i>strain</i> em λ_B de uma FBG . . .	21
2.3	Viga Hipotética sobre ação de forças de deflexão.	22
2.4	Comportamento da seção da viga.	23

2.5	Modelo físico utilizado, uma viga engastada em balanço, comprimento L e espessura h, sobre ação de uma carga F no seu extremo livre.	25
2.6	Curva de deflexão de uma viga.	26
2.7	Curva de deflexão do pêndulo-engastado.	27
2.8	Estrutura do transdutor proposto, com suportes A e B de altura h' , espessura h e comprimento L	28
2.9	Diagramas de esforços cortantes e momento fletor.	29
3.1	Modelo físico do teste preliminar	31
3.2	Modelo proposto dos testes de sensibilidade.	32
3.3	<i>Strain</i> induzido na FBG quando a deflexão é aplicada.	33
3.4	Esquemático do sensor modular, A e B são os suportes das FBGs e C a massa responsável pela deflexão da viga.	35
3.5	Espectro de reflexão da FBG fabricada pelo <i>laser</i> argônio.	37
3.6	Espectro de reflexão da FBG fabricada pelo laser Nd:YAG.	38
3.7	Espectro de reflexão de duas FBGs inscritas em uma única fibra óptica fabricada pelo laser Nd:YAG.	38
3.8	Interrogação de uma FBG por um OSA ou outro dispositivo interrogador.	39
3.9	Interrogador óptico sm125 Micron optics	40
3.10	Representação esquemática da colagem da FBG na superfície da lâmina.	40
3.11	Esquemático mecânico para a fixação da FBG.	41
3.12	Sensor utilizado para testes preliminares.	42
3.13	Esquemático do posicionamento da fixação da FBG.	42
4.1	Teste de deslocamento, uma deflexão é inserida pelo paquímetro.	44
4.2	Deslocamento que a FBG sofre de acordo com a deflexão sofrida na extremidade livre.	45
4.3	Deslocamento recalculado considerando a distância entre o núcleo da fibra e a superfície da placa.	46

4.4	Teste experimental do sensor de inclinação.	46
4.5	Deslocamento que a FBG sofre com diferentes inclinações.	47
4.6	Comportamento do comprimento de onda refletido em diferentes alturas h'	48
4.7	Análise $\Delta\lambda_B$ quando é variado o comprimento b , δ o coeficiente angular	49
4.8	Calibração do transdutor do protótipo final realizado em bancada. . .	50
4.9	Comprimento de onda λ_B em diferentes inclinações.	51
4.10	Medição diferencial de inclinação.	52
4.11	Protótipo final montado em laboratório.	53
4.12	Sistema de medição em tempo real, no monitor é mostrado a leitura de 10°	54
4.13	Comparação entre as medidas de ângulo e a referência. No detalhe é mostrada a dispersão dos dados no intervalo entre 17° e 21°	55
4.14	Calibração térmica do sensor.	56
4.15	Caracterização térmica feita na faixa de 25° a 50°	56
4.16	Caracterização térmica na faixa de 35°C a 45°C com o sensor em repouso.	58
4.17	Caracterização térmica realizada na faixa de 51°C a 57°C com o sensor inclinado à 10°	58
4.18	Caracterização térmica realizada na faixa de 25°C a 50°C com o sensor inclinado à -14°	59

Lista de Tabelas

5.1	Comparação entre os sensores desenvolvidos.	60
-----	---	----

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Dentro da geotecnologia está a mecânica de solos, uma importante área dentro da engenharia civil que procura prever o comportamento de camadas de solo. Para isto é necessário uma instrumentação de auscultação que é um processo de observação, detecção e caracterização do comportamento da área de interesse.

Em obras da indústria civil, deslocamentos laterais que as estruturas sofrem são problemas de grande importância. Estes deslocamentos são ocasionados pelo movimento natural dos maciços da camada do subsolo e efeitos térmicos, ocasionam em longo prazo danos estruturais. Acidentes em infraestruturas de grande porte geralmente resultam em tragédias de impacto sócio-ambientais. Graves casos deste tipo de acidente são o rompimento das barragens rejeitos de minérios em Mariana (2015) e mais recentemente na barragem de Brumadinho (2019), ambos em Minas Gerais.

A prevenção de tais acidentes exige um sistema de sensores e desenvolvimento de técnicas de monitoramento contínuo em tempo real, capaz de detectar o deslocamento do solo. Os dados coletados por uma rede de sensores e relacionados à resposta do comportamento da estrutura, providenciam indicadores sobre um eventual dano estrutural ou anomalias, que afetam negativamente a integridade da estrutura [1].

Um tipo de sensor utilizado é o inclinômetro convencional do tipo torpedo, ne-

cessário quando há a necessidade de identificar e medir deslocamentos relativos ou absolutos em camadas de subsolo ou encostas. Estes movimentos, além de danificar as estruturas da engenharia civil, colocam em risco outro tipos de estruturas que utilizam o solo como apoios. Pois as destabilizam e por consequência elas serão forçadas à se moverem junto com o solo logo poderá acarretar em rupturas ou esforços acima do previsto sobre as estruturas.

Embora já consagrado na indústria, a eficiência de medição do inclinômetro geralmente é dependente da competência da equipe técnica responsável, condições em que se encontram a área e o periodicidade entre medidas.

No intuito de sanar os problemas que a tecnologia convencional apresenta, durante o século XX a evolução tecnológica direcionou-se para o desenvolvimento da instrumentação óptica, pois oferece excelente vantagens: possui tamanho reduzido, menor peso, não apresenta condutividade e risco de choque elétrico, imune à interferências eletromagnéticas e resistência à corrosão [2]. Além disso, a própria fibra óptica funciona como o meio de transmissão e recebimento de dados, permitindo que as unidades de aquisição fiquem posicionadas a distâncias quilométricas da área de medição. Diante estas vantagens, sensores desenvolvidos em fibras ópticas se tornam bastante atrativos na área de monitoramento em engenharia civil.

1.2 Revisão Bibliográfica

1.2.1 Instrumentação

Para garantir a segurança de infraestruturas civis é necessário implementar um sistema de monitoramento. Um sistema de monitoramento é formado por um conjunto importante de dados, como por exemplo deslocamentos verticais e horizontais, pressão, temperatura e carga.

Os instrumentos de medição geralmente são compostos por um transdutor, um sistema de aquisição de dados e um sistema de comunicação entre eles, representado pelo diagrama de blocos na Figura 1.1 [3]. O transdutor, de uma forma geral, é

um sistema que transforma duas formas de energia para fins de medida. Os transdutores podem ser do tipo: mecânico, resistivo, acústicos, indutivos, hidráulicos, pneumáticos e entre outros [4].

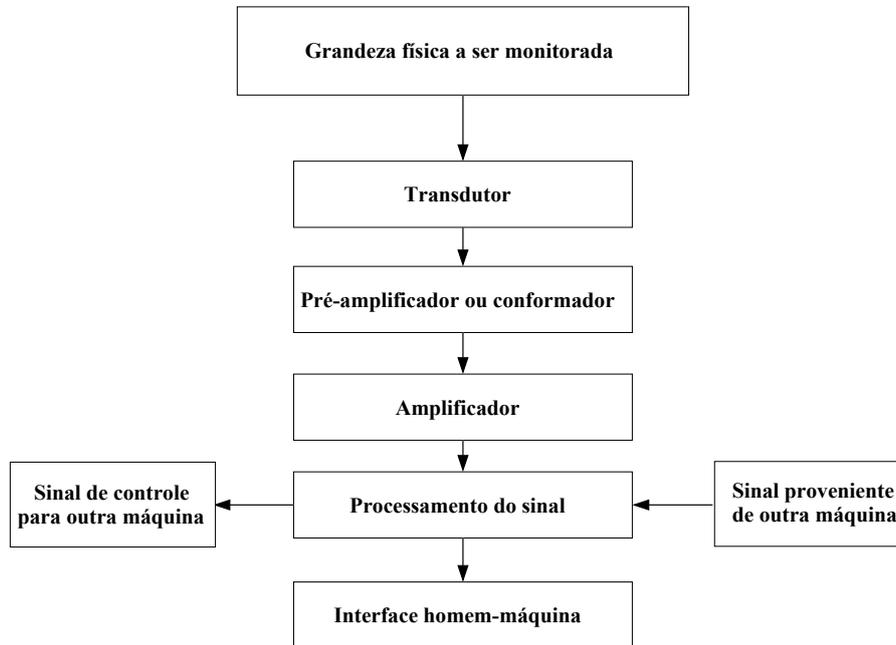


Figura 1.1: Diagrama de blocos de um instrumento genérico [4].

Os instrumentos que são usualmente utilizados para realizar o monitoramento de deslocamentos horizontais, verticais, superficiais e subsuperficiais, são baseados em princípio relativamente simples. Geralmente são utilizados para compor o sistema de monitoramento de barragens, diques, encostas, barragens e etc: piezômetros, extensômetros, perfilômetros, medidores de recalque, radar à laser e entrou outros. Devido à necessidade de um alto grau de acurácia, precisão e confiabilidade é necessário a pesquisa e desenvolvimento de novos instrumentos para que possa suprir esta necessidade.

Nesta seção é apresentado o princípio de funcionamento e alguns instrumentos comerciais e os que estão sendo desenvolvidos com tecnologia recente.

1.2.2 Inclínômetro convencional

O inclinômetro é um instrumento que mede a inclinação em relação à direção da força de gravidade utilizada como referência [4]. Em aplicações na indústria civil, eles são utilizados para medir a inclinação ponto a ponto de um tubo previamente colocado dentro de um furo de sonda [5]. Desse modo é possível determinar a distribuição do movimento lateral em estruturas como: barragens, aterros, taludes, túneis, encostas e trilhos de trem [6].

Um inclinômetro de declive apresenta quatro componentes principais, um tubo guia instalado permanentemente, um torpedo eletrônico portátil que contém um transdutor sensível à gravidade, uma unidade de leitura e um cabo elétrico graduado que conecta o torpedo ao sistema de leitura e também serve de sustentação para a descida do torpedo ao longo do tubo guia [7]. O tubo guia pode ser feito de alumínio ou plástico e tem dois pares de ranhuras que são diametralmente opostas que servem de guia para o torpedo [8]. O sensor comumente utilizado para este tipo de sistema é o acelerômetro do tipo servomecânico.

Para realizar as medidas de deslocamento lateral, o torpedo mostrado na Figura 1.2 é lançado dentro do tubo com suas rodas sendo guiadas na direção das ranhuras. É realizado o registro de inclinação e deslocamento lateral usualmente em intervalos fixos de 0,5 m. A resposta às mudanças de inclinação do duto é monitorada e registrada pela unidade de leitura na superfície. Após a finalização desta primeira medida, o torpedo deve ser rotacionado em 90° , direção do outro par de ranhuras, para realizar uma segunda leitura para verificação.



Figura 1.2: Torpedo eletrônico e a unidade de leitura 3Geo Tecnologia.

Na Figura 1.3 é mostrado a rotina de medição do deslocamento lateral in-loco, um operador é responsável pela manobra do torpedo no tubo inclinométrico e outro é responsável pela unidade de leitura.



Figura 1.3: Realização de medidas em uma infraestrutura civil [9].

Para realização do cálculo do deslocamento lateral do maciço de terra é considerada a situação ilustrada pelo esquema na Figura 1.4.

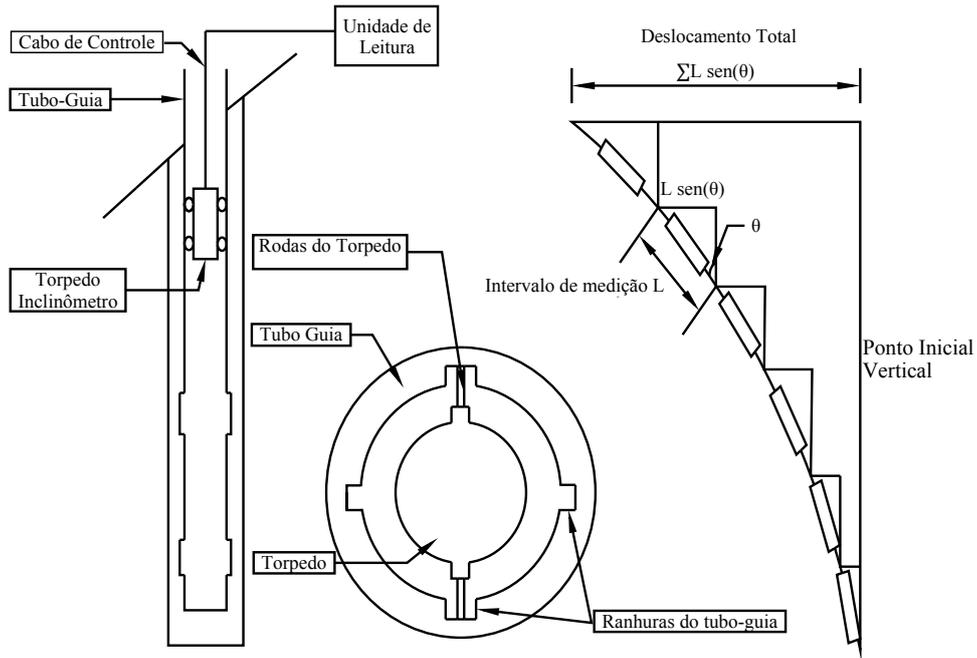


Figura 1.4: Princípio de funcionamento de um inclinômetro [5].

O deslocamento lateral (D) em um dado ponto do tubo é obtido pela seguinte expressão:

$$D = L \sin(\theta) \quad (1.1)$$

sendo L o intervalo de medição e θ é o valor da inclinação dada pelo acelerômetro. O deslocamento total do tubo guia é dado pelo somatório de todas medições realizadas, assim temos:

$$D^T = \sum_0^i L \sin(\theta_i) \quad (1.2)$$

A Figura 1.5 apresenta o resultado da medição realizada pelo sistema de inclinômetros da empresa SISGEO em um muro de arrimo que suporta escavações em solos coesivos no intervalo dos anos de 2011 à 2014.

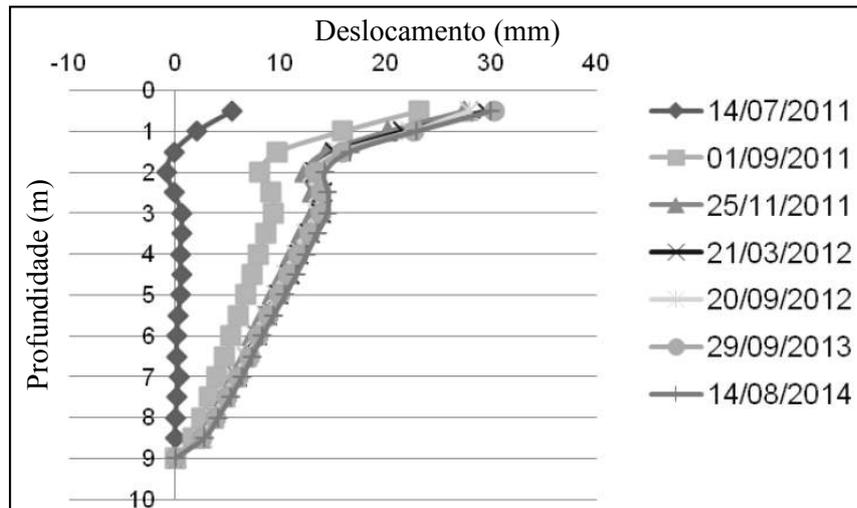


Figura 1.5: Medição realizada por inclinômetro em muro de arrimo [10].

1.2.3 Inclinômetro fixo

O inclinômetro fixo, assim como o convencional, é utilizado para operar em um poço. Geralmente compõem um sistema de monitoramento contínuo, é constituído por um *array* de medidores de angulação instalados dentro do tubo guia de inclinômetro. Como mostrado na Figura 1.6, o sistema de leitura adquire os dados e os gravam autonomamente em um computador [11].

Os transdutores mais comuns utilizados para este equipamento são os acelerômetros integrados (os chamados MEMS (*micro electromechanical systems*) do tipo: eletrolítico e o de corda (arame) vibrante.

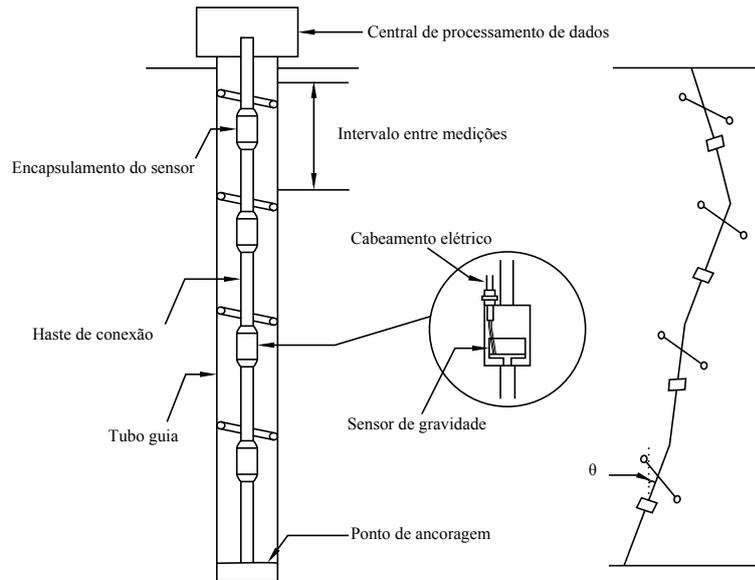


Figura 1.6: Funcionamento do inclinômetro fixo. Adaptado de [11].

Os sensores eletrolíticos são compostos de um pequeno frasco de vidro contendo um líquido eletrolítico e eletrodos de polaridades opostas. Enquanto são inclinados, os eletrodos mergulham para dentro ou fora do líquido, dando um sinal proporcional a esta inclinação [11].

Transdutores de corda vibrante baseiam-se no princípio de frequência de ressonância de uma corda esticada em dois pontos fixos que oscila em uma frequência previamente conhecida. Quando uma inclinação é aplicada a este conjunto, uma alteração na oscilação ocorre, causada pelos diferentes esforços que estão sendo aplicados nos pontos que a corda está fixa [4]. O cálculo do deslocamento por este tipo de inclinômetro é similar ao apresentado anteriormente. Neste sistema, as sondas são posicionadas em distâncias de medida L e cada sensor medirá a inclinação local e para calcular o deslocamento total será aplicado o somatório.

Na figura 1.7 é apresentada a fase de instalação deste tipo de equipamento. Na Figura 1.7a é apresentado os módulos sensores inclinômetro INC500 Geodaq, na Figura 1.7b a apresentação de como o sensor deve ser instalado em campo. Os módulos são conectados em série e inseridos nos dutos.



(a) Módulos do inclinômetro.



(b) Instalação em campo.

Figura 1.7: Inclinômetro fixo modelo INC500 Geodaq [12].

1.2.4 Sensores ópticos

Durante a recente década, a evolução tecnológica da instrumentação tende a pesquisa e o desenvolvimento na área de sensoriamento à fibra óptica. Vários sensores foram desenvolvidos e aplicados na indústria civil: sensor de deslocamento baseado em interferometria de Michelson, sensor de deformação baseado em cavidade de Fabry-Perot em fibras ópticas e sensores grades de Bragg (FBG) [13].

O trabalho desenvolvido por Glišić *et al* [14], apresenta um sistema baseado em interferometria de Michelson, chamado de sensor SOFO. O sistema SOFO funciona como um interferômetro de Michelson para realizar medições de deslocamento. A unidade sensora do sistema é formada por um par de fibra óptica monomodo, cada uma com uma superfície espelhada no seu final, fixadas dentro de um duto que deve ser ancorada ao ponto de medição de interesse. A fibra de medição deve ser pré-tensionada e fixa à estrutura para que esta acompanhe as deformações ao longo do comprimento. A unidade de leitura é formada por outro interferômetro de Michelson composto por um braço fixo e um braço móvel com um espelho no final, que é utilizado para realizar a medição de intensidade óptica, uma unidade de processamento e um LED (diodo emissor de luz) que ilumina o sensor. O sistema é representado na Figura 1.8.

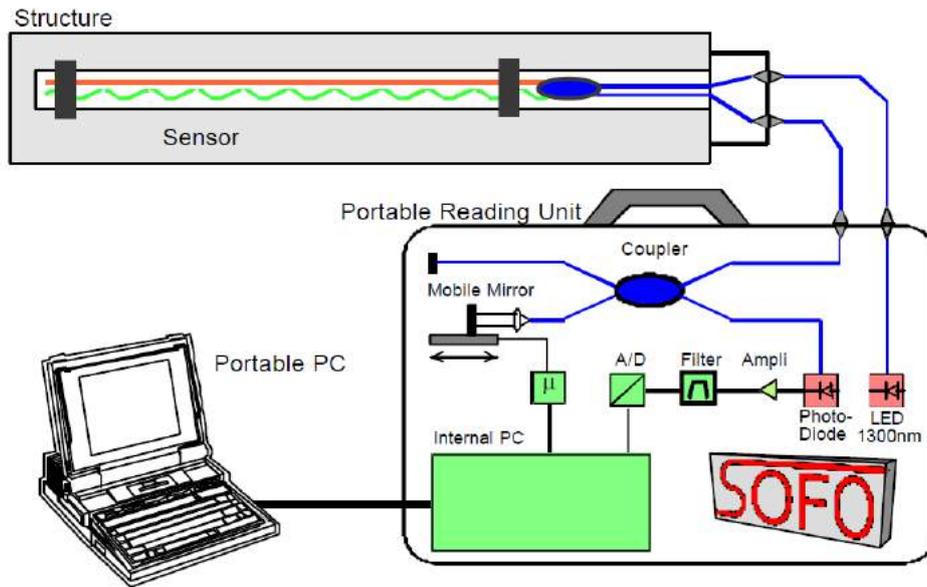


Figura 1.8: *Set-up* do sistema SOFO [14].

O interferômetro da unidade de leitura é utilizado medir a intensidade óptica do espectro da luz que é refletida pelas fibras do sensor. A medição do deslocamento que a estrutura sofre se dá pela diferença de intensidade óptica entre o sinal óptico refletido pela referência e do braço sensor que está acompanhando o movimento. Neste sistema é reportado uma resolução de $2 \mu m$ e capacidade de medição $70 mm$ de extensão e compressão.

O interferômetro de Fabry-Perot (FP) desenvolvido por Charles Fabry e Alfred Perot em 1899, é constituído de dois planos com refletância R_1 e R_2 disposto paralelamente entre si e distanciados por uma distância L , ilustrado na Figura 1.9. A luz que incide nesta estrutura, chamada de cavidade FP, sofre múltiplas reflexões no interior dos planos, resultando em dois padrões de interferência que dão origem a um sinal refletido em direção da fonte incidente e um sinal que é transmitido [15–17].

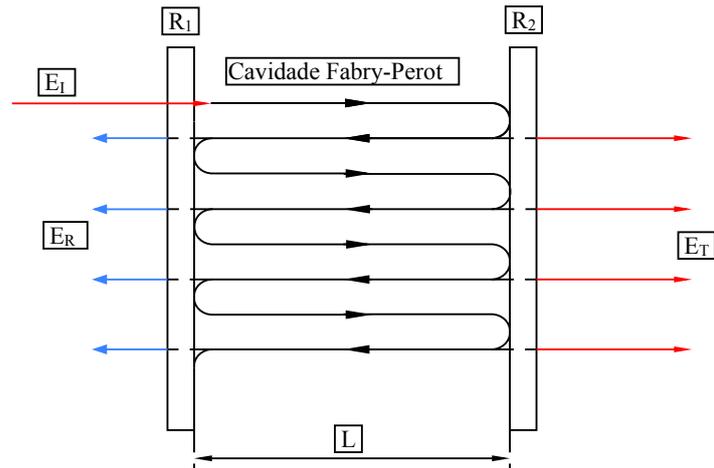


Figura 1.9: Inteferometria de Fabry-Perot formado por planos refletivos.

Sensores FP em fibras ópticas podem ser classificados em dois grupos intrínsecos (IFPI) e extrínsecos (EFPI) dependendo da técnica de fabricação [18]. Sensores intrínsecos apresentam a cavidade FP interno a fibra conforme é ilustrado na Figura 1.10, em que as cavidades podem ser formadas pela fusão de fibra capilar (sem núcleo) e fibras monomodo (SMF) [16], pela fusão entre fibras multi modo (MMF) com fibras SMF [19, 20], adição de espelhos por deposição em terminações de fibra [21], fusão entre fibras de cristais fotônicos e SMF [22] .

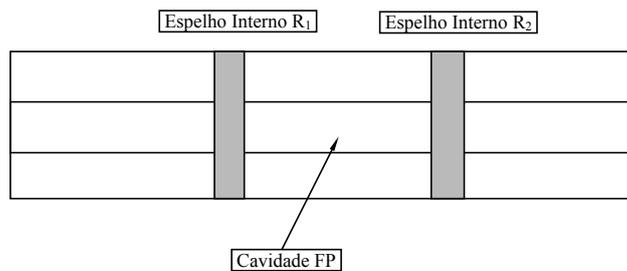


Figura 1.10: Sensor Fabry-Perot intrínseco em fibra óptica [18].

Apresentado por Tafulo *et al.* [19] o desenvolvimento de sensores IFPI para medir deformação e temperatura, a cavidade FP é fabricada pela fusão entre fibras SMF e MMF. As fibras MMF são tratadas quimicamente para que concavidades sejam gravadas em sua ponta. Neste trabalho é desenvolvida e caracterizada a resposta de dois sensores, o *set-up* óptico apresentado na Figura 1.11 é utilizado para interrogar as cavidades FP. As sensibilidades reportadas são: deformação mecânica $6,99 \text{ pm}/\mu\epsilon$

e $4,06 \text{ pm}/\mu\epsilon$ e sensibilidade térmica $0,95 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $-0,84 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para os sensores desenvolvidos.

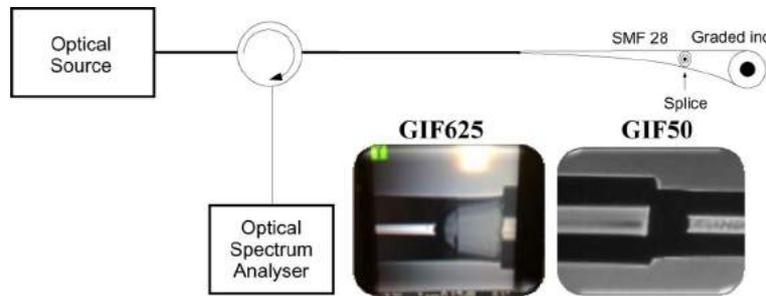


Figura 1.11: Sensor de cavidade FP utilizado para medida de extensão e temperatura [19].

Sensores EFPI em sua forma mais simples utilizam um espaço livre entre fibras como a cavidade FP e utilizam terminações clivadas como pontos de reflexão de luz conforme é observado na Figura 1.12. Nos trabalhos [23, 24] sensores de deformação são desenvolvidos utilizando a superfície livre de ar para criar a cavidade FP, o sensor desenvolvido por Wilshire *et al.* [23] é formado por duas pontas de fibra alinhadas dentro de um capilar de vidro, sendo que uma ponta foi recoberta por uma camada de alumínio para assegurar a máxima refletância, enquanto que o sensor de Zhu *et al.* [24] o sensor é composto de um espelho refletivo recoberto por ouro fixado dentro de uma carcaça de metal em conjunto com uma ponta de fibra SMF.

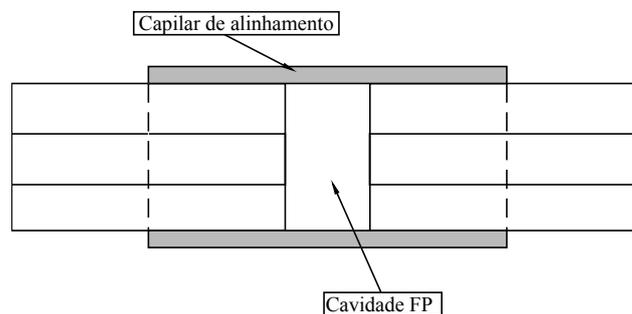


Figura 1.12: Cavidade Fabry-Perot extrínseco em fibra óptica [18].

O aumento do uso e popularidade de sensores a FBG é devido à sua sensibilidade intrínseca à temperatura e deformação mecânica. Estes sensores apresentam um conjunto de vantagens sobre os convencionais eletromecânicos, tal como imunidade à

interferência eletromagnética, isolamento elétrica, possibilidade de multiplexar diversos sensores em uma única fibra óptica e capacidade de monitoramento à distância [25, 26].

Desenvolvido por Peng *et al.* [27], um sensor angular de deslocamento baseado em tecnologia FBG é proposto, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 1.13, em que a parte óptica é composta por uma fonte de luz de banda larga BBS, um par de FBGs, um par de acoplador óptico 2x2 que divide a luz de entrada em dois feixes (IMG) e um fotodetector (PD). O princípio de funcionamento deste sensor é baseado em um pêndulo com uma massa fixada a sua extremidade livre, que atua como uma força de deformação para toda a estrutura. Neste trabalho é apresentado um método de demodulação, que é simples e tem um custo relativamente baixo. Apesar de ser simples e viável economicamente, a técnica proposta depende na intensidade de luz refletida pelo par de FBGs casadas espectralmente, que é suscetível à flutuações da fonte de luz da fibra óptica.

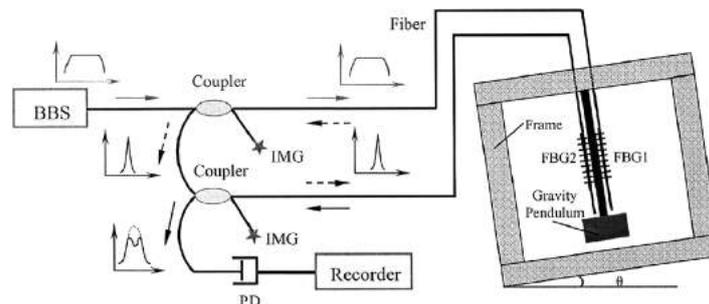


Figura 1.13: Esquemático do sistema de medição de angulação [27].

Sensores de inclinação de duas dimensões são apresentados em [28–31]. O sensor pêndulo vertical é proposto por Guan *et al.* [28], sua estrutura é composta por uma massa suspensa que é conectada à uma armação de aço por uma junta com liberdade de movimento, conforme é ilustrado na Figura 1.14. A posição inicial de equilíbrio é mantida por um conjunto de quatro FBGs que são colados à armação e a quatro hastes salientes do pêndulo. Uma acurácia de $0,1^\circ$ e resolução de $0,007^\circ$ são obtidos. Apesar de ser preciso e ter a capacidade de realizar medições em 3-D, o sensor proposto apresenta uma estrutura mecânica complexa e não apresenta uma

opção de implementar uma multiplexação de sensores, uma característica desejável para o monitoramento de deslocamento de solo.

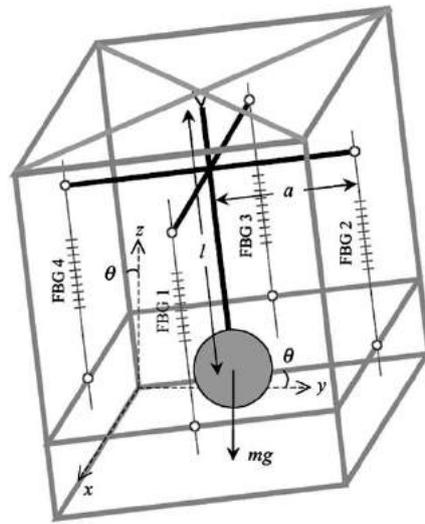


Figura 1.14: Diagrama esquemático do sensor de inclinação FBG [28].

Em [29] Dong *et al.* propuseram um sensor de inclinação baseada em uma estrutura híbrida composta por um pêndulo e três sensores FBG, o sistema é mostrado na Figura 1.15. Uma acurácia de $\pm 0,13^\circ$ e resolução de $0,02^\circ$ são reportadas pelos autores. Entretanto, a técnica de interrogação proposta é baseada em intensidade óptica refletida pela FBG, que está sendo modulada pela fonte de luz, flutuações de potência óptica e variações de temperatura podem introduzir erros de medição.

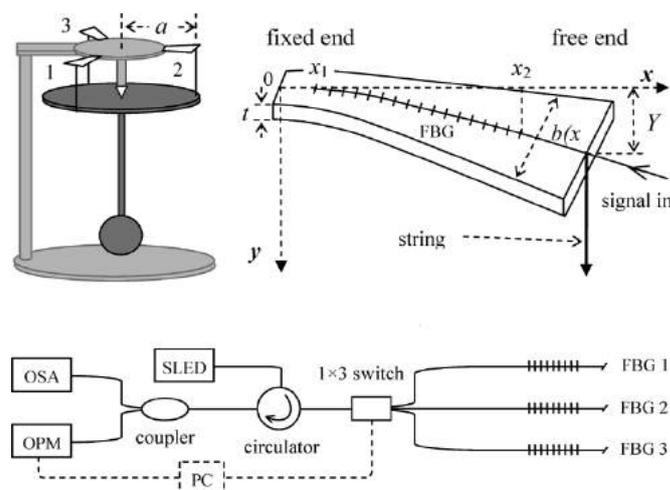


Figura 1.15: Esquemático do sistema de medição de angulação [29].

Um sensor de inclinação de 2-D e imune a variação térmica é apresentado no tra-

balho de He *et al.* [32], que consiste em um conjunto de três FBGs, que são fixas em um placa circular, suspendendo uma massa de prova. O esquemático do sistema que foi desenvolvido é apresentado na Figura 1.16. A técnica de demodulação diferencial entre os comprimentos de onda de Bragg é utilizada para o cálculo dos ângulos de inclinação. Os autores reportam uma sensibilidade de $192 \text{ pm}/^\circ$ e resolução de medida de $0,005^\circ$.

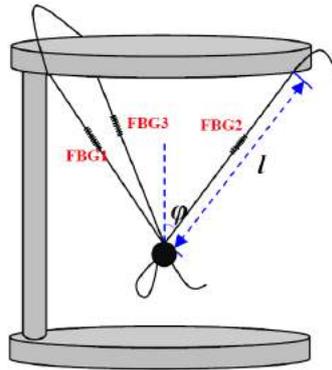


Figura 1.16: Esquemático do sensor de angulação [32].

Outros tipos de inclinômetros são desenvolvidos por [33, 34] e utilizam a estratégia de medição de deslocamento distribuído. Em ambos os trabalhos o elemento sensor utilizado é um tubo inclinométrico de PVC (clorero de polivinila) em conjunto as FBGs. As FBGs são utilizadas para medir o ângulo de inclinação de cada intervalo de medição, assim como o torpedo inclinométrico é utilizado em um inclinômetro convencional ou fixo. No trabalho de [33], embora apresente um comportamento quase linear $R^2 = 0,9862$, utilizou-se somente uma FBG para medir a inclinação, logo a sensibilidade cruzada acarreta erros na medição, enquanto que no trabalho de Guo *et al.* [34] foi utilizado pares de FBGs nos intervalos de medições para eliminar a sensibilidade cruzada.

Além dos trabalhos acadêmicos, os sensores são comercialmente desenvolvidos pela HBM [35], que é um sensor de angulação monoaxial baseado em FBG chamado de FS64 apresentado na Figura 1.17. A acurácia reportada é de $\pm 0,01^\circ$ e resolução de $\pm 0,001^\circ$ dentro do intervalo de medição em $\pm 3^\circ$.



Figura 1.17: Sensor de inclinação FS64 HBM [35].

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivos construir e caracterizar um protótipo de sensor óptico de inclinação baseado em tecnologia de Grades de Bragg (FBG) para medir inclinações, que é uma alternativa às opções convencionais que são encontradas no mercados.

A proposta deste trabalho é de desenvolver um inclinômetro modular baseado em FBG. O módulo é composto por um par de FBGs coladas à faces opostas de uma placa de aço que segura uma massa conhecida. O esquema proposto elimina a sensibilidade cruzada entre temperatura e deformação mecânica inerente da FBG, permite a implementação de uma rede de sensores quasi-distribuídos e pode ser facilmente aprimorado para realizar medições 2-D.

As características buscadas durante o desenvolvimento do sensor são:

- Custo reduzido em comparação às tecnologias atuais;
- Capacidade de monitoramento em tempo real;
- Possibilidade de fixação em definitivo;
- Capacidade de criar uma rede quasi-distribuída de sensoriamento.

1.4 Estrutura do Texto

Esta dissertação é dividida em 6 capítulos com a seguinte estrutura:

- Capítulo 1: motivações do trabalho, revisão bibliográfica, objetivo e a estrutura textual.
- Capítulo 2: aborda os princípios teóricos que são utilizados para o desenvolvimento do projeto.
- Capítulo 3: apresenta a metodologia e os materiais utilizados.
- Capítulo 4: apresenta o desenvolvimento feito para caracterização e análise da técnica.
- Capítulo 5: conclusões e comparações que são obtidas durante a pesquisa e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Fundamentos das Grades de Bragg

Durante os experimentos realizados por Hill [36], em 1978 no Centro Canadense de Pesquisas de Comunicações, foi descoberto o efeito de fotosensibilidade de fibras ópticas. Os experimentos envolveram fibras ópticas de sílica com núcleo dopado de germânico e o uso de laser de íons de argônio. A fotosensibilidade refere-se à mudanças permanentes do índice de refração do núcleo da fibra óptica quando exposta à uma luz com intensidade e comprimentos de onda característicos. Essencialmente FBG mais simples é formada por modulação periódica de índice de refração do núcleo de uma fibra óptica monomodo conforme mostrada na Figura 2.1 [26, 37].

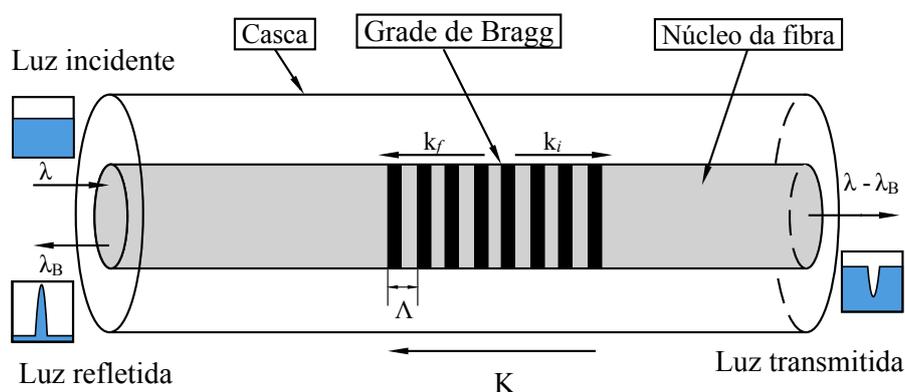


Figura 2.1: Estrutura de uma FBG

A luz guiada ao longo da fibra óptica que é refletida por cada plano da grade se

somam construtivamente em mesma direção, se as condições de Bragg de conservação de energia e momento são alcançadas. A conservação de energia ($\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$) implica que a frequência da radiação incidente (λ) e refletida (λ_B) é a mesma em todos os planos. Enquanto que a conservação do momento requer que o vetor de onda incidente k_i somado ao vetor de onda da grade K , seja igual ao vetor de onda da radiação refletida k_f conforme indicado [37].

$$k_i + K = k_f \quad (2.1)$$

onde o vetor de onda da grade, K , tem a direção normal aos planos da grades e a magnitude $2\pi/\Lambda$. O vetor de onda refletido é igual em magnitude, porém em direção contrária ao vetor de onda incidente. Consequentemente, a conservação de momento se torna:

$$2\left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B}\right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.2)$$

que simplifica a condição de primeira ordem de Bragg:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.3)$$

onde λ_B é o comprimento de onda central do pico de reflexão de Bragg, n_{eff} é o efetivo índice de refração do núcleo da fibra e Λ é a periodicidade da grade (distância física entre os planos). Pode ser observado que qualquer variação em n_{eff} ou em Λ acarreta mudanças em λ_B .

2.1.1 Sensibilidade das FBGs à temperatura e *strain*

O pico do comprimento de onda de Bragg de uma FBG depende do índice de refração efetivo e também da periodicidade da grade. O índice de refração, tal como a periodicidade entre o espaçamento entre os planos da grade, são afetados por variações em temperatura e *strain* mecânico induzido à grade. Utilizando a Equação 2.3 e aplicando a diferenciação, podemos descrever a variação de λ_B devido à variação de

temperatura e *strain* da seguinte forma [26]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.4)$$

Rearranjando e substituindo a Equação 2.3 na Equação 2.4 temos a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} \right) \Delta l + \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.5)$$

O primeiro termo da Equação 2.5 representa o efeito por *strain* em uma fibra óptica. O fator $(1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial l)$ é à correspondente alteração do espaçamento entre os planos da grade enquanto que o termo $(1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial l)$ é chamado de coeficiente foto-elástico (p_e), variação do índice de refração com o *strain* mecânico. Assim o primeiro termo da equação pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon_z \quad (2.6)$$

O segundo termo da Equação 2.5 representa o efeito da temperatura em uma fibra óptica, o termo $(1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica da sílica que é representado como α_Λ (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) e o termo $(1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ representa o coeficiente termo-óptico sobre o índice de refração do núcleo (aproximadamente $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) representado como α_n . O segundo termo da equação é escrito da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (2.7)$$

Combinando as Equações 2.6 e 2.7 temos a seguinte equação:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon_z + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (2.8)$$

Portanto quando uma tração é aplicada no sentido longitudinal da fibra, faz com que

o λ_B da FBG seja deslocado para valores de comprimento de onda maiores, enquanto que uma compressão provoca um deslocamento para menores comprimentos de onda. Este mesmo comportamento é provocado por uma variação de temperatura, em que um aumento de temperatura desloca λ_B para valores maiores e uma diminuição implica em deslocar para valores menores, a Figura 2.2 ilustra este fenômeno [26].

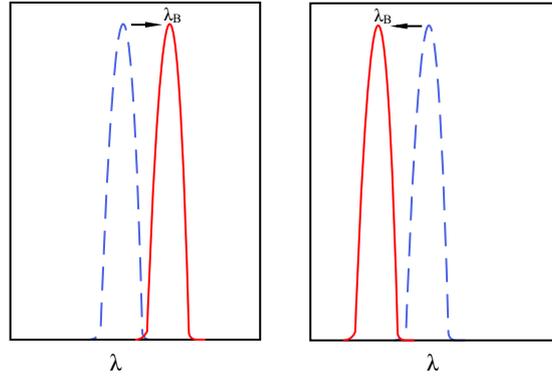


Figura 2.2: Efeitos de variação de temperatura e *strain* em λ_B de uma FBG. Adaptado de [26].

2.1.2 Compensação da sensibilidade cruzada

Conforme pode ser concluído pela Equação 2.8, FBGs são sensíveis à efeitos de *strain* e variação de temperatura simultaneamente. A medição do deslocamento de λ_B de uma FBG, não discrimina a resposta do efeito dessas duas variáveis. Esta incapacidade de distinguir a resposta de efeitos térmicos e mecânicos é de fato a limitação mais significativa da FBG como sensor, ou seja medições de variáveis físicas decorrentes de *strain* são sujeitas a erros relacionados à variações térmicas e sensores térmicos são propensos a erros decorrente de *strain* não desejados [37, 38].

O método mais simples de realizar a compensação é utilizar duas FBGs, onde uma delas deve apresentar um isolamento da grandeza que se deseja ser compensada. Técnicas de compensação térmica podem ser classificadas em dois grupos, intrínseco (depende das propriedades da fibra) ou extrínsecos (combinação da FBG com um material externo com propriedades e dimensões adequados)[37].

2.2 Mecânica de materiais

Jacob Bernoulli em 1694 revelou que a curvatura de uma viga elástica em qualquer ponto é relacionada ao momento fletor aplicado neste mesmo ponto. Mais tarde em 1744, esta teoria foi confirmada por Leonhard Euler em seu trabalho sobre as formas das vigas elásticas submetidas à vários tipos de cargas [39].

Assumindo uma viga sobre ação de cargas, conforme mostrado na Figura 2.3, a curva de deflexão do eixo longitudinal que passa pelo centróide da área da seção transversal é chamada de curva elástica [40]. Sendo:

- y o eixo vertical
- x o eixo horizontal
- w uma carga distribuída qualquer (N/m)
- P um carga pontual (N)
- M um torque (Nm)
- θ o ângulo de rotação
- y a distância entre a linha neutra a um ponto do perfil da viga

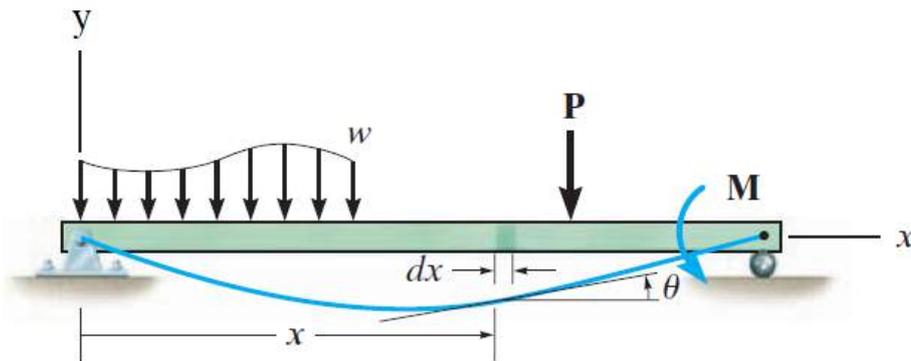


Figura 2.3: Viga hipotética sobre ação de forças de deflexão [40].

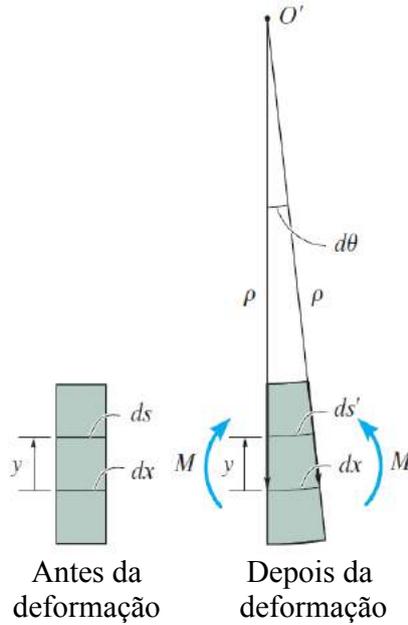


Figura 2.4: Comportamento da seção da viga [40].

Para estabelecer uma relação entre o momento interno e o raio de curvatura $1/\rho$ da curva elástica em um ponto O' mostrado na Figura 2.4, é considerado a condição de flexão pura, em que a ação do momento fletor da seção é constante. Realizando a análise de uma seção após a ação de deformação temos a seguinte relação:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.9)$$

onde $(1/\rho)$ é o raio de curvatura, M momento fletor(Nm), E módulo de elasticidade do material ou conhecido como módulo de Young (Pa) e I o momento de inércia da seção da viga(m^4).

A equação da curva elástica para pequenos ângulos de rotação é matematicamente expressa como $v = f(x)$, assim a seguinte representação é feita:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v(x)}{dx^2} \quad (2.10)$$

Assim combinando 2.10 em 2.9 obtemos a seguinte equação diferencial:

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.11)$$

Efetuada a primeira integral da Equação 2.11 obtemos a seguinte equação:

$$\frac{dv(x)}{dx} = \theta(x) = \frac{1}{EI} \int M(x)dx + C_1 \quad (2.12)$$

onde $\theta(x)$ é o ângulo de rotação ao longo do eixo x e C_1 é uma constante de integração. Efetuando outra integração da equação obtemos a deflexão que a viga sofre:

$$v(x) = \frac{1}{EI} \int \int M(x)dx + C_1x + C_2 \quad (2.13)$$

onde C_2 é a segunda constante de integração. As duas constantes de integração C_1 e C_2 são relacionados às condições de contorno da viga que geralmente são impostas pelos apoios da estrutura [41].

Considerando a seção da Figura 2.4, podemos realizar a análise do *strain* que age na viga após a atuação dos momentos internos. Nota-se que o segmento dx , que está localizada na linha normal da viga, não sofre variação de comprimento enquanto que o segmento ds , que está localizado a uma distância y da linha normal, será contraído após a deformação e será chamada de ds' . Por definição, a *strain* do segmento ds é dada da seguinte maneira [40]:

$$\varepsilon = \lim_{ds \rightarrow 0} \frac{ds' - ds}{ds} \quad (2.14)$$

Representando o *strain* em termos de y (distância vertical da linha do eixo neutro a um ponto qualquer) e o raio de curvatura $1/\rho$, temos a seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho} \quad (2.15)$$

Substituindo 2.9 em 2.15 temos a expressão que relaciona o *strain* que a viga sofre às cargas, responsáveis pelo momento fletor, que agem na viga:

$$\varepsilon = \frac{M(x)}{EI}y \quad (2.16)$$

2.3 Modelamento dos sensores

Nesta seção é apresentado o modelamento matemático e considerações feitas que serviram de embasamento teórico.

2.3.1 Modelo matemático preliminar

Para verificar a validade do método de medição baseado em deflexão de corpos rígidos foram realizado dois testes. O primeiro consistiu em defletir a viga em diferentes distâncias e realizar a medição de λ_B que é refletida pela FBG. O modelo de utilizado é mostrado na Figura 2.5.

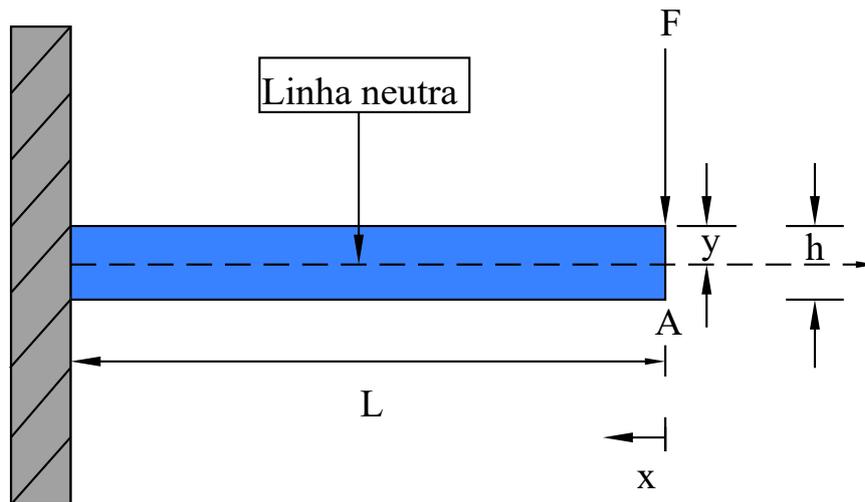


Figura 2.5: Modelo físico utilizado, uma viga engastada em balanço, comprimento L e espessura h , sobre ação de uma carga F no seu extremo livre.

A curva de deflexão da barra é apresentado na Figura 2.6, sendo que F a força de deflexão no ponto A , L o comprimento da viga, h a espessura do perfil da viga, B o ponto que a FBG está fixa, y a distância da superfície a linha neutra da barra e v a deflexão que a viga sofre.

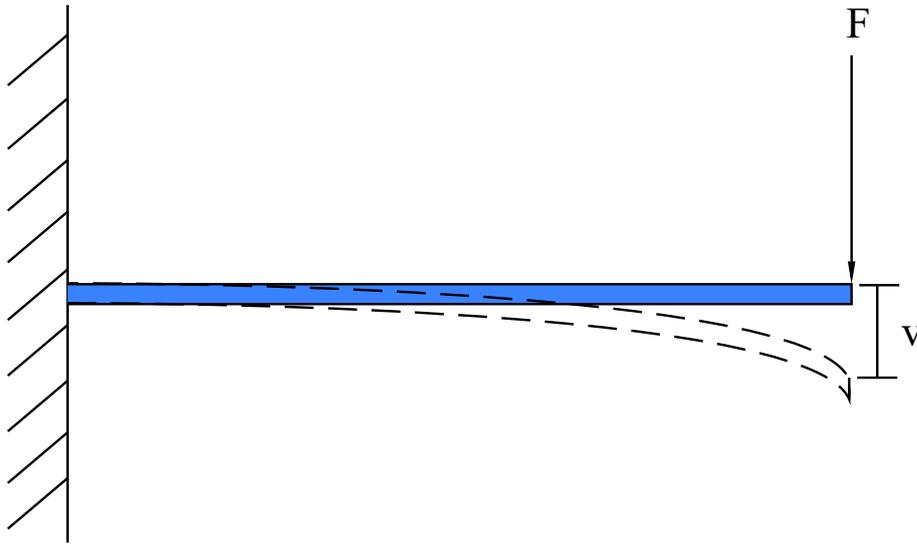


Figura 2.6: Curva de deflexão de uma viga.

O momento fletor $M(x)$ que age na viga é dado por:

$$M(x) = Fx \quad (2.17)$$

Substituindo a Equação 2.17 em 2.11 obtemos a equação da linha elástica:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{Fx}{EI} \quad (2.18)$$

Efetuada a primeira integral é obtido o ângulo de rotação da viga $\theta(x)$ dado por:

$$\theta(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{Fx^2}{2} + C_1 \right) \quad (2.19)$$

Solucionando a segunda integral é obtido a deflexão que a viga $v(x)$:

$$v(x) = \frac{1}{EI} \left(\frac{Fx^3}{6} + C_1x + C_2 \right) \quad (2.20)$$

E por fim utilizando as condições de contorno no apoio $\theta(L) = 0$ e $v(L) = 0$ nas Equações 2.19 e 2.20 para encontrar as constantes de integração, temos que a deflexão em qualquer ponto é dada como:

$$v(x) = \frac{Fx^3}{6EI} - \frac{FL^2}{2EI}x + \frac{FL^3}{3EI} \quad (2.21)$$

A deflexão máxima da viga é encontrando no ponto A que está situado na distância horizontal $x = 0$, assim temos que v é dado como:

$$v = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2.22)$$

Substituindo a Equação 2.17 em 2.16 temos o *strain* da viga como:

$$\varepsilon = \frac{Fx}{EI}y \quad (2.23)$$

Substituindo a Equação 2.22 na Equação 2.23, podemos estabelecer uma relação entre a deflexão v no ponto A e o *strain* sofrido na superfície da barra de aço da seguinte maneira:

$$\varepsilon = \frac{3xv}{2L^2}y \quad (2.24)$$

Para medir deslocamentos relativos de inclinação, a viga é fixada referenciada ao eixo vertical y . Uma massa conhecida m é fixada na extremidade livre e quando uma inclinação é inserida na viga, a aceleração gravitacional age na massa e uma força de deflexão F surge.

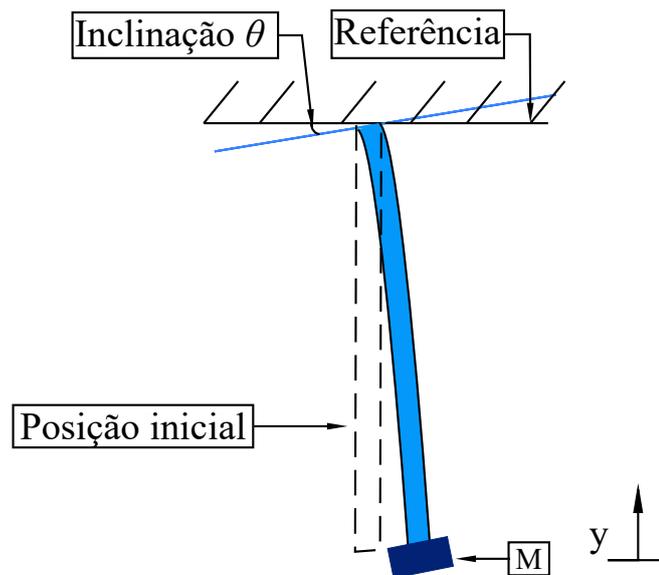


Figura 2.7: Curva de deflexão do pêndulo-engastado.

A força de deformação F que a massa exerce é expressa pela seguinte expressão:

$$F = mg\text{sen}(\theta) \quad (2.25)$$

sendo m a massa (kg), g a aceleração gravitacional (m/s^2) e θ a inclinação que é inserida($^\circ$). Substituindo a Equação 2.25 em 2.23 é obtida a relação do *strain* ao ângulo de inclinação da viga. Assim é obtido:

$$\varepsilon = \frac{mg\text{sen}(\theta)L}{2EI}xy \quad (2.26)$$

2.3.2 Modelo matemático do sensor proposto

Para construção do sensor, é proposto uma modificação na estrutura da viga no intuito de aumentar a sensibilidade mecânica da FBG à *strain* que a viga sofre. A estrutura proposta é apresentado na Figura 2.8.

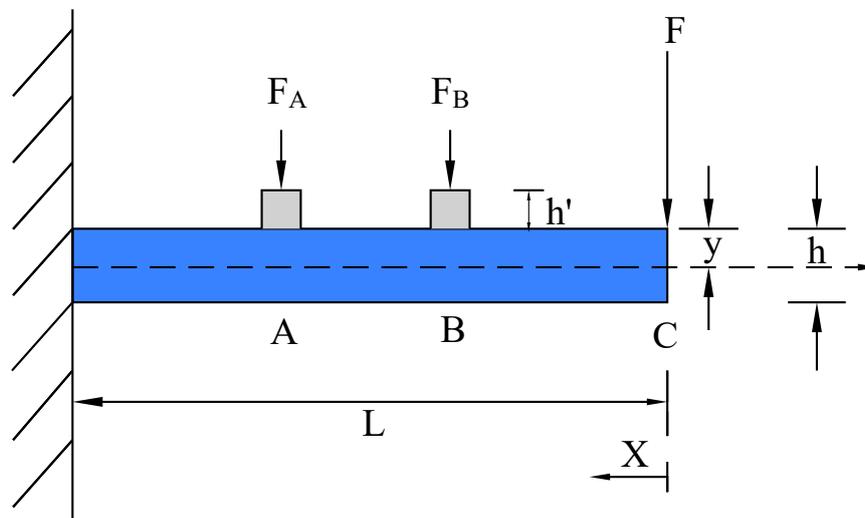


Figura 2.8: Estrutura do transdutor proposto, com suportes A e B de altura h' , espessura h e comprimento L .

Assim como no conceito anterior, uma força de deflexão F será aplicada na extremidade livre da viga. Os suportes A e B são considerados como cargas pontuais F_A e F_B respectivamente, realizando a análise dos esforços cortantes e momento

fletor temos os seguintes diagramas

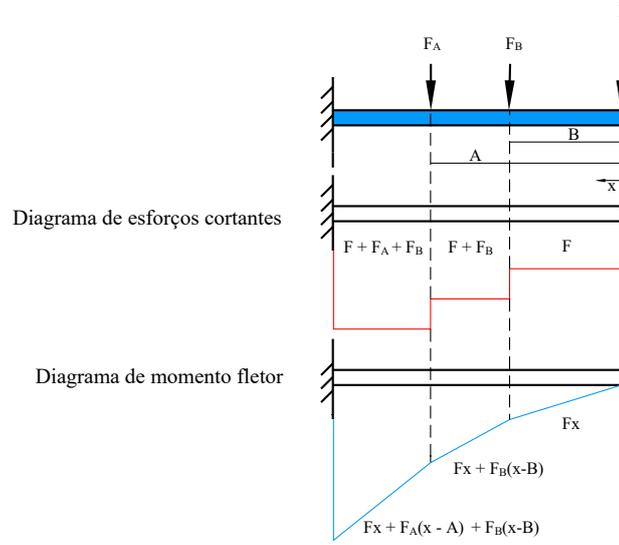


Figura 2.9: Diagramas de esforços cortantes e momento fletor.

Temos que o momento fletor que está agindo ao longo da viga é:

$$M(x) = Fx + F_B(x - B) + F_A(x - A) \quad (2.27)$$

Substituindo a Equação 2.27 em 2.23 temos o *strain* da superfície da viga, expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon(x) = \frac{y}{EI} \left[Fx + F_B(x - B) + F_A(x - A) \right] \quad (2.28)$$

Para medir os deslocamentos relativos de angulação, será utilizado a mesma abordagem que foi apresentada na Figura 2.7. Será fixada uma massa m na extremidade livre e os suportes A e B também passam a agir como forças gravitacionais, $F_A = m_A g \sin(\theta)$ e $F_B = m_B g \sin(\theta)$, assim é obtido o *strain*:

$$\varepsilon(x) = \frac{g \sin(\theta)}{EI} y \left[mx + m_B(x - B) + m_A(x - A) \right] \quad (2.29)$$

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento dos sensores de inclinação. É descrito o sistema, o método de medição, os materiais, equipamentos, método de construção e os testes realizados.

3.1 Descrição

O sensor de inclinação proposto utiliza o método de medição baseado na teoria de viga de Euler-Bernoulli. O deslocamento espectral da FBG é relacionado ao *strain* que a viga sofre.

Um teste preliminar é montado para caracterizar o método de medição proposto e a sua viabilidade. O projeto deste sensor foi baseado na geometria apresentada na Figura 2.5. Foi utilizado uma lâmina de aço inoxidável de perfil retangular para formar a viga.

Para projetar o protótipo final, foram realizados testes em bancada e análise matemática a fim de avaliar a sensibilidade do deslocamento relativo do comprimento de onda ($\Delta\lambda_B$) e diferentes geometrias de viga. O modelo utilizado é apresentado na Figura 2.8. Para a realização desta avaliação foi utilizado uma lâmina de aço carbono SAE 1075 com espessura $h = 0,3$ mm para formar a viga.

Com os resultados dos testes preliminares foi projetado um protótipo compacto no qual um par de FBG é utilizado para realizar medições.

3.2 Metodologia

Nesta seção é apresentado a metodologia de análise dos sensores propostos.

3.2.1 Teste preliminar

Para realizar as medições de *strain* e deslocamento angular é feito a relação entre o $\Delta\lambda_B$ à variável de interesse. A Figura 3.1 apresenta o esquemático do sensor, a FBG será colada no meio da viga.

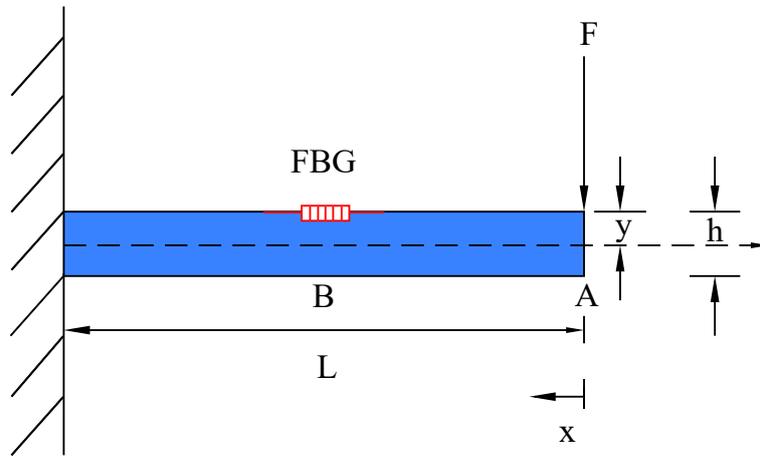


Figura 3.1: Modelo físico do teste preliminar

Para estabelecer o $\Delta\lambda_B$ teórico que a FBG sofre devido deflexões da extremidade livre é substituído a Equação 2.24 em 2.6, assim temos a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \frac{3v}{2L^2}y \quad (3.1)$$

Para estabelecer a relação entre o *strain* induzido pelo deslocamento angular, do modelo apresentado na Figura 2.7, e o $\Delta\lambda_B$ da FBG é substituído a Equação 2.29 em 2.4 assim temos que:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \frac{mg \sin(\theta)L}{2EI}y \quad (3.2)$$

3.2.2 Testes de sensibilidade

Nos testes realizados para avaliar a resposta $\Delta\lambda_B$ para diferentes geometrias de viga e tamanho de suporte é utilizado o modelo físico apresentado na Figura 3.2. A FBG será colada na metade da viga, representado como o ponto O.

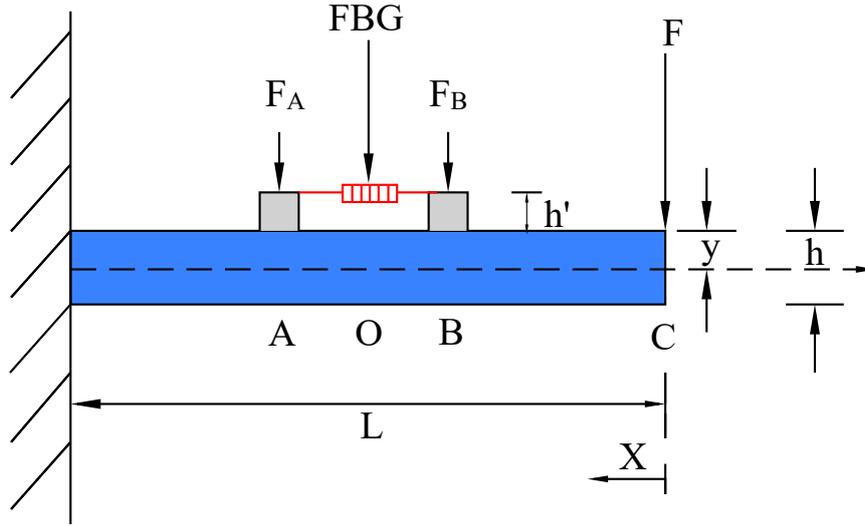


Figura 3.2: Modelo proposto dos testes de sensibilidade.

Analisando os diagramas de esforços cortantes e de momento fletor que foi apresentado na Figura 2.9, temos que somente as forças F e F_B agem no ponto que a FBG será fixada, assim Equação 2.27 é simplificada:

$$\varepsilon = \frac{y}{EI} \left\{ \left(\frac{FL}{2} \right) + \left[F_B \left(\frac{L}{2} - B \right) \right] \right\} \quad (3.3)$$

A Figura 3.3 apresenta a geometria formada entre a FBG, os suportes e a viga. Durante a deflexão, é considerado que o *strain* transferido para FBG é a soma entre a deformação superficial da viga, calculada pela expressão 3.3 mostrada anteriormente, e os incrementos introduzidos pelos suportes $\Delta L'$ e $\Delta L''$.

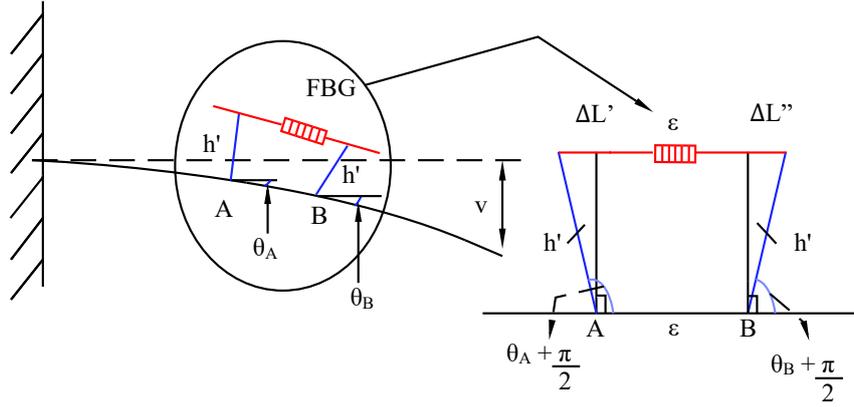


Figura 3.3: *Strain* induzido na FBG quando a deflexão é aplicada.

Durante a flexão de viga é considerado que a estrutura suportes-FBG forma um trapézio isósceles com a superfície e as inclinações θ_A e θ_B são os ângulos de rotação nos respectivos pontos A e B . Assim quando a FBG é esticada pelos suporte o strain induzido é da seguinte forma:

$$\varepsilon_{FBG} = h' \text{sen}(\theta_A) + h' \text{sen}(\theta_B) + \varepsilon \quad (3.4)$$

Resolvendo a Equação 2.12, temos que os ângulos de rotação que as forças F_A , F_B e F produzem isoladamente é dada da seguinte forma:

$$\theta_F = \frac{Fx}{2EI} (2L - x) \quad \text{para o intervalo } (0 < x < L) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \theta_{F_A} &= \frac{F_A x}{2EI} (2A - x) \quad \text{para o intervalo } (0 < x < A) \\ \theta_{F_A} &= \frac{F_A A^2}{2EI} \quad \text{para o intervalo } (A < x < L) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \theta_{F_B} &= \frac{F_B x}{2EI} (2B - x) \quad \text{para o intervalo } (0 < x < B) \\ \theta_{F_B} &= \frac{F_B B^2}{2EI} \quad \text{para o intervalo } (B < x < L) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Utilizando o método da superposição de forças temos que os ângulos de rotação θ_A no ponto $x = A$ e θ_B no ponto $x = B$:

$$\theta_A = \frac{1}{2EI} \left\{ FA(2L - A) + F_B B(2B - A) + (F_A A^2) \right\} \quad (3.8)$$

$$\theta_B = \frac{1}{2EI} \left\{ FB(2L - B) + (F_A A^2) + (F_B B^2) \right\} \quad (3.9)$$

Substituindo as Equações 3.3 3.8 3.9 em 3.4 temos que o *strain* na FBG segue a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{FBG} = h' sen \left\{ \frac{1}{2EI} \left[FA(2L - A) + F_B B(2B - A) + F_A A^2 \right] \right\} + \\ + h' sen \left\{ \frac{1}{2EI} \left[FB(2L - B) + F_A A^2 + F_B B^2 \right] \right\} + \\ + \frac{y}{EI} \left[F \frac{L}{2} + F_B \left(\frac{L}{2} - B \right) \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Por fim substituindo a equação 3.10 em 2.4 é obtido o $\Delta\lambda_B$ do sensor proposto:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \left\{ h' sen \left\{ \frac{1}{2EI} \left[FA(2L - A) + F_B B(2B - A) + F_A A^2 \right] \right\} + \right. \\ \left. + h' sen \left\{ \frac{1}{2EI} \left[FB(2L - B) + F_A A^2 + F_B B^2 \right] \right\} + \right. \\ \left. + \frac{y}{EI} \left[F \frac{L}{2} + F_B \left(\frac{L}{2} - B \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Para estabelecer a relação entre deslocamento angular, uma massa m é fixada na extremidade livre se tornando a força de deflexão F de forma análoga apresentada na seção anterior a expressão do deslocamento é dado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \left\{ h' sen \left\{ \frac{1}{2EI} \left[mg sen(\theta) A(2L - A) + F_B B(2B - A) + F_A A^2 \right] \right\} + \right. \\ \left. + h' sen \left\{ \frac{1}{2EI} \left[mg sen(\theta) B(2L - B) + F_A A^2 + F_B B^2 \right] \right\} + \right. \\ \left. + \frac{y}{EI} \left[mg sen(\theta) \frac{L}{2} + F_B \left(\frac{L}{2} - B \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.2.3 Medição Diferencial

Nesta seção é apresentada a medição proposta para o protótipo final, que será baseado em uma medida diferencial entre um par de FBGs (FBG_1 e FBG_2) que estarão coladas a faces opostas. Quando uma deflexão é aplicada no sistema uma FBG será esticada fazendo que λ_B seja deslocado para valores de comprimento de onda maiores, enquanto que a outra é comprimida deslocando seu λ_B para valores menores de comprimento de onda. O esquemático na Figura 3.4 mostra como o sensor será montado.

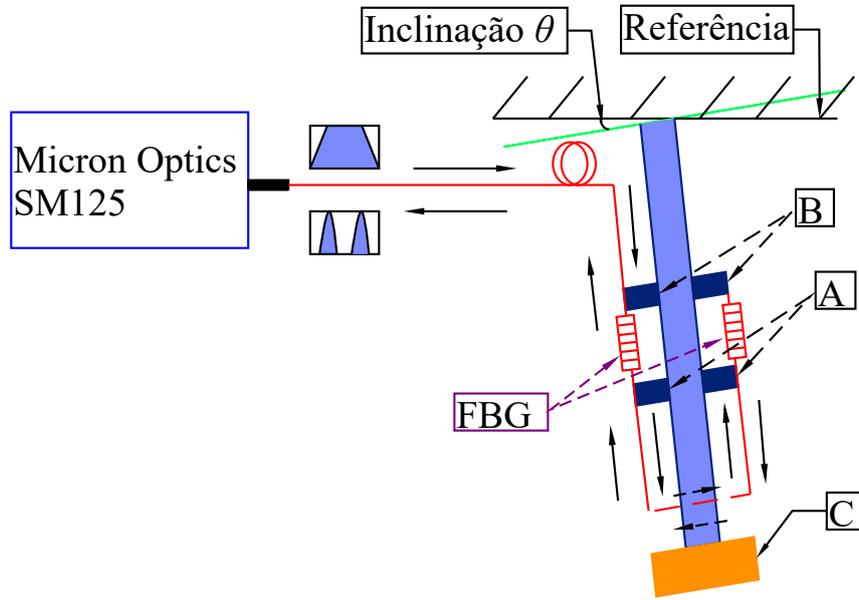


Figura 3.4: Esquemático do sensor modular, A e B são os suportes das FBGs e C a massa responsável pela deflexão da viga.

Da Equação 2.6 é obtido expressão do deslocamento $\Delta\lambda_{B_1}$ da FBG_1 da seguinte forma:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_1}}{\lambda_{B_1}} = (1 - p_e)\varepsilon_1 \quad (3.13)$$

e para FBG_2 :

$$\frac{\Delta\lambda_{B_2}}{\lambda_{B_2}} = (1 - p_e)\varepsilon_2 \quad (3.14)$$

A expressão diferencial teórica é obtida realizando a subtração da Equação 3.13 de 3.14:

$$\Delta\lambda = (1 - p_e)\varepsilon_1\lambda_{B1} - (1 - p_e)\varepsilon_2\lambda_{B2} \quad (3.15)$$

considerando $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$ temos a expressão diferencial:

$$\Delta\lambda = (1 - p_e)(2\varepsilon_1)(\lambda_{B1} + \lambda_{B2}) \quad (3.16)$$

3.2.4 Metodologia de compensação térmica

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento matemático para discriminar os efeitos térmicos e mecânicos a que o sensor será submetido. O desenvolvimento teórico será baseado no par diferencial de sensores FBG, conforme foi mostrado no esquemático representado na Figura 3.4. Caracterizando o deslocamento relativos $\Delta\lambda_B$ das FBGs da seguinte maneira, temos que:

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = (1 - p_e)\varepsilon_1 + K_1\Delta T \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (1 - p_e)\varepsilon_2 + K_2\Delta T \quad (3.18)$$

sendo K_1 e K_2 as sensibilidades térmicas das respectivas FBGs. Multiplicando a Equação 3.18 pelo fator K_1/K_2 temos:

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \frac{K_1}{K_2} = (1 - p_e)\varepsilon_2 \frac{K_1}{K_2} + K_2\Delta T \frac{K_1}{K_2} \quad (3.19)$$

considerando $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$ e realizando a subtração da Equação 3.19 pela 3.17 é obtido a expressão da variação de *strain* ε_1 :

$$\varepsilon_1 = \frac{\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \frac{K_1}{K_2}}{(1 - p_e)(1 + \frac{K_1}{K_2})} \quad (3.20)$$

Substituindo a Equação 3.20 em 3.17 é determinada a variação térmica ΔT :

$$\Delta T = \frac{1}{K_1} \frac{\Delta \lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\frac{\Delta \lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta \lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \frac{K_1}{K_2}}{\left(1 + \frac{K_1}{K_2}\right) K_1} \quad (3.21)$$

3.3 Materiais e Equipamentos

3.3.1 FBGs utilizadas

As FBGs utilizadas, cujos λ_B são 1535,510 nm, 1550,558 nm 1549,365 nm e 1551,763 nm, foram gravadas no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) com o auxílio de um *laser* de argônio modelo 300 *C MotoFreD* da fabricante *Coherent* e um *laser* neodímio YAG (Nd:YAG). Foi utilizado dois *lasers* diferentes para inscrição de FBGs, pois durante o desenvolvimento deste trabalho o *laser* de argônio apresentou problemas e necessitou de reparos do fabricante, logo o *laser* Nd:YAG se tornou alternativa. O espectro da FBG inscrita pela técnica interferométrica da máscara de fase e o *laser* de argônio modelo pode ser visualizado na Figura 3.5.

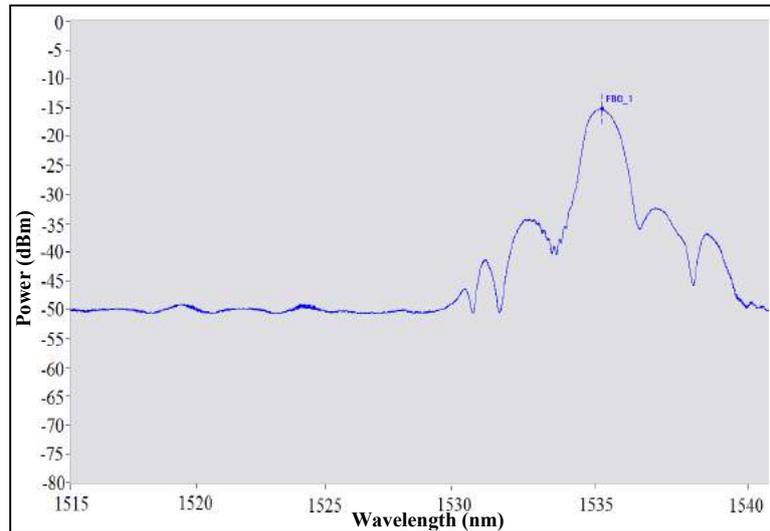


Figura 3.5: Espectro de reflexão da FBG fabricada pelo *laser* argônio.

Para a caracterização do transdutor de tamanho reduzido foi utilizado uma FBG, fabricada pela técnica interferométrica da máscara de fase em conjunto de um *laser* (Nd:YAG) de estado sólido modelo *Brilliant B* da fabricante *Quantel*. Esta FBG

que está centrada em 1550,558 nm é mostrada na Figura 3.6.

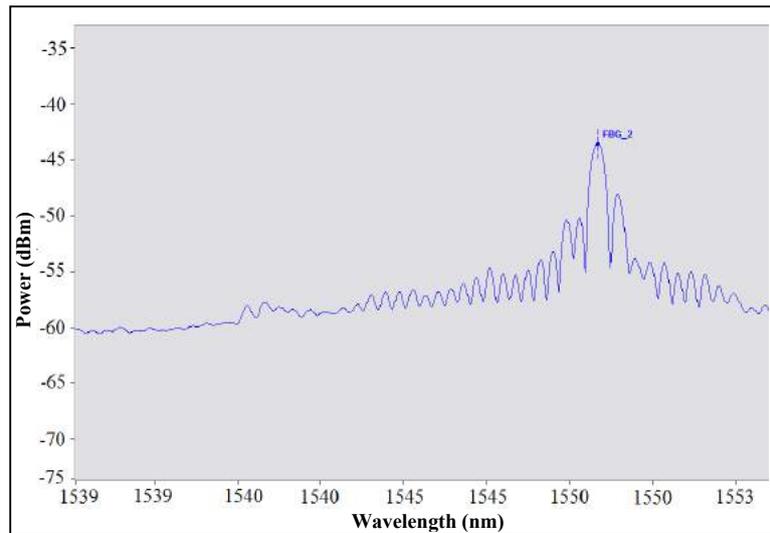


Figura 3.6: Espectro de reflexão da FBG fabricada pelo laser Nd:YAG.

Para a construção do protótipo final foi utilizado um par de FBGs inscrito em uma única fibra óptica. A Figura 3.7 mostra o espectro deste *array*, que está centrado no comprimento de onda λ_B em 1549,365 nm e 1551,763 nm. Utilizar um par de FBGs em uma única fibra se torna vantajoso pois reduz a quantidade de emendas que será necessário realizar, facilitando a montagem experimental.

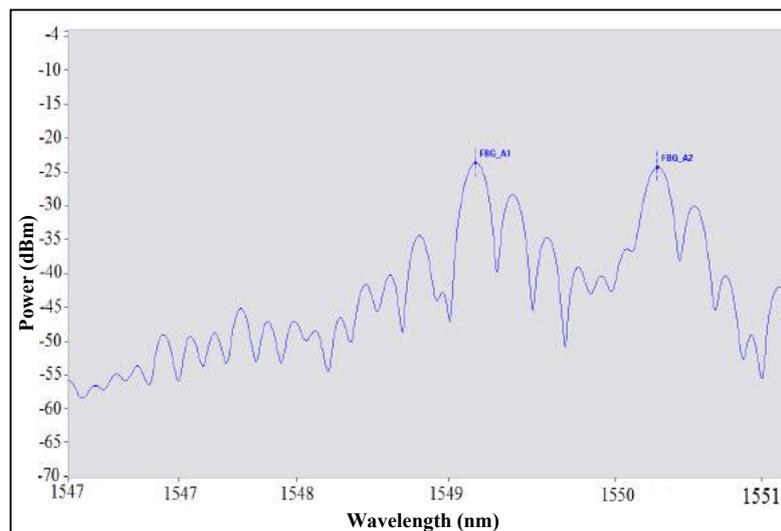


Figura 3.7: Espectro de reflexão de duas FBGs inscritas em uma única fibra óptica fabricada pelo laser Nd:YAG.

É perceptível que as FBGs fabricadas pelo *laser* Nd:YAG apresentam uma maior

incidência de lóbulos laterais em comprimentos de onda adjacentes, quando comparadas às FBG fabricadas no *laser* de argônio. Como a técnica de inscrição de FBG pelo *laser* de Nd:YAG ainda está na fase de desenvolvimento no LIF, estas inconsistências se tornam aparentes.

3.3.2 Interrogação óptica e Interrogador

Para determinar os parâmetros de uma FBG tais como: λ_B , a largura espectral FWHM (*Full Width at Half Maximum*), em geral é utilizado um analisador de espectro óptico (OSA), um circulador óptico e uma fonte de luz de banda larga, como mostrado no diagrama da Figura 3.8.

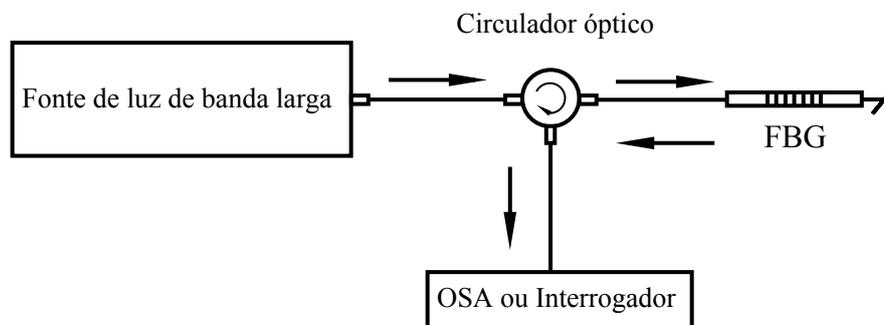


Figura 3.8: Interrogação de uma FBG por um OSA ou outro dispositivo interrogador.

Um interrogador óptico *Micron Optics* modelo sm125, mostrado na Figura 3.9, foi utilizado para acompanhar os deslocamentos espectrais das FBG utilizadas. Este equipamento possui quatro canais ópticos com conexão FC/APC, uma porta de comunicação *Ethernet* para conectar o equipamento a um computador e utiliza o software ENLIGHT como interface para mostrar as informações da interrogação. O interrogador tem como frequência máxima de operação 2 Hz, faixa de operação 1510 nm a 1590 nm, acurácia de 1 pm e repetibilidade de 0,5 pm operando em 1 Hz, 0,2 pm em 0,1 Hz.



Figura 3.9: Interrogador óptico sm125 Micron Optics. Fonte: Micron Optics.

3.4 Montagens Experimentais

3.4.1 Montagem Preliminar

Para aferir a validade do método de medição proposto, foram realizados testes preliminares que consistiram em defletir a lâmina de aço inoxidável e realizar a medição de λ_B de uma FBG. A FBG foi colada na mediana da lâmina de aço inox, conforme mostrado no esquemático na Figura 3.10.

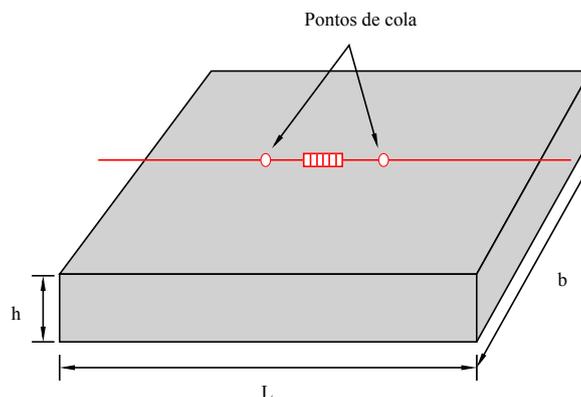


Figura 3.10: Representação esquemática da colagem da FBG na superfície da lâmina.

Para realizar a fixação da FBG na superfície da lâmina de aço foi utilizado uma mesa óptica para fixação das peças mecânicas, um conjunto posicionador mecânico para segurar o transdutor, um micrômetro para esticar a FBG e o interrogador para acompanhar o deslocamento de λ_B . Inicialmente foi necessário remover a casca de

proteção nos pontos de fixação da fibra para obter melhor aderência entre a superfície da lâmina de aço, a cola e a fibra óptica.

Para fixar à FBG a superfície do transdutor, foi utilizado cola à base de cianoacrilato Henkel Loctite 401. O arranjo mecânico montado é mostrado na Figura 3.11, onde é possível observar que a lâmina de aço foi imobilizada pelo posicionador mecânico para que não se mova durante o procedimento. Primeiramente um ponto da fibra óptica foi colada na superfície e a outra extremidade foi fixada no micrômetro para que seja previamente tensionada, procedimento para assegurar que a FBG acompanhe as deformações que a viga de aço sofre. Conforme é reportado na tese de doutorado de Ribeiro [42], a FBG não pode sofrer deslocamentos maiores que 3,5 nm, para deslocamentos maiores a FBG pode ser danificada.

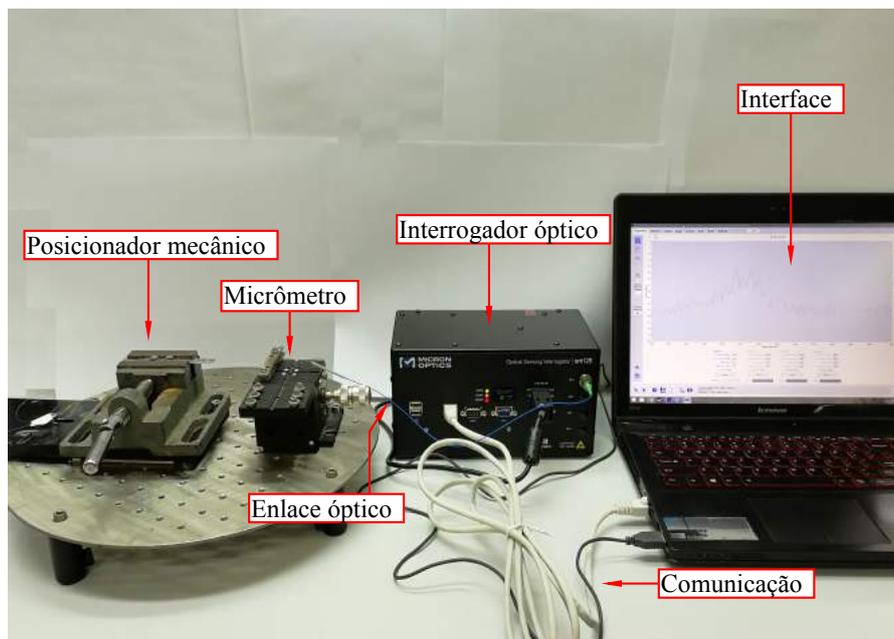


Figura 3.11: Esquemático mecânico para a fixação da FBG.

Para garantir uma camada homogênea de cola, foi utilizado um pedaço de fita adesiva que foi colada e pressionada em cima dos pontos de fixação, uma técnica que foi desenvolvida e testada no LIF. Este passo é importante para que a FBG não sofra perda de tensão excessiva durante o período de cura da cola. O resultado final deste procedimento pode ser observado pela Figura 3.12.

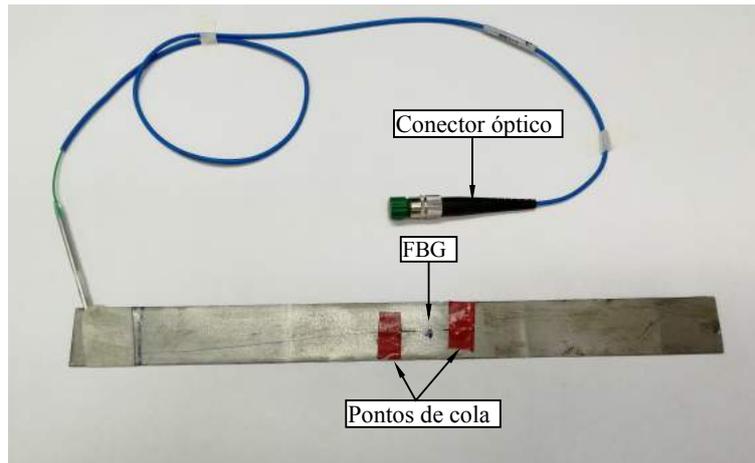


Figura 3.12: Sensor utilizado para testes preliminares.

3.4.2 Montagem do sensor proposto

Nesta seção é apresentado o método utilizado para a montagem do transdutor compacto. Para aumentar a sensibilidade de *strain* da FBG apresenta, é proposto que a FBG seja colada a uma altura h' distante da superfície da lâmina, conforme foi desenvolvido matematicamente na seção anterior. Primeiramente dois suportes, que são compostos por um conjunto de lâminas de aço carbono empilhadas, foram fixados à superfície da viga de aço. Após a construção desta viga, a FBG foi colada na superfície destes dois suportes, foi utilizado o mesmo procedimento descrito na seção anterior para realizar a fixação. Ilustrado na Figura 3.13 um esquemático do sensor proposto.

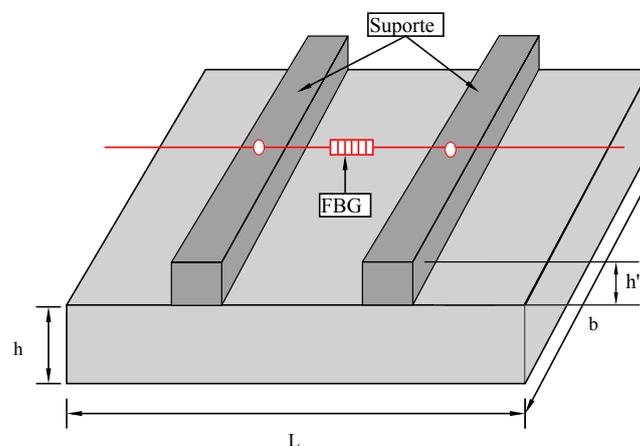


Figura 3.13: Esquemático do posicionamento da fixação da FBG.

Capítulo 4

Resultados Experimentais e Discussões

Neste capítulo são descritos experimentos realizados, resultados e discussões sobre os dados obtidos.

4.1 Testes experimentais

4.1.1 Teste preliminar

O experimento preliminar é apresentado na Figura 4.1, em que o interrogador é responsável por monitorar o espectro refletido pela FBG, que teve o λ_B deslocado em 2 nm. Foi escolhida uma barra de aço inox com dimensões $L = 225 \text{ mm} \times b = 24 \text{ mm} \times h = 0,64 \text{ mm}$ (comprimento \times largura \times espessura) para ser o elemento mecânico e um paquímetro é utilizado para a aferição de deflexões no sensor.

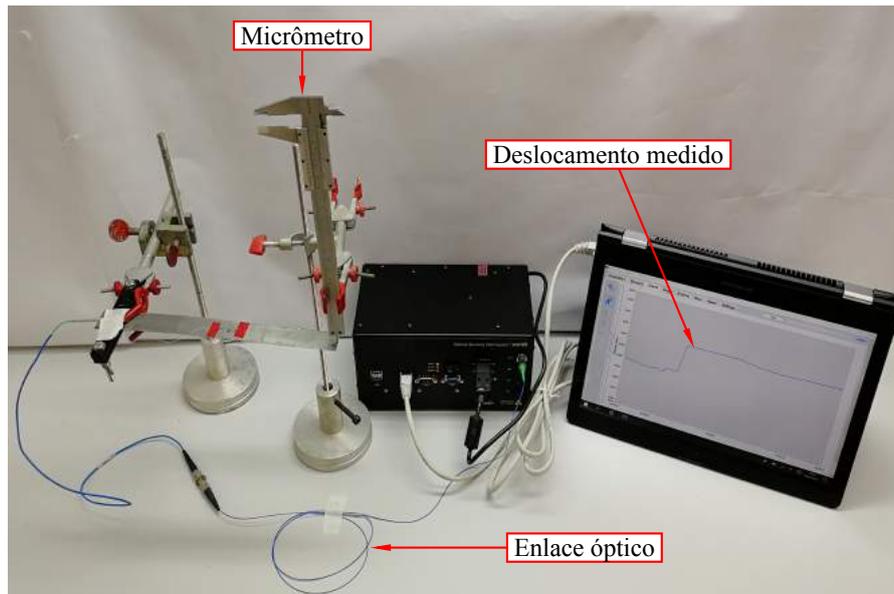


Figura 4.1: Teste de deslocamento, uma deflexão é inserida pelo paquímetro.

Substituindo esses valores na Equação 3.1 temos que o comportamento teórico é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda_B = 0,01137v + 1537,447 \quad (4.1)$$

v a deflexão que a viga sofre. A Figura 4.2 apresenta os resultados obtidos pelos experimentos, onde a reta contínua preta representa o comportamento teórico obtida pela Equação 4.1, enquanto que os pontos vermelhos são os dados obtidos pelo interrogador óptico. Realizando uma regressão linear dos dados experimentais temos as seguintes características: sensibilidade prática 12,720 pm/mm e o coeficiente de correlação $R^2 = 0,998$, enquanto que a sensibilidade encontrada pela teoria é de 11,370 pm/mm. Pôde-se aferir que o sensor apresentou um comportamento linear conforme pode ser verificado com o coeficiente R^2 .

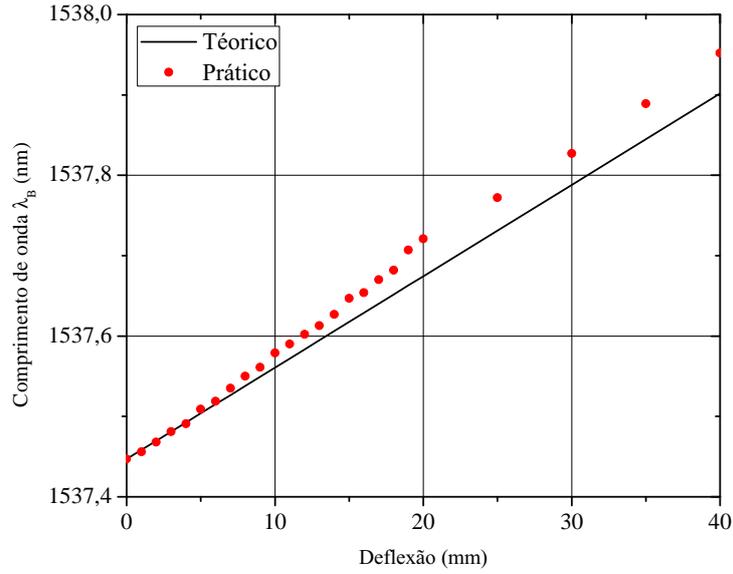


Figura 4.2: Deslocamento que a FBG sofre de acordo com a deflexão sofrida na extremidade livre.

É perceptível que o resultado prático apresentou maior sensibilidade quando comparado com o que se esperava pelos cálculos teóricos. Isto vem do fato de que a FBG está mais distante da linha neutra que a superfície da barra, considerando o desenho da Figura 3.1 e refazendo os cálculos e estimando que a FBG está distanciada $62,5 \mu\text{m}$ da superfície da viga, distância entre o núcleo da fibra e o conjunto formado pela camada de cola usada para fixação e a casca de proteção do núcleo da fibra. Assim, obtemos a seguinte expressão teórica:

$$\lambda_B = 0,01367v + 1537,447 \quad (4.2)$$

Na Figura 4.3 é apresentada a reta teórica considerando a distância supracitada. Nota-se que o sensor proposto se comporta exatamente como o modelo previsto na teoria.

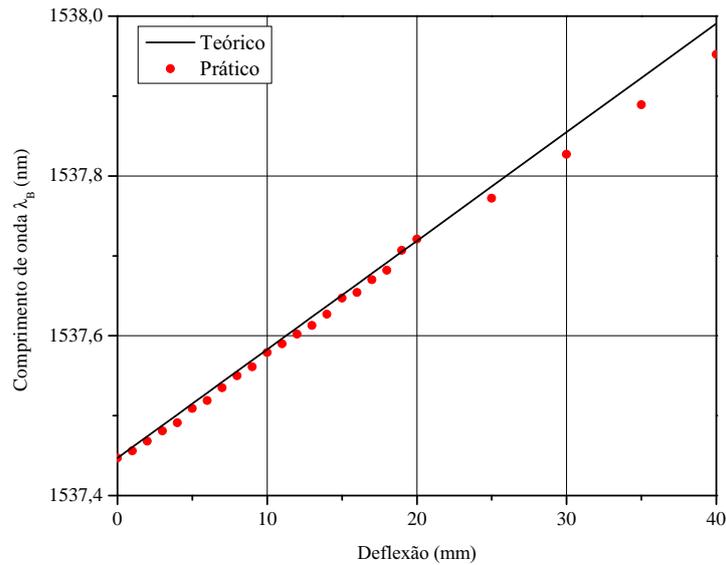


Figura 4.3: Deslocamento recalculado considerando a distância entre o núcleo da fibra e a superfície da placa.

Para realizar as medições de deslocamentos angulares relativos, o sensor foi fixado em uma base de referência de inclinação 0° e uma massa conhecida $m = 24,40$ g que foi fixada na extremidade livre, que tem a função de defletir a viga. A nova montagem experimental utilizada é apresentada na Figura 4.4.

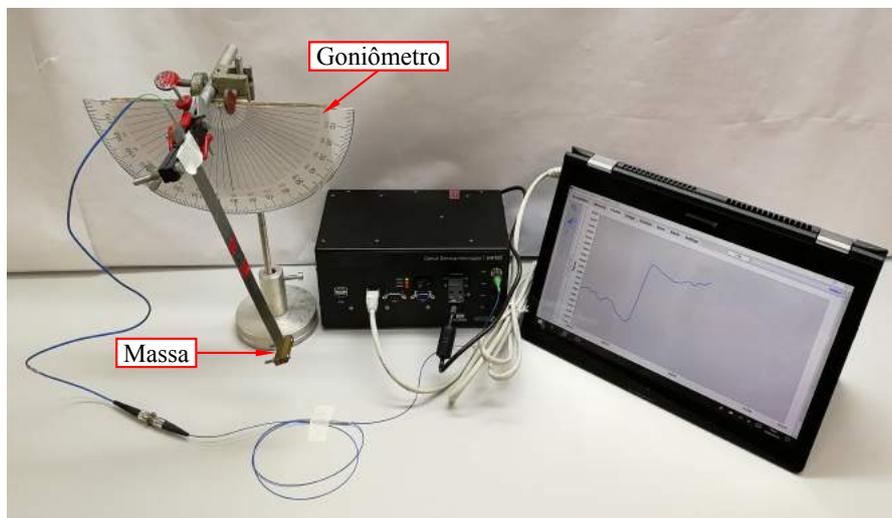


Figura 4.4: Teste experimental do sensor de inclinação.

O experimento consistiu em rotacionar o posicionador mecânico que fixa o sensor no sentido horário e anti-horário, formando diferentes inclinações. Quando uma inclinação é aplicada no sistema a gravidade age na massa e surge uma força peso que gera deflexão na viga.

Substituindo os valores na Equação 3.2, é obtido a expressão teórica que relaciona o deslocamento $\Delta\lambda_B$ ao ângulo de inclinação θ , sendo o módulo de elasticidade do material $E = 200$ GPa e o momento de inércia da seção transversal da barra $I = \frac{bh^3}{12}$.

Pode-se verificar que a FBG é capaz de acompanhar as deformações que a superfície da barra sofre, como pode ser observado na Figura 4.5. A linha representada em preto é o comportamento teórico esperado, enquanto os pontos representados em vermelho são os dados obtidos no experimento.

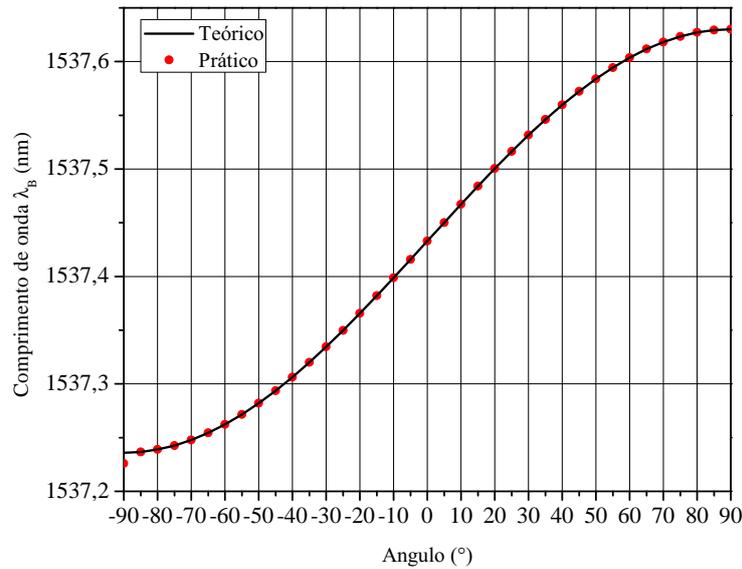


Figura 4.5: Deslocamento que a FBG sofre com diferentes inclinações.

4.1.2 Testes de sensibilidade do sensor proposto

Foi utilizado o mesmo *set-up* experimental apresentado na Figura 4.1 para conduzir os experimentos para definição das sensibilidades práticas da FBG em diferentes alturas h' do suporte, quando são aplicados deflexões na extremidade livre do sensor. Para a construção da jiga de teste foi utilizada uma lâmina de aço carbono SAE 1075 de comprimento $L = 120$ mm, largura $b = 30$ mm, espessura $h = 0,3$ mm e uma FBG que é fixa nos suportes, que estão alocados nos pontos $A = 54$ mm e $B = 72$ mm.

É ilustrado na Figura 4.6 o comportamento do deslocamento da FBG em diferentes alturas h' . Os testes para $h' = 1$ mm são iniciados com a FBG centrada em

$\lambda_B = 1537,438$ nm, para $h' = 2,4$ mm iniciados em $\lambda_B = 1537,794$ nm e $h' = 3,2$ mm iniciados em $\lambda_B = 1537,1855$ nm. Sendo que y é o λ_B refletido pela FBG e x a deflexão em mm que a viga sofre.

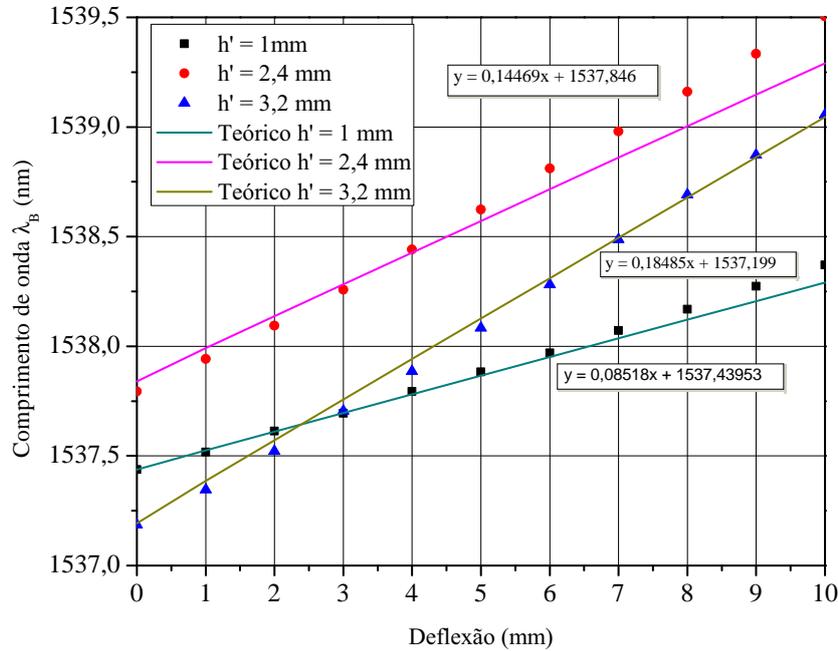


Figura 4.6: Comportamento do comprimento de onda refletido em diferentes alturas h' .

Nos resultados apresentados na Figura 4.6 temos as seguintes sensibilidades experimentais: 93 pm/mm para $h' = 1 \text{ mm}$, 173 pm/mm para $h' = 2,4 \text{ mm}$ e 190 pm/mm para $h' = 3,2 \text{ mm}$. Resultados que se assemelham com a teoria proposta.

Comparando os resultados apresentados nas Figuras 4.3 e 4.6 podemos concluir que quanto mais afastada a FBG está da superfície da viga, maior será o $\Delta\lambda_B$ sofrido.

Afim de verificar a influência de diferentes geometrias da viga-teste na sensibilidade prática, foi realizada uma série de testes do pêndulo inclinométrico, seguindo o *set-up* experimental utilizado na seção anterior ilustrado na Figura 4.4. Nesta caracterização foi utilizado uma massa $m_c = 24,88$ g, em que a altura dos suportes é fixa $h' = 3,2$ mm, o comprimento da viga será fixado em $L = 120$ mm enquanto que a largura do perfil b é alterada. A Figura 3.13 ilustra o perfil da viga.

Na Figura 4.7 são apresentados os deslocamentos $\Delta\lambda_B$ experimentais que a FBG sofrem no intervalo de 0° a 40° , para diferentes comprimentos da base do perfil da viga.

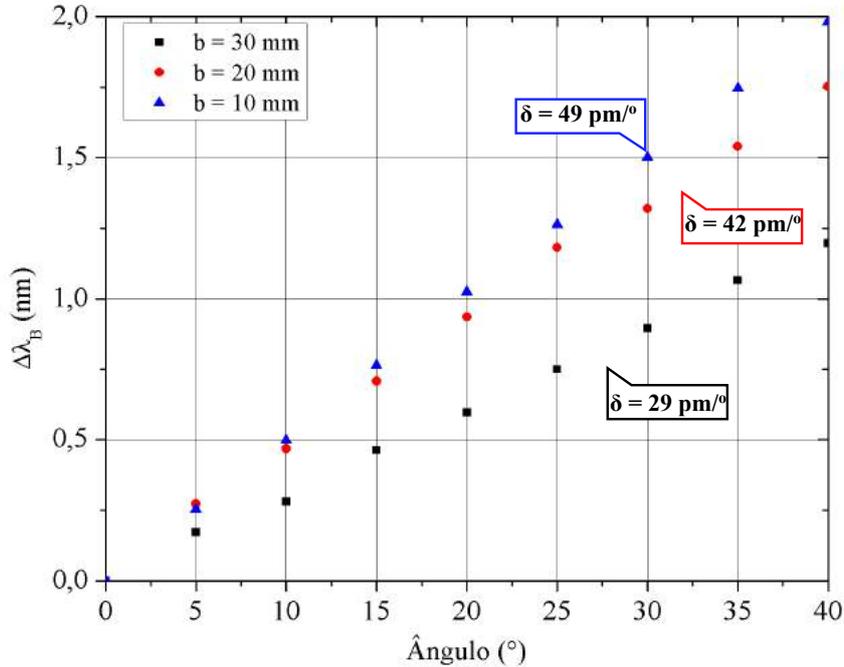


Figura 4.7: Análise $\Delta\lambda_B$ quando é variado o comprimento b , δ o coeficiente angular

Com os resultados obtidos na Figura 4.7 pode-se concluir que quanto menor a largura do perfil, maior será o deslocamento que a FBG sofrerá, pois o *strain* superficial da viga é inversamente proporcional à largura b , fato que pode ser observado na Equação 3.3 e nos resultados obtidos.

4.2 Protótipo Final

Para a construção do protótipo final, foi utilizada uma lâmina de aço SAE 1075 com seção transversal retangular de comprimento $L = 80$ mm, largura $b = 10$ mm, espessura $h = 0,3$ mm, altura do suporte $h' = 3,2$ mm de massas $m_A = m_B = 0,63$ g e a massa responsável por defletir o pêndulo $m_C = 12,40$ g. O par de FBGs são pré-tensionadas para os seguintes valores de comprimento de onda: 1551,440 nm e 1551,690 nm e fixadas aos suportes, conforme mostrado na Figura 3.4.

A Figura 4.8 mostra a caracterização de bancada realizada, na qual o sensor foi fixado em um goniômetro Micro-controlado produzido pela empresa Newport.

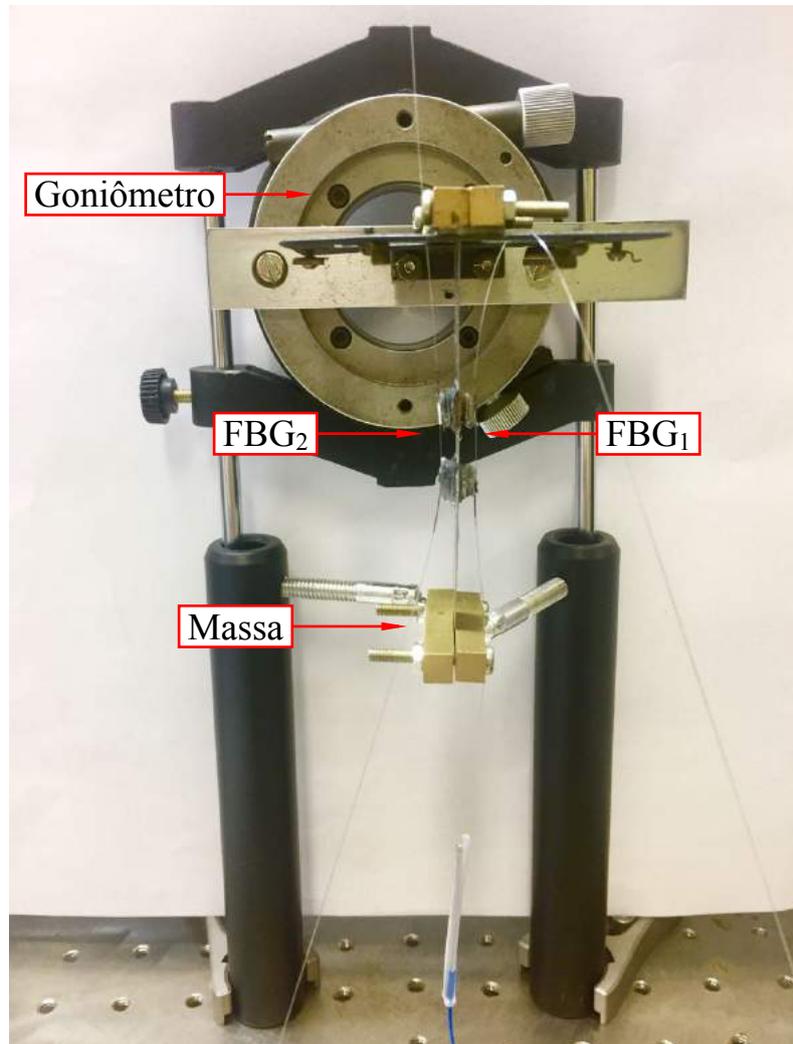


Figura 4.8: Calibração do transdutor do protótipo final realizado em bancada.

A regressão linear dos dados experimentais, que é representada pelas retas vermelhas, apresenta coeficientes angulares para FBG_1 e FBG_2 de $20 \text{ pm}/^\circ$ e $-19 \text{ pm}/^\circ$ respectivamente, conforme é apresentado na Figura 4.9, onde o comportamento teórico previsto pela Equação 3.11 é apresentado pelas retas azuis.

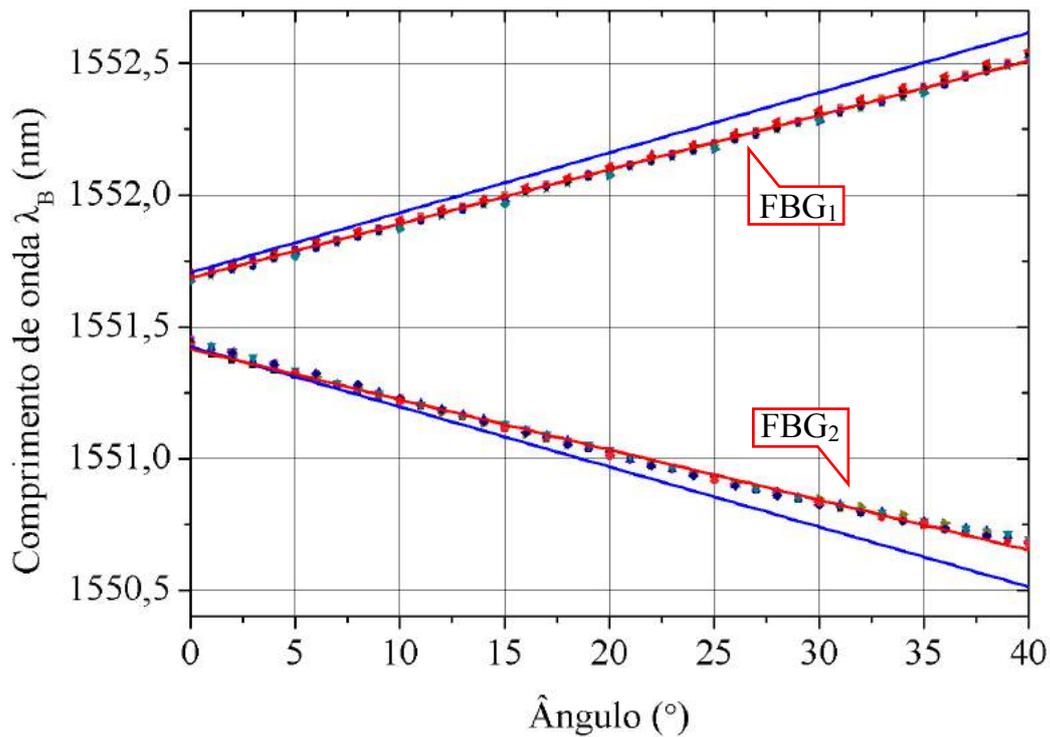


Figura 4.9: Comprimento de onda λ_B em diferentes inclinações.

Devido os efeito elevado do módulo de elasticidade da fibra de sílica que compete com o comportamento que é relativamente elástico do conjunto viga-suportes, resultando em uma menor transferência de *strain* para o par de FBGs, conforme indicado na Figura 4.9.

Na Figura 4.10 é apresentado a resposta diferencial, resultado da diferença entre λ_B da FBG₁ e FBG₂. Realizando a regressão linear destes pontos, que é indicado pela reta vermelha, obtivemos um coeficiente de inclinação 39,74 pm/° enquanto o teórico dado pela Equação 3.16 é de 44 pm/° representado pela reta azul.

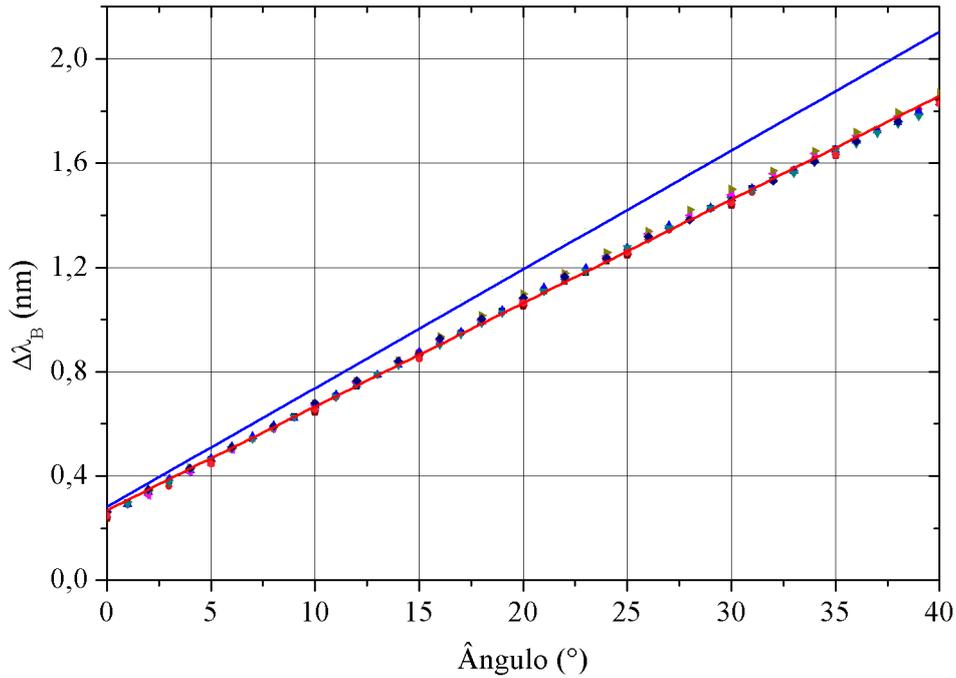


Figura 4.10: Medição diferencial de inclinação.

Outro fato que deve ser destacado é a camada não uniforme de cola nos pontos de fixação dos sensores FBGs ao transdutor que influencia na transferência de *strain* que a fibra deve receber. Estes efeitos são mais pronunciados no gráfico apresentado na Figura 4.10, pois os erros e dispersões de leitura dos dados de ambas FBGs estão acumulados. Apesar destas imperfeições, o sensor apresentou um comportamento linear indicado pelo coeficiente $R^2 = 0,9984$.

Após realizadas as calibrações, o sensor foi encapsulado em uma caixa compacta de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), um termoplástico leve e rígido, fabricada em uma impressora 3D.

O protótipo final, que é composto por um conjunto de conectores e adaptadores ópticos do tipo FC/APC e o transdutor de inclinação que forma um pêndulo na estrutura, é apresentado na Figura 4.11. O sensor montado tem como características finais as dimensões de $192 \text{ cm} \times 4,1 \text{ cm} \times 4,9 \text{ cm}$ e o peso de $136,56 \text{ g}$.

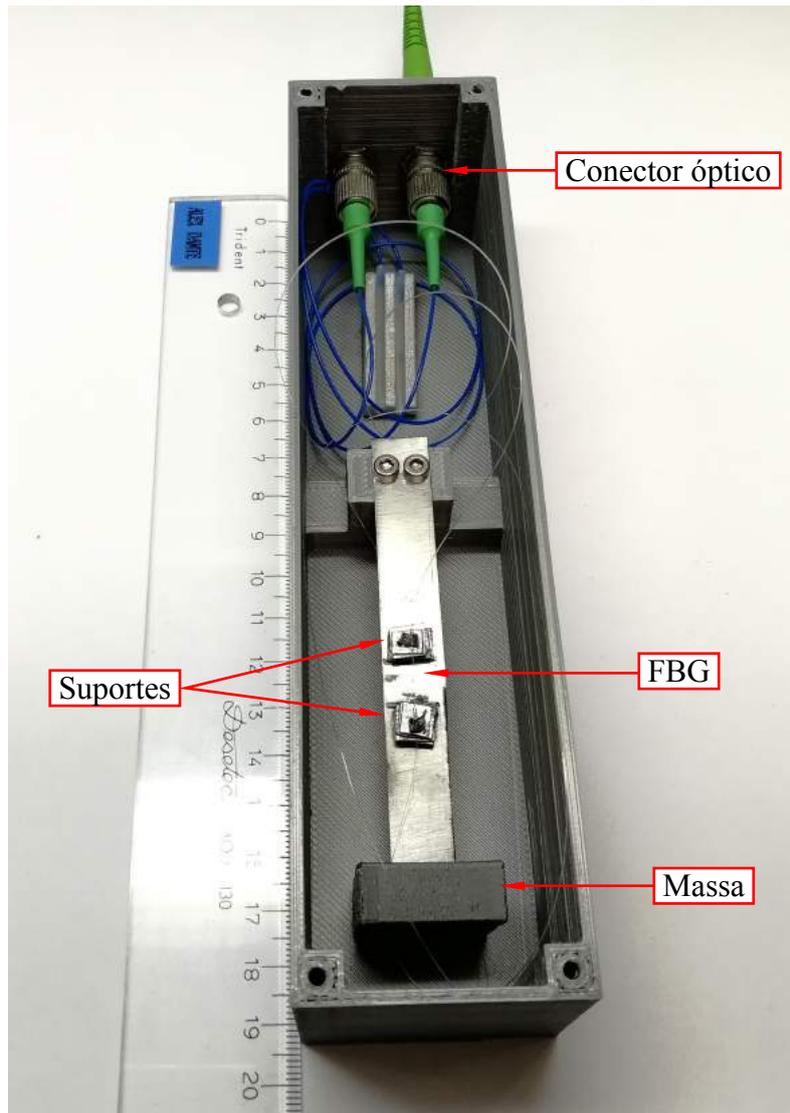


Figura 4.11: Protótipo final montado em laboratório.

O sistema de medição em tempo real de inclinações é mostrado na Figura 4.12. No esquema é ilustrado o sentido e direção que o sensor opera, a resposta do sistema de medida quando uma inclinação de 10° é monitorada em tempo real e mostrada na tela do computador.

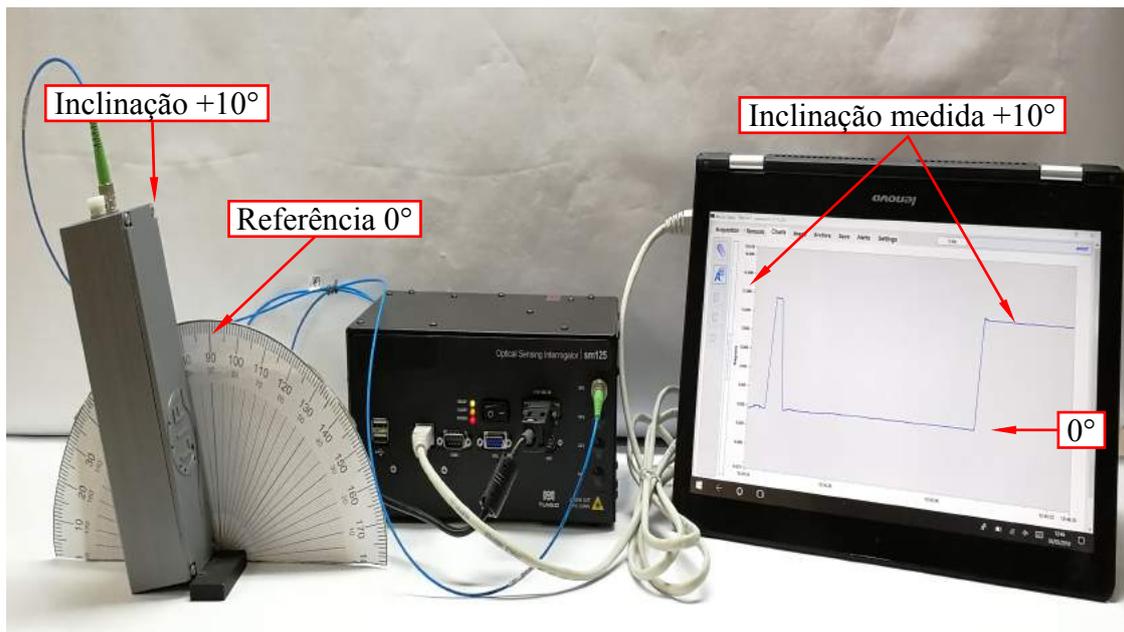


Figura 4.12: Sistema de medição em tempo real, no monitor é mostrado a leitura de 10°.

A Figura 4.13 mostra a comparação entre as medições do sensor e a referência. A equação que é utilizada para a obter a leitura de ângulos é dado por:

$$\theta = 60,747\Delta\lambda + 57,57345 \quad (4.3)$$

obtida substituindo os valores na Equação 3.16. Sendo $\Delta\lambda$ a medida diferencial entre as FBG_1 e FBG_2 e o resultado θ o valor da inclinação que é medida.

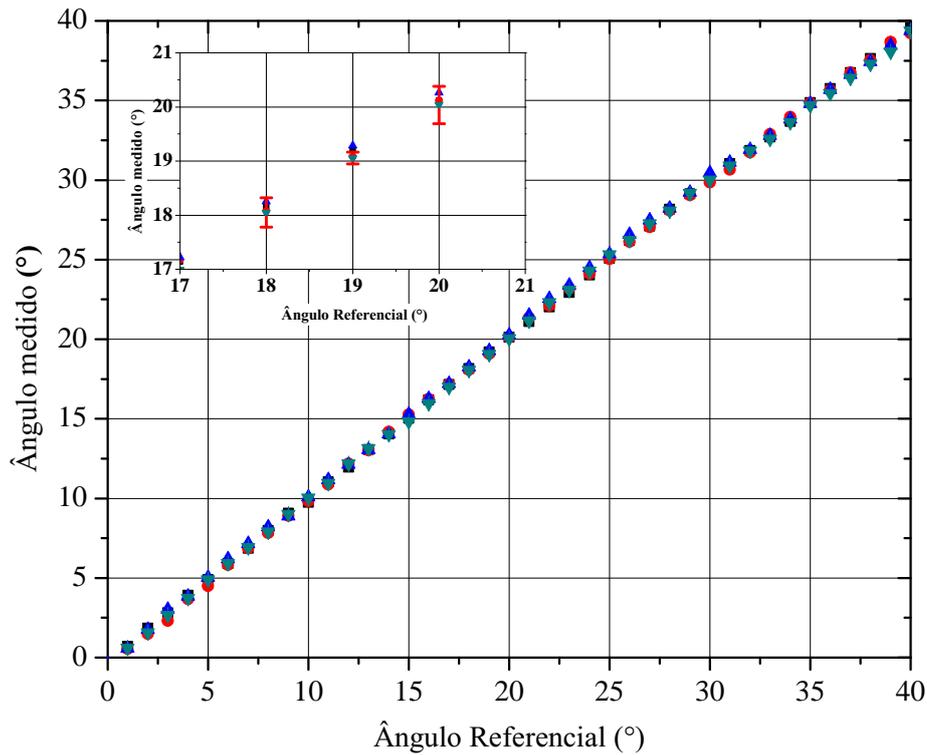


Figura 4.13: Comparação entre as medidas de ângulo e a referência. No detalhe é mostrada a dispersão dos dados no intervalo entre 17° e 21°.

Na Figura 4.13 são apresentadas as barras de erros e a dispersão das leituras realizadas no intervalo 17° a 21°. Realizando uma análise dos dados obtidos e considerando uma distribuição normal no intervalo de confiança de 95%, temos que a dispersão das medidas é de $\pm 0,46^\circ$ e linearidade é obtida conforme é indicado pelo coeficiente $R^2 = 0,99905$ na faixa de operação 0° a +40° em temperatura ambiente de 23 °C. O sensor apresentou como características de medição uma repetibilidade de $\pm 0,025^\circ$ e precisão de $\pm 0,46^\circ$.

4.2.1 Caracterização térmica

Para realizar a caracterização térmica, o sensor foi submetido a diferentes temperaturas dentro de uma estufa conforme é mostrado na Figura 4.14, em que foi utilizado um termopar SDL200 para monitorar a variação térmica.



Figura 4.14: Calibração térmica do sensor.

Essa caracterização térmica foi feita para verificar o comportamento do conjunto sensor-encapsulamento ao longo da faixa térmica de 25°C a 50°C, cujos resultados são apresentados na Figura 4.15.

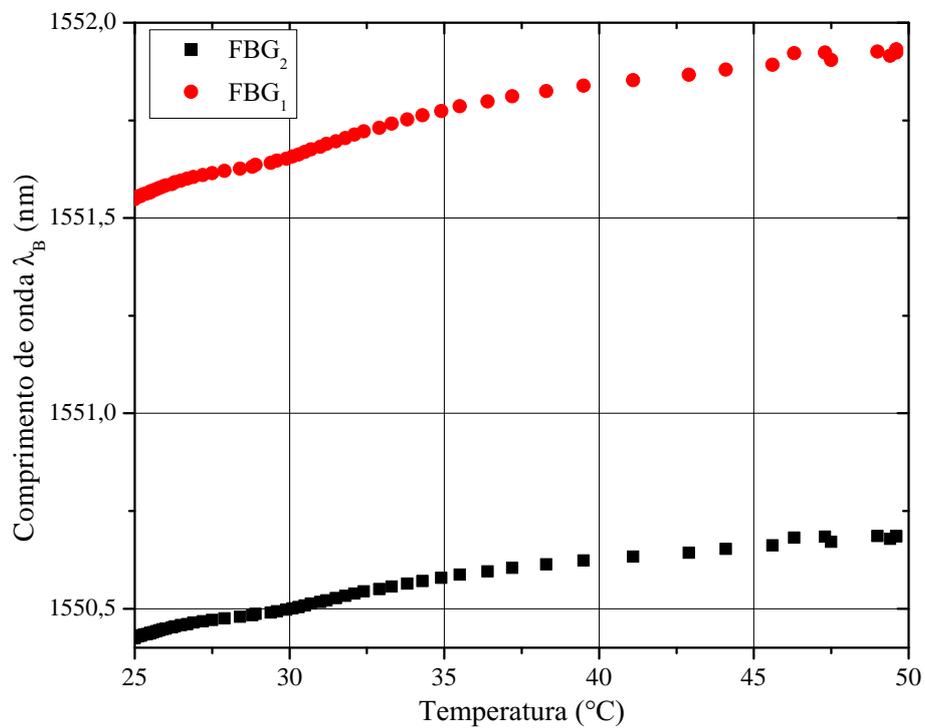


Figura 4.15: Caracterização térmica feita na faixa de 25° a 50°.

As FBGs apresentaram os seguintes coeficientes térmicos: 15 pm/°C para FBG₁ e 11 pm/°C para FBG₂. Embora as FBGs estejam na mesma temperatura, diferentes

λ_B apresentam diferentes sensibilidades conforme pode ser observado na Equação 2.7, isto é quanto maior o λ_B , maior é a sensibilidade térmica.

Para ajustar o valor λ_B das duas FBGs livres do efeito térmico, basta analisar o valor inicial e compensar com informações obtidas pela Equação 3.21, assim temos os seguintes valores:

$$\lambda_{B1cal} = \lambda_{B1} - K_1\Delta T \quad (4.4)$$

$$\lambda_{B2cal} = \lambda_{B2} - K_2\Delta T \quad (4.5)$$

com λ_{B1} e λ_{B2} o valor obtido pelo interrogador. O valor diferencial que deve ser utilizado na Equação 4.3 passa a ser:

$$\Delta\lambda_{cal} = \lambda_{B1cal} - \lambda_{B2cal} \quad (4.6)$$

Uma vez ajustados os valores, o sensor foi submetido a três condições de trabalho. O primeiro teste foi realizado na faixa de 35 °C a 45 °C com o sensor em repouso, 51 °C a 57 °C com uma inclinação referenciada em +10° e no intervalo de 25 °C a 50 °C referenciado em -14°. As Figuras 4.16, 4.17, 4.18 apresentam as leituras realizadas, em que os pontos representados pela cor vermelha representam os dados que não foram compensados termicamente enquanto que os pontos pretos são os dados compensados.

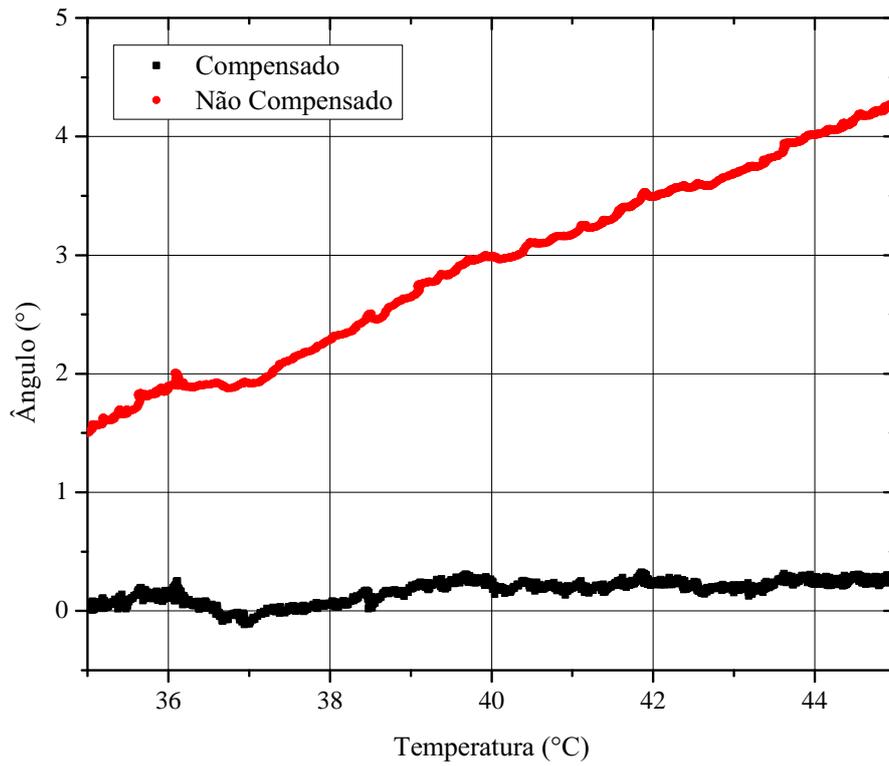


Figura 4.16: Caracterização térmica na faixa de 35 °C a 45 °C com o sensor em repouso.

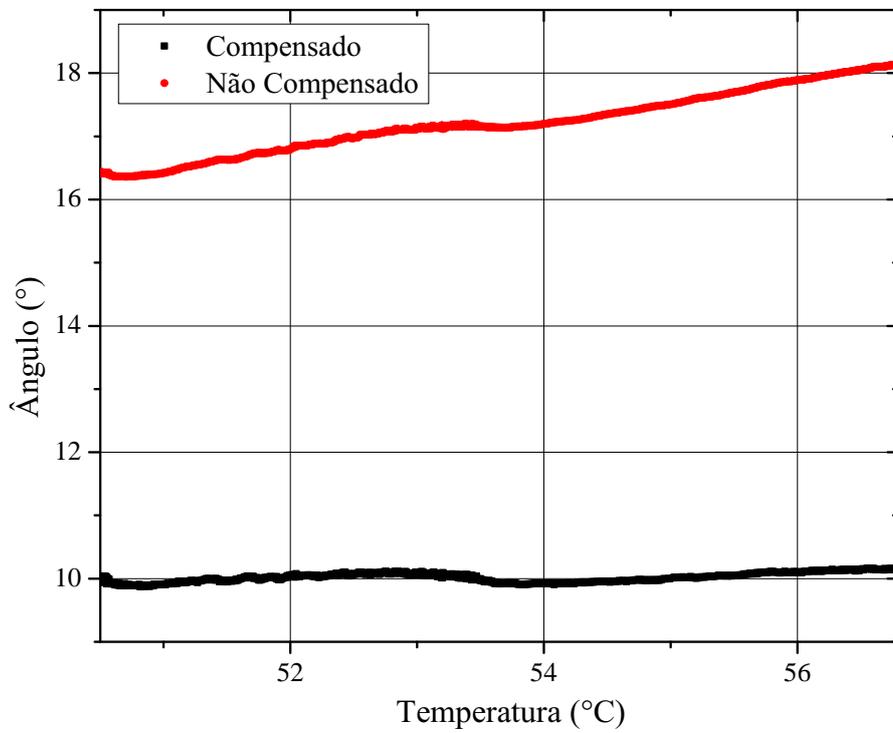


Figura 4.17: Caracterização térmica realizada na faixa de 51 °C a 57 °C com o sensor inclinado à 10°.

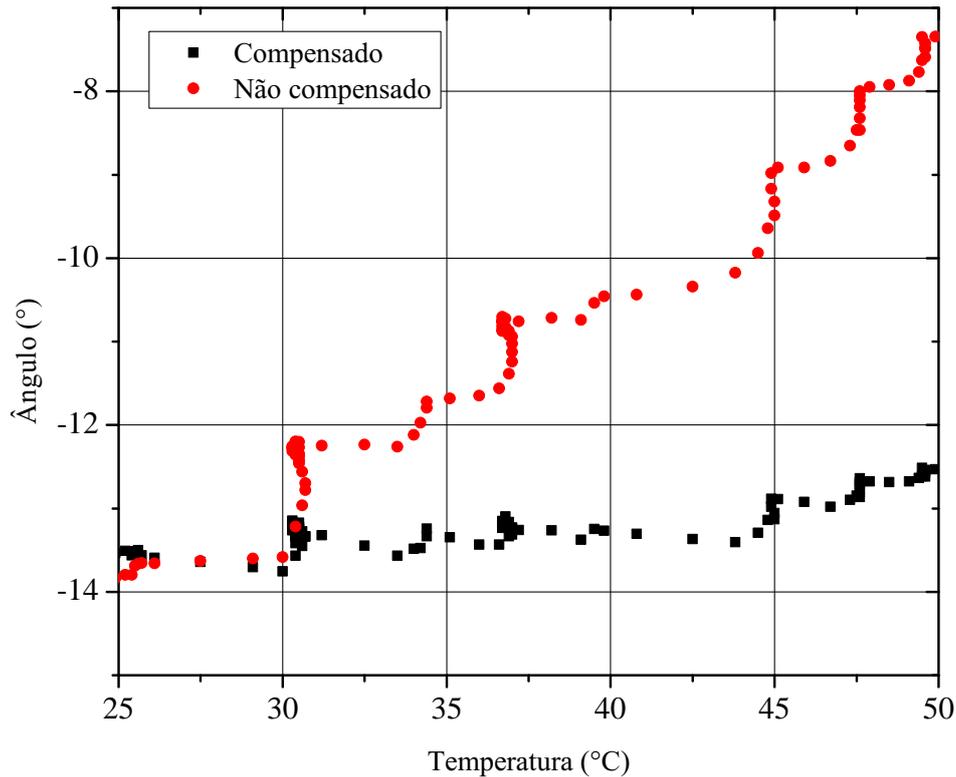


Figura 4.18: Caracterização térmica realizada na faixa de 25 °C a 50 °C com o sensor inclinado à -14° .

A dispersão de medida no intervalo de temperatura 24 °C - 57 °C para inclinações positivas é de $\pm 0,16^\circ$, enquanto para angulações negativas a dispersão é de $\pm 0,64^\circ$. O desvio verificado em inclinações negativas apresenta um maior valor, como é observado na Figura 3.7 as FBGs apresentam lóbulos laterais não-suprimidos e de potência óptica relevante, logo quando o sensor é inclinado o comprimento λ_B se aproximam e os lóbulos laterais das FBGs se sobrepõem criando falsos $\lambda_B S$.

Conclui-se que a metodologia de compensação térmica proposta é eficaz como pode ser observado nos testes realizados e as medições compensadas se mantêm estáveis com uma dispersão de $\pm 0,64^\circ$. O sistema proposto é capaz de distinguir os efeitos mecânicos e térmicos que agem no sensor devido o metodologia proposta.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, um sensor de inclinação baseado em FBG foi desenvolvido e caracterizado. Primeiramente foi investigada a resposta em bancada via modelamento de vigas de Euler-Bernoulli. Propomos uma simples técnica que aumentou a sensibilidade mecânica das FBGs, além disso foi apresentado o desenvolvimento matemático para distinguir efeitos térmico e mecânico.

Na Tabela 5.1, é feita uma comparação entre os resultados obtidos e os trabalhos desenvolvidos anteriormente por [28–32] e o sensor comercial [35].

Tabela 5.1: Comparação entre os sensores desenvolvidos.

Autor	Acurácia	Resolução	Faixa Operacional
[28]	0,1 °	0,007 °	-10° a +10°
[29]	±0,13 °	±0,02°	-5° a +5°
[32]	0,1°	0,005°	-12° a +12°
[35]	±0,01°	±0,001°	-3° a +3°
Este Trabalho	±0,46°	±0,025°	-40° a + 40°

Embora o sensor tenha apresentado acurácia inferior aos trabalhos desenvolvidos anteriormente, uma vantagem do protótipo desenvolvido é a sua característica modular. A capacidade de multiplexação não é encontrada nos sensores que foram apresentados, pois a interrogação nestes trabalhos inviabiliza esta opção.

Vale ressaltar que o protótipo final é operacional no intervalo -40° a $+40^\circ$. O sensor desenvolvido apresentou uma faixa de operação superior aos trabalhos apresentados anteriormente, inclusive em relação ao sensor comercial da HBM. Além disso, o

sensor desenvolvido apresentou estabilidade térmica de $\pm 0,16^\circ$ em inclinações positivas e $\pm 0,64^\circ$ em negativas na faixa de temperatura 25°C à 50°C , além de excelente linearidade.

5.1 Trabalhos Futuros

Para melhorias na acurácia e estabilidade térmica do sensor, propõe-se garantir a simetria entre os lados do transdutor para que a transferência de strain se torne igual para ambos sensores FBG, para isto é sugerido construir um molde que sirva de referência para auxiliar a fabricação do transdutor.

Uma sugestão para dar continuidade a este trabalho é investigar a resposta em frequência do sensores para aplicações em análise de vibrações, estudar a melhoria do composto de fixação afim de aumentar a faixa de operação, montar uma jiga de teste para simular condições reais de operação, por fim, projetar um sistema eletrônico dedicado para a demodulação dos sensores, pois durante os experimentos foi constatado que a resolução do interrogador utilizado é menor que o reportado o que influencia na acurácia e repetibilidade do sensor.

Referências Bibliográficas

- [1] ANTUNES, P., LIMA, H., ALBERTO, N., et al. “Optical Sensors Based on Fiber Bragg Gratings for Structural Health Monitoring”. In: Mukhopadhyay, S. C. (Ed.), *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, pp. 253–295, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [2] MACHADO, W. *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [3] FONSECA, A. R. *Auscultação Por Instrumentação De Barragens De Terra E Enrocamento Para Geração De Energia Elétrica – Estudo De Caso Barragens Da UHE São Simão*. Dissertação de M.Sc, Unversidade Federal de Ouro Preto, 2003.
- [4] WERNECK, M. M. “Transdutores de Direção”. In: *Transdutores e Interfaces*, Rio de Janeiro, 1996.
- [5] MIKKELSEN, P. E., WILSON, S. D. “Field Instrumentation”. In: Schuster, R. L., Krizek, R. I. (Eds.), *Landslides, Analysis and Control*, pp. 112 – 138, Washington, D.C., 1978.
- [6] FORMOSO, M. T. *Desenvolvimento De Um Inclinômetro Para Monitorar O Comportamento De Taludes Instáveis De Solo*. Dissertação de M.Sc, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.
- [7] DUNNICLIFF, J. “Inclinometer”. In: *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, New York, 1988.
- [8] AFFONSO, H. M. M. *Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento*. Dissertação de M.Sc, Pontifícia Universadade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

- [9] SISGEO. “Digital MEMS Inclinometer Sensor”. Disponível em: <<https://www.sisgeo.com/products/inclinometers-and-tiltmeters/item/digital-mems-inclinometer-system.html>>. Acesso: 10-07-2018.
- [10] GORSKA, K., WYJADLOWSKI, M. “An Analysis of Excavation Support Safety Based On Experimental Studies”, *Studia Geotechnica et Mechanica*, v. 37, n. 3, 2015.
- [11] ORTIGÃO, J. A. R., SAYÃO, A. S. “Handbook of Slope Stabilisation”. cap. 16, Berlin, 2004.
- [12] DARROW, M. M. “Automated MEMS-based In-place Inclinometers”, *Geotechnical News*, 2013.
- [13] MOK, R., DANTE, A., SILVEIRA, P., et al. “Inclination Sensor Based on FBG with Enhanced Sensitivity”. In: *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2018)*, Houston, USA, 2018.
- [14] GLISIC, B., INAUDI, D. “Monitoring A Subterranean Structure with the SOFO System”, *Tunnel Management International magazine*, v. 2, n. 8, pp. 22–27, Junho 2000.
- [15] HERNANDEZ, G. In: *Fabry-Perot Interferometers*, Cambridge University Press, Agosto 1988.
- [16] SOARES, L. M. B. *Fibras Ópticas com Cavidade Fabry-Perot para Sensoriamento de Temperatura, Deformação Longitudinal e Campo Magnético*. Dissertação de M.Sc, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, 2015.
- [17] ARAUJO, L. F. *Síntese De Nanopartículas Metálicas E Cavidade Fabry-Perot Em Fibras Para Aplicações Em Sensoriamento*. Dissertação de M.Sc, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, 2016.
- [18] HU, D., YEN-NI WONG, R., PING SHUM, P. “Photonic Crystal Fiber-Based Interferometric Sensors”. 02 2018. ISBN: 978-953-51-3813-6. doi: 10.5772/intechopen.70713.
- [19] TAFULO, P. A. R., JORGE, P. A. S., SANTOS, J. L., et al. “Intrinsic Fabry-Pérot Cavity Sensor Based on Etched Multimode Graded Index Fiber for Strain and Temperature Measurement”, *IEEE SENSORS JOURNAL*, v. 12, n. 1, Janeiro 2012.

- [20] HUANG, Z., ZHU, Y., CHEN, X., et al. “Intrinsic Fabry–Pérot Fiber Sensor for Temperature and Strain Measurements”, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, v. 17, n. 11, Novembro 2005.
- [21] VALIS, T., HOGG, D., CHEN, X., et al. “Fiber Optic Fabry-Perot Strain Gauge”, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, v. 2, n. 3, Março 1990.
- [22] FAVERÓ, F. C. *Sensores a Fibras Ópticas Microestruturadas*. Tese de D.Sc, Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, 2012.
- [23] WILLSHIRE, A. J., NIEWCZAS, P., DZIUDA, L., et al. “Dynamic Strain Measurement Using an Extrinsic Fabry–Perot Interferometric Sensor and an Arrayed Waveguide Grating Device”, *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, v. 53, n. 1, Fevereiro 2004.
- [24] ZHU, C., HUANG, J. “An optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer based displacement sensor with centimeter measurement range”. In: *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Denver, Colorado, 2018.
- [25] KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., et al. “Fiber Grating Sensors”, *Journal of lightwave technology*, v. 15, n. 8, Agosto 1997.
- [26] DANTE, A. *Uma nova técnica para caracterização de grades de Bragg em fibra óptica utilizando um método de deconvolução*. Dissertação de M.Sc, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2012.
- [27] PENG, B., ZHAO, Y., YANG, J. “Tilt sensor With FBG technology and matched FBG demodulating Method”, *IEEE Sensors*, v. 6, Fevereiro 2006.
- [28] GUAN, B., TAW, H. Y., LIU, S. “Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor”, *IEEE Photonics technology letters*, v. 16, n. 1, Janeiro 2004.
- [29] DONG, X., ZHAN, C., HU, K., et al. “Temperature-Insensitive Tilt Sensor With Strain-Chirped Fiber Bragg Gratings”, *IEEE Photonics technology letters*, v. 17, n. 11, Novembro 2005.
- [30] AU, H. Y., KHIJWANIA, S. K., FU, H. Y., et al. “Temperature-Insensitive Fiber Bragg Grating Based Tilt Sensor With Large Dynamic Range”, *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, v. 29, n. 11, junho 2011.

- [31] BAO, H., DONG, X., YAN SHAO, L., et al. “Hybrid pendulum-based 2-D tilt sensor with two fiber Bragg gratings”. In: *2010 Photonics Global Conference*, Singapore, 2010.
- [32] HE, S., ABD KAI NI, X. D., CHAN, C. C., et al. “Temperature-insensitive 2-D fiber Bragg grating Inclinator”. In: *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, Edinburgh, United Kingdom, 2009.
- [33] PINTO, F. G., DE MELLO, M. A., DE ARAGÃO FILHO, L. A. C. M., et al. “INCLINÔMETRO INSTRUMENTADO COM FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO DE ENCOSTAS”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia - RMCT*, v. 32, 2015.
- [34] GUO, Y., ZHANG, D., FU, J., et al. “Development and operation of a fiber Bragg grating based online monitoring strategy for slope deformation”, *Sensor Review*, v. 35, 2015.
- [35] HBM. “FS64: High Performance Fiber Bragg Grating (FBG) Tilt Sensor”. Disponível em: <https://www.hbm.com/en/4608/fs64-optical-tilt-meter-fibersensing/>. Acesso: 11-02-2019.
- [36] K. O. HILL, Y. FUJII, D. C. J., KAWASAKI, B. “Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication”, *Applied Physics Letters*, v. 32, n. 10, 1978.
- [37] OTHONOS, A., KALLI, K. “Photosensitivity in Optical Fibers”. In: *Fiber Bragg Gratings*, cap. 2, Boston, USA, Artech House, 1999.
- [38] DANTE, A. *Módulo Sensor Óptico Com Grades De Bragg em Fibra óptica e cerâmicas piezoelétricas para medida de alta tensão com transformadores de potencial*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2012.
- [39] RAJ, R., SINHA, P. K., PRAKASH, E. V. “Simulation and Analysis of Cantilever Beam of Different Material By Finite Element Method, ASYNS MATLAB”, *International Journal of Engineering Research and General Science*, v. 3, n. 3, Junho 2015.
- [40] HIBBELER, R. C. “Deflection of Beams and Shafts”. In: *Mechanics of Materials*, 8th ed., cap. 12, Prentice Hall, 2011.
- [41] GOMES, J. F. S. “Deflexão de vigas isostáticas”. In: *Mecânica dos Materiais e Estruturas Lineares. Teoria e Aplicações*, cap. 7, Porto, 2009.

- [42] RIBEIRO, B. A. *Compensação de Temperatura em um Ssensor Óptico-Elétrico para Medidas De Tensão em Linhas de Trasnmissão*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Apêndice A

Trabalho publicado

Nesta seção é apresentado o artigo foi publicado e exposto no congresso I2MTC (*IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*), realizado no período entre 14 e 17 de maio em Houston, EUA.

Inclination Sensor Based on FBG with Enhanced Sensitivity

Roberto Wu Mok*, Pedro Silveira, Alex Dante, Cesar Carvalho, Meysam Keley,
Leandro Garçon, Regina Allil, and Marcelo Werneck**

Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program,
COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

(*) wumok@lif.coppe.ufrj.br

(**) Also with Nanotechnology Engineering Program

Abstract— The Brazilian mining disaster, which occurred in 2015 in the city of Mariana, released millions of tons of toxic mud and has caused destruction across a vast area from the mountains of Minas Gerais to the Atlantic Ocean. Preventing such accidents demands a real-time, continuous monitoring sensor system capable of detecting dangerous soil displacement. In this paper, we present a temperature-independent, modular inclinometer based on a fiber Bragg grating (FBG) array for the detection of soil displacement. The proposed sensor array is based on a modular topology, in which each module is composed of a pair of FBG sensors bonded to the opposite sides of a steel cantilever holding a known weight. When the system is inclined, the gravitational force acts on the weight, pushing the cantilever to a bending position. Furthermore, since the measurements are wavelength-encoded, the proposed sensor does not suffer from light source intensity fluctuations. Our prototype was tested in laboratory with inclinations ranging from 0 ° to 40 ° with a resolution of ± 0.025 ° and very good repeatability, indicating that the proposed system is feasible and can be applied to the precise and fast detection of soil displacements.

Keywords—Fiber Bragg; Inclination Sensor; Temperature independent; Inclinometer; Optical Sensor

I. INTRODUCTION

Internationally reported, the collapse of a mining dam near the city of Mariana, in the state of Minas Gerais, Brazil, released a torrent of sludge that killed nineteen people, wiped out villages and became the worst environmental disaster in Brazilian history [1]. In light of that disaster, it is clear that a real-time continuous monitoring sensor system is vital to help detecting these fateful events in advance.

To ensure structural safety, a set of sensors should be employed to compose a monitoring system, in which one of the most important parameters is tilt displacement. Conventional electromechanical tilt sensors transduce a physical quantity into electrical signals from magnetic [2] and capacitive [3] effects.

During the last decade, the evolution of the instrumentation technology leans toward the research and development of the fiber optic sensing field. Diverse sensors had been developed and applied in civil industry, including interferometry

displacement sensor, Fabry-Perrot strain sensors, Raman distributed temperature sensors, Brillouin distributed temperature sensors and fiber Bragg grating (FBG) [4].

An FBG is a periodic perturbation of the refractive index of the optical fiber core, which is formed by exposure of the core to an UV light interference pattern. The formation of a permanent grating was first reported by Kenneth Hill and co-workers in 1978 [5].

Since then, FBG-based sensors have been used for a variety of applications, due to their intrinsic sensitivity to mechanical strain and temperature variations. This kind of sensor presents a series of advantages over conventional electromechanical sensors, such as immunity to electromagnetic interference, high electrical isolation, lightweight, possibility of multiplexing several sensors in one optical cable and capability of monitoring sensors over long distance, characteristics inherited from optical fibers [6] [7].

These properties enable FBG sensors to achieve a growing popularity among various sensing fields such as medical, aerospace, electrical and civil structures. In the civil industry, several applications have been proposed for monitoring the health of bridges, buildings, and slopes [8] - [10]. For example, FBG sensors have been incorporated to bridges [8] for the measurement of the dynamic strain, to historical buildings [9] to measure the growth rates of structural cracks caused by mechanical forces and to thermomechanical displacement and slopes [10] to measure lateral displacements along the structure.

In [11] the authors proposed an angular displacement sensor. The operating principle of this sensor is a cantilever-based pendulum with a fixed weight to its free end, which acts as a force of deformation for the whole structure. The paper also shows a demodulation method, which is simple and with relatively low cost. Although simple and cost-effective the proposed technique relies on the intensity of the light reflected

by wavelength-matched pair of FBGs, which is susceptible to light intensity fluctuations from the light source along the fiber.

In [12] the authors proposed a vertical pendulum inclination sensor. Its structure is composed by a hanging mass connected inside a steel frame through a joint with free movement. The initial equilibrium position of the structure is kept stable through four FBG which are bounded to steel frame and four protruded arms from the pendulum. A good accuracy and resolution are reported. Although precise and having the capability of measurement of 3-D inclinations, the sensor presents a complex mechanical structure and does not offer the option to implement an array of sensors, which is a desirable feature of tilt sensors for soil displacement monitoring. Furthermore, the proposed sensor relies on its complex mechanical structure to achieve its efficiency.

In [13] the authors proposed a tilt sensor based on a hybrid structure composed by a pendulum and three FBG cantilever sensors. A reasonable accuracy and resolution is reported by the authors. However, since the proposed interrogation technique is based on the optical intensity reflected by the FBG, which is modulated by the light source, optical power fluctuations may introduce errors in the measurements.

In this work it is proposed a modular inclinometer based on FBG. The module is composed of a pair of FBG sensors bonded to the opposing sides of a steel cantilever beam holding a known weight. When a tilt is applied, the gravitational force acts on the weight, pushing the cantilever to a bending position resulting in stretching the pair of FBGs to opposite sides, which results in displacements of the relative wavelength difference ($\Delta\lambda_B$). The pair of sensors is bonded to supports, which enhances strain sensitivity when subject to bending. When a positive inclination is applied to the inclinometer, the relative $\Delta\lambda_B$ is increased otherwise it is decreased. The proposed scheme eliminates the cross-sensitivity between strain and temperature inherent to the FBG, allows for the implementation of a quasi-distributed network of sensors, and may be easily upgraded to perform 2-D measurement since it is a modular sensor.

II. THEORY AND EXPERIMENTAL SETUP

A. FBG Sensitivity to Strain and Temperature Variations

An FBG is formed by exposing a short length of a photosensitive, germanosilicate fiber to a UV pattern. As the periodic index modulation develops in the fiber core, a peak appears in as a reflected spectrum. The center of the peak occurs at the predicted Bragg wavelength according to [14]:

$$\lambda_B = n_{eff} * \Lambda \quad (1)$$

where n_{eff} is the effective refractive index of the fiber core and Λ is the grating period. The centered Bragg wavelength can be displaced either by an external force or by variation in temperature, so the sensitivity of λ_B is expressed by the following equation:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_\eta)\Delta T \quad (2)$$

where ρ_e is the photo-elastic coefficient, which is the variation of the index refraction with strain, α_Λ is the thermal expansion of silica and α_η is the thermo-optic coefficient representing the temperature dependence of the refractive index.

B. Experimental Setup

A schematic of the proposed measurement system is shown in Fig. 1. A rectangular shaped steel cantilever beam holds a known weight C , and two supports A and B . Since the weights of the supports are relevant, the system is subjected to three bending forces. When an inclination is applied the forces are given by $m_{AG} \sin\theta$ at point A , $m_{BG} \sin\theta$ at point B and $m_{CG} \sin\theta$ at point C .

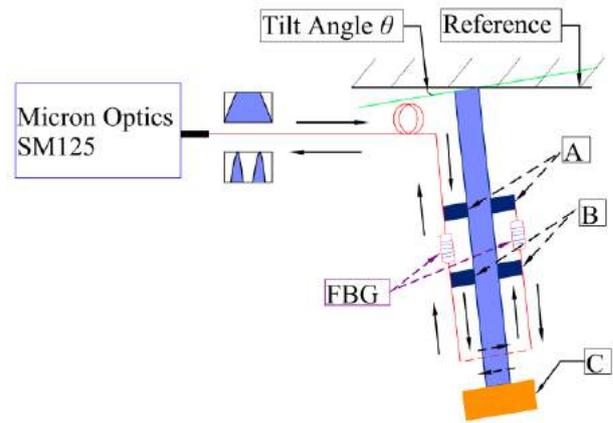


Fig. 1. Modular sensor schematic A and B are the support of the FBG and C is the weight responsible for bending the cantilever.

Since FBG sensors are influenced by both temperature and strain simultaneously, strain measurements must be compensated for thermal variations. In order to perform measurements free from temperature bias it is proposed a differential measure ($\Delta\lambda$) between the two FBG wavelengths. Since temperature variations causes the same wavelength shift on both sensors, the differential approach cancels out any temperature variation.

According to the mechanics of materials, a surface strain of a cantilever beam is given by the following expression:

$$\epsilon = \frac{h}{2EI} \left[\frac{F_C L}{2} + F_B \left(\frac{L}{2} - B \right) \right] \quad (3)$$

where EI is the flexural rigidity of cantilever, h its thickness, L its length and F_B and F_C are the deflection forces at points B and C respectively.

The structure behaves as a trapezoid; when its curves the FBG bonded to the supports is stretched, as shown in Fig. 2. When a tilt is applied, the strain transference to the FBG sensor through the cantilever is enhanced.

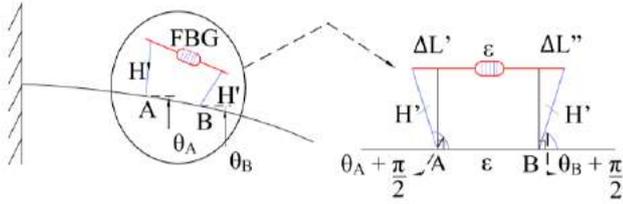


Fig. 2. FBG strain when a bending is applied.

Since the pair of FBGs is bonded at opposing sides of the cantilever beam, an FBG is affected by a positive strain while the other sensor receives a negative strain. The shift of wavelength from the enhanced strain that a FBG sensor receives can be expressed by the following expression:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - \rho_e) \left\{ \frac{h}{2EI} \left[\frac{F_C L}{2} + F_B \left(B - \frac{L}{2} \right) + H' \sin(\theta_A) + H' \sin(\theta_B) \right] \right\} \quad (4)$$

where H' is height of the support, θ_A and θ_B are the deflection angle at the points A and B respectively.

III. EXPERIMENTS, RESULTS AND DISCUSSIONS

A pair of FBGs, whose Bragg wavelengths are centered at 1550.889 nm and 1550.558 nm, and a rectangular shaped carbon steel AISI 1075 were used to assemble a sensor prototype. The sensors are bonded to the supports with cyanoacrylate adhesive, to prevent the sensors to loosen during the experimental tests they were pre-strained to 1551.440 nm and 1551.690 nm respectively.

In the experiments made in laboratory FBG_1 is under influence of stretching stress while FBG_2 is under compression stress. The sensor characteristics are length $L = 80$ mm, width $b = 10$ mm, thickness $h = 0.3$ mm, supports height $H' = 32$ mm, weights $m_A = m_B = 0.63$ g and $m_C = 24.88$ g.

The experimental prototype sensor, shown in Fig. 3, is fixed in a goniometer. The experimental tests consist of changing the angle of the sensor with respect to the vertical and detecting the two wavelength shifts. The FBG sensors output signals were acquired by a Micron Optics sm125 interrogator with a ± 1 pm of resolution.

As shown in Fig. 4, a linear fitting in red of the experimental data is obtained through a series of tests, the slope coefficients for both sensor FBG_1 and FBG_2 are 0.020 nm° and -0.019 nm° respectively. Indicated in a blue line is the expected theoretical behavior of the FBGs sensors. Fig. 5 shows the linear fitting from the differential demodulation approach, red line indicates the linear fitting of the experimental data while the blue line is the theoretical expected behavior, from the experimental linear fitting the slope coefficient 0.03974 nm° .

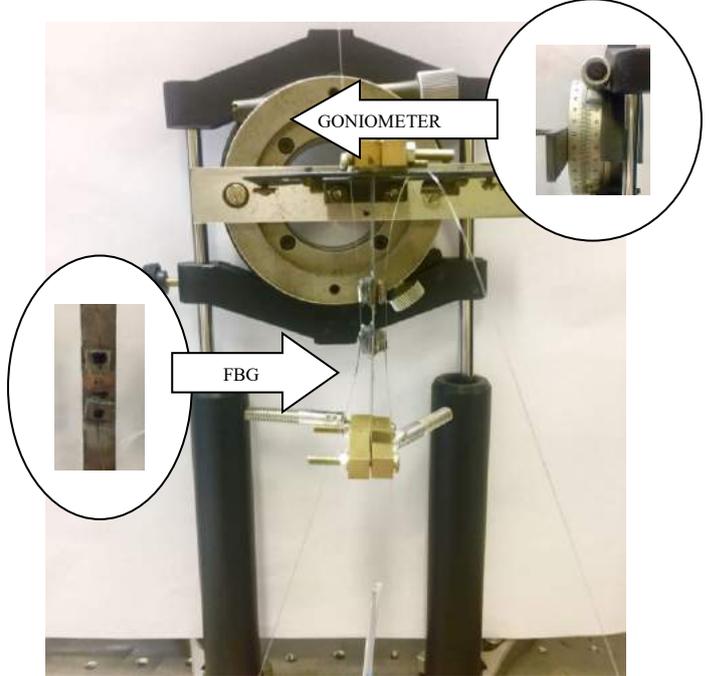


Fig. 3. Laboratory setup of the sensor.

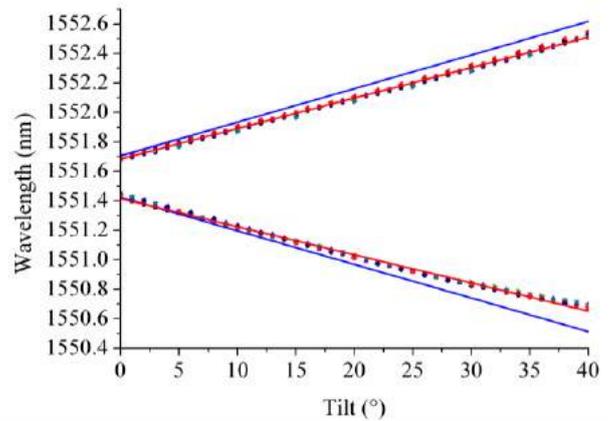


Fig. 4. Wavelength displacements due different inclinations.

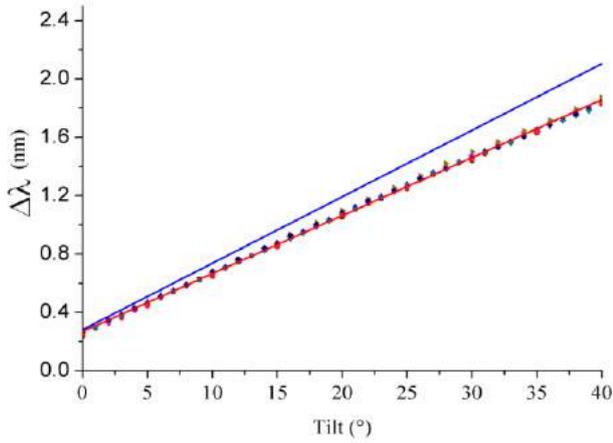


Fig. 5. Difference between FBG₁ and FBG₂ wavelength as function of the tilt angle

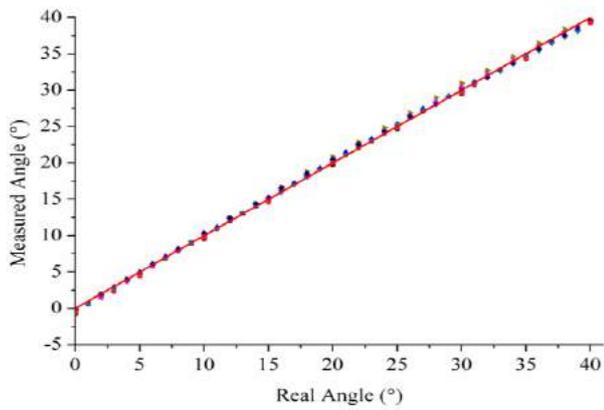


Fig. 6. Comparison between measured inclination by the sensor and the real inclination read by the goniometer

Notice that the experimental data goes behind the theoretical ones for the stretched FBG and in advance for the shrinking FBG, which can be observed in Fig. 4 and in Fig. 5. This effect is due to the elasticity of the set cantilever-supports that give away when the fiber is stretched. This is because the high Young modulus of the silica competes with the relatively elastic behavior of the cantilever-supports. Nonetheless, the system behaved linearly in both ways.

Fig. 6 compares the measured inclination, which is extracted from the set of data from Fig. 4 and Fig. 5, to the real inclination that the sensor is subjected to. The dispersion of the experimental measurement is related to the effect of the

elasticity, which can be observed by comparing the experimental linear fitting to the theoretical fitting from the Fig. 4 and Fig. 5.

Calculated from the experimental data, the deviations of the measurements are so insignificant that cannot be shown as error bars; the standard deviation is 0.46° and obtained from the linear fitting the R^2 is 0.99905, which indicates high linearity of the sensor.

IV. CONCLUSION

A temperature independent inclinometer based on FBG sensor is developed, characterized and calibrated. From (4) the expected slope coefficient is $0.022^\circ/\text{nm}$ for FBG₁ and $-0.022^\circ/\text{nm}$ for FBG₂. Due to a non-ideal bond between sensors to the support and the cantilever beam, this results in a loss in strain that should be transferred to the sensors. A limitation imposed is the range of operation ($0^\circ \sim \pm 40^\circ$), in larger tilts the FBG₂ loosens, thus producing wrong measurements.

As shown in Fig. 6, the proposed sensor design is validated, since it presents a satisfactory feasibility, accuracy of $\pm 0.46^\circ$, resolution of $\pm 0.025^\circ$, good repeatability and the elimination of the cross-sensitivity is verified by the experimental test. Furthermore, as show in [11] – [14] FBG-based sensors are capable to achieve reasonable resolution and accuracy when compared to conventional presented in [2], [3].

ACKNOWLEDGMENT

R. W. Mok acknowledges support from Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) through the M.Sc fellowship.

REFERENCES

- [1] J. D. Carneiro “Brazil dam burst: Six months on, the marks left by sea of sludge” BBC Brasil, 2016 [online]. Available: <http://www.bbc.com/news/world-latin-america-36230578>. [Accessed: 26-October-2017]
- [2] Geokon “Vibration wire Tiltmeter, Model 6350” Available: http://www.geokon.com/content/datasheets/6350_Vibrating_Wire_Tiltmeter.pdf [Accessed: 16-January-2018]
- [3] Kübler “MEMS inclinometer, Model IS40” Available: https://www.kuebler.com/PDFs/leaflet/drehgeber/english/IS40_en.pdf [Accessed: 16-January-2018]
- [4] Inaudi, D., and Glisic B., Overview of Fibre Optic Sensing Applications to Structural Health Monitoring, Symposium on Deformation Measurement and Analysis, 1-10, 2008.
- [5] K O. Hill and G. Meltz, “Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 15, NO. 8, AUGUST 1997.
- [6] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele “Fiber Grating Sensors,” JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 15, NO. 8, AUGUST 1997.

- [7] F. W. D. Pfrimer, M. Koyama, A. Dante, E. C. Ferreira, and J. A. S. Dias, "A Closed-Loop Interrogation Technique for Multi-Point Temperature Measurement Using Fiber Bragg Gratings" JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 32, NO. 5, MARCH 1, 2014.
- [8] T.H.T. Chan, L. Yu, H.Y. Tam, Y.Q. Ni, S.Y. Liu, W.H. Chungb, L.K. Cheng, "Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation", In Engineering Structures, Volume 28, Issue 5, 2006, Pages 648-659, ISSN 0141-0296.
- [9] H. F. Lima, R. S. Vicente, R. N. Nogueira, I. Abe, P. S. B. André, C. Fernandes, H. Rodrigues, H. Varum, H. J. Kalinowski, Member, A. Costa and J. L. Pinto, "Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro Using FBG Sensors" IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 8, NO. 7, JULY 2008.
- [10] Y. Guo, D. Zhang, J. Fu, S. Liu, S. Zhang and F. Zhu, "Development and operation of a fiber Bragg grating based online monitoring strategy for slope deformation" Sensor Review, Vol. 35 Iss 4 pp. 348 – 356 Permanent link to this document: <http://dx.doi.org/10.1108/SR-01-2015-0012>.
- [11] B. Peng, Y. Zhao, Y. Zhao, and J. Yang "Tilt Sensor With FBG Technology and Matched FBG Demodulating Method" IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 6, NO. 1, FEBRUARY 2006.
- [12] B. Guan, H. Y. Taw, S. Liu "Temperature-Independent Fiber Bragg Grating Tilt Sensor" IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 16, NO. 1 JANUARY 2004.
- [13] X. Dong, C. Zhan, K. Hu, P. Shum, C. C. Chan "Temperature-Insensitive Tilt Sensor With Strain-Chirped Fiber Bragg Gratings" IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL 17, NO. 11 NOVEMBER 2005.
- [14] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", OPTICS LETTERS, Vol. 14, No. 15, August 1, 1989

Roberto Wu Mok*, Pedro Silveira, Alex Dante, Cesar C. Carvalho, Meysam Keley, Leandro Garção, Regina Allil, and Marcelo Werneck**
 Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program - PEE, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil
 (*) wumok@lif.coppe.ufrj.br
 (**) Also with Nanotechnology Engineering Program

Abstract — The Brazilian mining disaster, which occurred in 2015 in the city of Mariana, released millions of tons of toxic mud and has caused destruction across a vast area from the mountains of Minas Gerais to the Atlantic Ocean. Preventing such accidents demands a real-time, continuous monitoring sensor system capable of detecting dangerous soil displacement. In this paper, we present a temperature-independent, modular inclinometer based on a fiber Bragg grating (FBG) array for the detection of soil displacement. The proposed sensor array is based on a modular topology, in which each module is composed of a pair of FBG sensors bonded to the opposite sides of a steel cantilever holding a known weight. When the system is inclined, the gravitational force acts on the weight, pushing the cantilever to a bending position. Furthermore, since the measurements are wavelength-encoded, the proposed sensor does not suffer from light source intensity fluctuations. Our prototype was tested in laboratory with inclinations ranging from 0° to 40° with a repeatability of ±0.025°, indicating that the proposed system is feasible and can be applied to the precise and fast detection of soil displacements.

Keywords—Fiber Bragg; Inclination Sensor; Temperature-independent; Inclinometer; Optical Sensor.

I. INTRODUCTION

Internationally reported, the collapse of a mining dam near the city of Mariana, in the state of Minas Gerais, Brazil, released a torrent of sludge that killed nineteen people, wiped out villages and became the worst environmental disaster in Brazilian history. In light of that disaster, it is clear that a real-time continuous monitoring sensor system is vital to help detecting these fateful events in advance. To ensure structural safety, a set of sensors should be employed to compose a monitoring system, in which one of the most important parameters is tilt displacement. Conventional electromechanical tilt sensors transduce a physical quantity into electrical signals from magnetic and capacitive effects. During the last decade, the evolution of the instrumentation technology leans toward the research and development of the fiber optic sensing field. Several kinds of optical sensors had been developed and applied in civil industry, including interferometry displacement sensor, Fabry-Perrot strain sensors, Raman distributed temperature sensors, Brillouin distributed temperature sensors and fiber Bragg grating (FBG).

II. EXPERIMENTAL

A pair of FBGs, whose Bragg wavelengths are centered at 1550.889 nm (FBG₁) and 1550.558 nm (FBG₂), and a rectangular-shaped carbon steel AISI 1075 were used to assemble a sensor prototype. The FBGs are bonded to the supports with cyanoacrylate adhesive and, in order to prevent the sensors to loosen during the experimental tests, they were pre-stretched to 1551.440 nm and 1551.690 nm, respectively. In the experiments made in laboratory, FBG₁ is under influence of stretching stress while FBG₂ is under compression stress. The cantilever characteristics are length L = 80 mm, width b = 10 mm, thickness h = 0.3 mm, supports height H' = 3.2 mm, weights m_A = m_B = 0.63 g and m_C = 24.88 g.

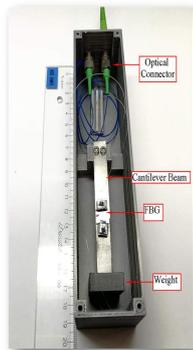


Figure 1 – Final prototype sensor.

The final prototype sensor is presented in Fig. 1. The preliminary experimental tests has been performed using the assembly shown in Fig. 2. The experimental tests consisted of changing the angle of the sensor with respect to the vertical axis and detecting the wavelength shifts from both FBGs. The FBG sensors output signals were acquired by a Micron Optics sm125 interrogator with a ±1 pm of resolution.

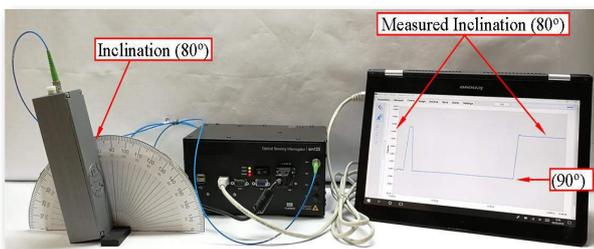


Figure 2 – Experimental test.

III. RESULTS

Shown in Fig. 2(a), a linear fitting in red of the experimental data is obtained through a series of tests, the slope coefficients for both sensor FBG₁ and FBG₂ are 0.020 nm/° and -0.019 nm/° respectively. Indicated in a blue line is the expected theoretical behavior of the FBGs sensors. Fig. 2(b) shows the linear fitting from the differential demodulation approach, while red line indicates the linear fitting of the experimental data, and the blue line is the theoretical expected behavior. The linear fitting shows a slope coefficient of 0.03974 nm/°.

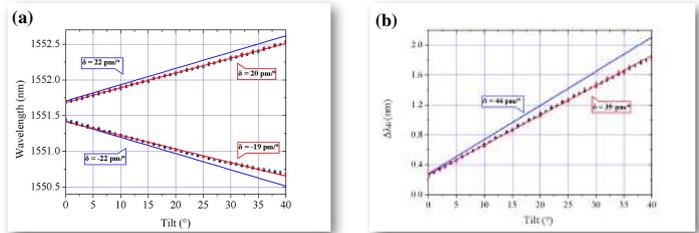


Figure 2 – (a) Wavelength displacement behavior due to different inclinations. (b) Differential demodulation of the wavelength shifts as function of the tilt angle.

Notice that the experimental data goes behind the theoretical ones for the stretched FBG and in advance for the shrinking FBG, which can be observed in Fig. 2(a) and in Fig. 2(b). This effect is due to the elasticity of the set cantilever-supports that give away when the fiber is stretched. This is because the high Young modulus of the silica which competes with the relatively elastic behavior of the cantilever-supports. Nonetheless, the system behaved linearly in both ways.

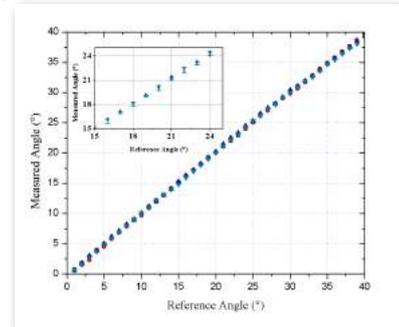


Figure 3 – Comparison between measured and reference inclinations acquired with the final prototype in detail is shown the errors bar.

Fig. 3 compares the measured inclination, which is extracted from the set of data from Fig. 2(a) and Fig. 2(b), to the reference. The dispersion of the experimental measurement is related to the effect of the elasticity, which can be observed by comparing the linear fitting from the experimental data to the theoretical behavior from the Fig. 2(a) and Fig. 2(b). Calculated from the experimental data, the deviations of the measurements are shown in detail in the Fig. 3; the standard deviation is 0.46°; the R² is 0.99905, which indicates high linearity of the sensor.

IV. CONCLUSION

A temperature-independent inclinometer based on FBG sensor has been developed, characterized and calibrated. The expected slope coefficient was 0.022 nm/° for FBG₁ and -0.022 nm/° for FBG₂. Due to a non-ideal bond between sensors to the support and the cantilever beam, a loss in strain that should be transferred to the sensors has been observed. The range of operation of the developed sensor was limited from 0° to ±40° because it was observed that the FBG₂ loosens for larger tilts, which resulted in wrong measurements.

As shown in Fig. 3, the proposed sensor design has been validated, since it presented an accuracy of ±0.46°, a repeatability of ±0.025°, and the elimination of the cross-sensitivity has also been verified by the experimental tests. Therefore, the developed modular sensor has achieved reasonable resolution and accuracy when compared to the conventional sensors, allowing its employment in field applications.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support from the Brazilian funding agency Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).