



MÉTODO E ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO DE CURVA PARA O  
MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO DE SOLO ATRAVÉS DE SENSORES  
A REDE DE BRAGG

Lucas Antônio Cunha Lima

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  
Fevereiro de 2018

MÉTODO E ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO DE CURVA PARA O  
MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO DE SOLO ATRAVÉS DE SENSORES  
A REDE DE BRAGG

Lucas Antônio Cunha Lima

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. Regina Célia da Silva Barros Allil, D.Sc.



---

Prof. Maria José Pontes, D.Sc.

Lima, Lucas Antônio Cunha

Método e algoritmo de reconstrução de curva para o monitoramento de deslocamento de solo através de sensores a rede de Bragg / Lucas Antônio Cunha Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVIII, 101 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 77-80.

1. Monitoramento de Deslocamento de Solos. 2. Reconstrução de Curva. 3. FBG. 4. Curvatura. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*“A vida vale a pena ser vivida, vivida com lutas, sem  
desfalecimento, sem desânimo e, sobretudo, com dignidade”*

Edson Carvalho Lima

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter me dado saúde para poder buscar e superar os desafios deste trabalho. Agradeço imensamente aos meus pais, Antônio e Glaucia, que sempre me apoiaram e acreditaram mais em mim do que eu quando decidir buscar desafios longe de casa. Quero agradecer também ao meu irmão, Daniel, e às minhas irmãs, Renata, Maria e Andreia, pelo apoio e pelas conversas ao longo desses últimos anos que, apesar de distância, foram muito importantes para mim.

Ao meu tio Cabral – professor catedrático – e minha tia Adriana que são minha segunda família aqui no Rio, muito obrigado pelos momentos juntos. Agradeço também ao Cláudio Maurício pelas conversas sobre o mestrado, como também sobre assuntos mais fúteis do dia-a-dia. Gostaria de agradecer também à Luana Nobre pelo apoio durante as várias fases do meu mestrado, pelos almoços no fundão e pelas discussões diversas. Também agradeço ao Roberto Câmara pelas repreensões dadas, pelos momentos de descontração e que se dispôs a ser meu motorista particular quando precisei.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Marcelo Werneck, por ter aceitado participar deste projeto, pela paciência e pelos alertas dados a mim. Agradeço enormemente à Regina Allil por ter sempre acreditado na conclusão deste trabalho e por ter me apoiado nos momentos mais importantes.

Um agradecimento em especial à Renata Alves, da Geoprojetos, que gentilmente me forneceu dados e informações muito importantes sobre a instrumentação geotécnica por inclinômetros.

Deixo aqui o meu muito obrigado também ao time do LIF: Isabel Campos, Viviane Cunha, Cesar Consenza, Alfredo Manchego, Alex Dante, Isabelle Moraes, Leandro Garção, Igor Vital, Rafaela Lopes, Ariadny Arcas e Meysam Kely. Também, quero agradecer ao Roberto Mok e à Marcella Gonçalves pelas discussões e apoio no LIF. Apesar da pouca disponibilidade que tinha para dedicar ao laboratório, fui bem recebido por todos.

Aos colegas de trabalho, gostaria de agradecer ao Fábio Arruda por ter me dado a oportunidade de tempo e de recursos para realizar o projeto deste trabalho. Além dele, gostaria de agradecer ao Alex Saint-Clair por ter me dado liberação para que pudesse realizar meus estudos em paralelo ao meu trabalho.

Registro aqui o meu muito obrigado a todos vocês.

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

MÉTODO E ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO DE CURVA PARA O  
MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO DE SOLO ATRAVÉS DE SENSORES  
A REDE DE BRAGG

Lucas Antônio Cunha Lima

Fevereiro/2018

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

O presente estudo propõe uma alternativa à técnica de instrumentação geotécnica por torpedo com inclinômetro, buscando uma solução de monitoramento contínuo e permanente, para quantificar o movimento de massa de solos, tal como movimentos oriundos de barragens de terra, aterros sanitários e encostas.

Para atingir este objetivo, um sistema baseado em sensores ópticos a rede de Bragg é proposto: um tubo instrumentado com tais sensores, ao longo de seu comprimento, com a capacidade de medir quantitativamente o seu perfil, ou seja, a sua posição bidimensional em coordenadas cartesianas. Potencialmente, para uma implementação do sistema em campo, seria necessário apenas a instalação e comissionamento deste tubo uma única vez, minimizando ou extinguindo manutenções periódicas.

Um algoritmo foi desenvolvido para reconstruir curvas bidimensionais a partir de dados de curvatura, associados ao perfil de deslocamento do tubo instrumentado, e utilizando as equações de Frenet-Serret. Dados reais de medição em campo por torpedos de inclinômetro foram utilizados para a análise da resposta do algoritmo proposto, bem como testes em laboratório foram realizados a fim de simular a metodologia do presente estudo e validar o desempenho de todo o sistema de monitoramento em escala reduzida.

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

METHOD AND CURVE REBUILDING ALGORITHM TO MONITOR THE  
GROUND MOVEMENT THROUGH FIBER BRAGG GRATING SENSORS

Lucas Antônio Cunha Lima

February/2018

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

The present study proposes an alternative to the geotechnical instrumentation that uses inclinometers, aiming for a continuous and permanent solution, in order to quantify the ground movement, for example, from earth dams, landfill sites and slopes.

A system based on optical sensors, Fiber Bragg Grating sensors, is proposed to achieve the goal of this study: a tube, with sensors installed along its length, capable of measuring its own profile, in other words, its bi-dimensional position in Cartesian coordinates. Potentially, the in-field deployment of this monitoring system – installation and commissioning – would be executed only once, minimizing or extinguishing the need of periodic interventions.

An algorithm was developed with the purpose to rebuilding bi-dimensional curves from its curvature data, which are associated to the displacement profile of the tube instrumented by the optical sensors, and employing the Frenet-Serret equations. Real data from in-field monitoring measured by a slope indicator system (inclinometers) was used to assess the response of the developed algorithm. Moreover, laboratory tests were performed to simulate the methodology of the present study and to assess the performance of the entire monitoring system in a small-scale scenario.

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Metodologia.....	4
1.4	Estrutura do trabalho.....	5
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Instrumentação geotécnica por torpedos de inclinômetros.....	7
2.1.1	<i>Princípio de funcionamento</i> .....	7
2.1.2	<i>Aplicações</i> .....	9
2.2	Sensores a rede de Bragg (FBG).....	10
2.2.1	<i>Fundamentos</i> .....	10
2.2.2	<i>Métodos de fabricação</i> .....	12
2.2.3	<i>Métodos de multiplexação</i> .....	13
2.2.4	<i>Métodos de interrogação</i> .....	15
2.2.5	<i>Sensores de deformação por rede de Bragg</i> .....	17
2.3	Equações de Frenet-Serret.....	19
2.4	Interpolação de Curva ( <i>Splines</i> ).....	21
2.4.1	<i>Fundamentos</i> .....	21
2.4.2	<i>Definição matemática</i> .....	22
2.5	Estudos relacionados ao tema proposto.....	23
3	DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA A RECONSTRUÇÃO DE CURVAS BIDIMENSIONAIS.....	28
3.1	Medição de curvatura.....	28
3.2	Reconstrução de curva a partir de dados de curvatura.....	29
3.3	Simulações e análises.....	32
4	ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DE MASSA DE SOLO.....	37
4.1	Medições geotécnicas por inclinômetro.....	37
4.2	Reconstrução de curva através do algoritmo proposto.....	41
4.3	Análise de Resultados.....	46
5	MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	50
5.1	Descrição.....	50

5.2	Calibração de sensores FBG.....	54
5.3	Montagem e casos experimentais.....	59
5.4	Análise de Resultados.....	63
5.4.1	<i>Reconstrução de curvas</i> .....	63
5.4.2	<i>Análise de erro</i> .....	68
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	74
6.1	Conclusão.....	74
6.2	Trabalhos futuros.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	ANEXO A.....	81
	ANEXO B.....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Região de Bento Rodrigues, distrito de Mariana, onde ocorreu o rompimento da barragem de Fundão [1].	1
Figura 1.2 – Exemplo de um sistema de monitoramento de torpedo com inclinômetro[4].	2
Figura 1.3 – Etapas para a análise do deslocamento horizontal de massas com base nos dados dos sensores ópticos.	5
Figura 2.1 – Esquemático geral resumindo o princípio de funcionamento de um inclinômetro para medir deslizamento de solo, adaptado de [5].	8
Figura 2.2 – Leituras de inclinômetros em um aterro municipal [6].	10
Figura 2.3 – Princípio de funcionamento de rede de Bragg em uma fibra óptica.	11
Figura 2.4 – Método de fabricação de rede de Bragg através do interferômetro de Talbot, adaptado de [13].	13
Figura 2.5 – Princípio de multiplexação por WDM, cada sensor a rede de Bragg, em verde, possui um comprimento de onda de Bragg distinto e contido no espectro da fonte de banda larga.	14
Figura 2.6 – Esquemático da combinação da técnica TDM e WDM, onde as caixas coloridas representam sensores a rede de Bragg, adaptado de [18].	15
Figura 2.7 – Esquemático do princípio de funcionamento de um filtro de Fabry-Perrot [22].	16
Figura 2.8 – Esquemático de sistema de modulação de múltiplos sensores a rede de Bragg utilizando um FFP sintonizável, adaptado de [20].	17
Figura 2.9 – Esquema representado o posicionamento dual de sensores a rede de Bragg em um corpo de interesse, o qual está fixado por um engaste.	19
Figura 2.10 – Placa metálica instrumentada com sensores FBG sujeita a vibrações mecânicas, adaptado de [27].	24
Figura 2.11 – Fibra óptica posicionada na ranhura de um cilindro para que seja realizada a reconstrução do formato da fibra em três dimensões espaciais [28].	24
Figura 2.12 – (a) Fibras ópticas dispostas em um arranjo específico. (b) Ensaio experimental e resposta da reconstrução de curva em três dimensões, adaptador [30].	25
Figura 2.13 – Esquemático para o monitoramento de uma encosta utilizando um tipo inclinômetro com sensores a rede de Bragg, adaptado de [33].	26

Figura 2.14 – (a) Deslocamento horizontal ( $f_{n+1}$ ) em um trecho de um tubo onde sensores a rede de Bragg estão fixados. (b) Resultados obtidos de leituras em campo pelo inclinômetro a rede de Bragg, adaptado de [34].	27
Figura 2.15 – Sistema de monitoramento em tempo real para uma encosta, adaptado de [35].	27
Figura 3.1 – Curvatura de raio $\rho$ de um corpo de comprimento $x$ e espessura $2y$ . A deformação na superfície do corpo que está a uma distância $y$ da linha neutra (linha pontilhada) e é dada por $(x + \Delta x)/x$ .	28
Figura 3.2 – Arco de círculo com centro em $O$ , raio $\rho$ e comprimento $s$ limitados pelos pontos $P_1$ e $P_2$ . $T_1$ e $T_2$ são os vetores tangentes aos pontos $P_1$ e $P_2$ , respectivamente, e $\theta$ é o ângulo entre os dois vetores tangentes.	30
Figura 3.3 – Fluxograma da reconstrução de curva bidimensional proposta no presente trabalho.	31
Figura 3.4 – Curvas geradas para simular o algoritmo de reconstrução proposto.	33
Figura 3.5 – Perfil de curvatura para cada curva gerada. Os pontos marcados foram escolhidos a cada 0,5 m para representar medições de curvatura.	33
Figura 3.6 – Comparação do perfil de curvatura originalmente calculado e os reconstruídos pela interpolação de pontos para cada tipo de curva.	34
Figura 3.7 – Comparação entre as curvas originais e as curvas reconstruídas através do método proposto no presente trabalho.	35
Figura 3.8 – Comparação do perfil de curvatura originalmente calculado e os reconstruídos pela interpolação de pontos para cada tipo de curva para $t$ variando entre 0 m e 5 m.	36
Figura 4.1 – Sistema de monitoramento por inclinômetro Digitilt Classic System [39].	37
Figura 4.2 – Perfil transversal de um tubo guia para torpedos. As ranhuras ortogonais entre si definem os dois eixos para medição: Eixo A (principal), Eixo B.	39
Figura 4.3 – Medições por inclinômetros para o Eixo A durante a fase inicial (a) e final (b) das campanhas de monitoramento em campo.	39
Figura 4.4 – Medições por inclinômetros para o Eixo B durante a fase inicial (a) e final (b) das campanhas de monitoramento em campo.	40
Figura 4.5 – Medições por inclinômetros para o Eixo B durante a fase inicial sem correção no pós-processamento de dados.	41

Figura 4.6 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo A. Pontos marcadas escolhidos a cada 0,5 m. ....	42
Figura 4.7 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo B: comparação entre perfil calculado (Original) e perfil interpolado de curvatura (Reconstruída).....	43
Figura 4.8 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetro (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 23/06/2016.....	45
Figura 4.9 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 13/10/2015.....	46
Figura 4.10 – Erro absoluto máximo em mm para todos os casos de medição.....	47
Figura 4.11 – Erro relativo ao deslocamento máximo (%) para todos os casos de medição. ....	48
Figura 4.12 – Erro relativo ao deslocamento máximo (%) para todos os casos de medição. ....	49
Figura 5.1 – Esquemático da montagem experimental para simular o monitoramento do deslocamento de massa de solo. ....	51
Figura 5.2 – Interrogador óptico sm125 da Micron Optics [40]. ....	52
Figura 5.3 – Trena a laser 419D da Fluke® [41].....	53
Figura 5.4 – Esquemático para calibração dos sensores a rede de Bragg relativo à variação da deformação.....	54
Figura 5.5 – Montagem utilizada para a calibração dos cordões de sensores. A seta azul indica a direção e sentido da força aplicada ao cordão.....	56
Figura 5.6 – Calibração dos 12 primeiros sensores do cordão A. $R^2$ é o coeficiente de determinação para cada curva de calibração e $k$ é a constante $k_s$ de cada sensor calibrado. ....	57
Figura 5.7 – Calibração dos 12 primeiros sensores do cordão B. $R^2$ é o coeficiente de determinação para cada curva de calibração e $k$ é a constante $k_s$ de cada sensor calibrado. ....	58
Figura 5.8 – Visão transversal do posicionamento do Pontos de Fixação, Cordão A e B. ....	59
Figura 5.9 – Medição do diâmetro do tubo de PVC para o ponto P14.....	60

Figura 5.10 – Resultado de um exercício de colagem de sensor óptico utilizando a cola Loctite 496. Sensor alinhado pela direção indicada através da seta A. ....	61
Figura 5.11 – Montagem experimental: pontos P1, P10 e P16 estão indicados, assim como os pontos de fixação do tubo de PVC. Sobre a bancada de teste estão indicados também o interrogador óptico e os computador utilizado. ....	62
Figura 5.12 – Procedimento de leitura da distância horizontal de um ponto do tubo de PVC utilizando uma trena a laser. ....	62
Figura 5.13 – Apresentação dos 4 tipos de casos ensaiados para provocar de deflexões ao tubo instrumentado. Na vertical, está indicado a sequência dos pontos P1 a P18; na horizontal, está indicado a direção para à direita e para à esquerda. ....	63
Figura 5.14 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.3.....	64
Figura 5.15 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.3.....	64
Figura 5.16 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.2.....	65
Figura 5.17 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.2.....	66
Figura 5.18 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.2.....	66
Figura 5.19 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.1.....	67
Figura 5.20 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.1.....	68
Figura 6.1 – Visão transversal para tubo instrumentado por 4 cordões ópticos e protegido por um tubo de proteção. ....	76
Figura A.1 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo A. Pontos marcadas escolhidos a cada 0,5 m.....	81
Figura A.2 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo A: comparação entre perfil calculado (Original) e perfil interpolado de curvatura (Reconstruída).....	81
Figura A.3 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo B. Pontos marcadas escolhidos a cada 0,5 m.....	82
Figura A.4 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo B: comparação entre perfil calculado (Original) e perfil interpolado de curvatura (Reconstruída).....	82

Figura A.5 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 07/10/2015.....	83
Figura A.6 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 09/10/2015.....	83
Figura A.7 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 13/10/2015.....	84
Figura A.8 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 23/06/2016.....	84
Figura A.9 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 15/07/2016.....	85
Figura A.10 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 19/08/2016.....	85
Figura A.11 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 07/10/2015.....	86
Figura A.12 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 09/10/2015.....	86
Figura A.13 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 13/10/2015.....	87
Figura A.14 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 23/06/2016.....	87
Figura A.15 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 15/07/2016.....	88

Figura A.16 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 19/08/2016.....	88
Figura B.1 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.0.....	89
Figura B.2 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.0.....	89
Figura B.3 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.1.....	90
Figura B.4 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.1.....	90
Figura B.5 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.2.....	91
Figura B.6 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.2.....	91
Figura B.7 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.3.....	92
Figura B.8 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.3.....	92
Figura B.9 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.0.....	93
Figura B.10 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.0.....	93
Figura B.11 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.1.....	94
Figura B.12 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.1.....	94
Figura B.13 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.2.....	95
Figura B.14 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.2.....	95
Figura B.15 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 3.0.....	96
Figura B.16 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.0.....	96
Figura B.17 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 3.1.....	97
Figura B.18 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.1.....	97
Figura B.19 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 3.2.....	98
Figura B.20 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.2.....	98

Figura B.21 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.0.....	99
Figura B.22 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.0.....	99
Figura B.23 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.1....	100
Figura B.24 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.1.....	100
Figura B.25 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.2....	101
Figura B.26 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.2.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Erro médio quadrático para todas as curvas simuladas. ....	35
Tabela 4.1 – Especificações do sistema Digitild Classic System [39] .....	38
Tabela 5.1 – Especificações do sistema sm125 da Micron Optics [40]. ....	52
Tabela 5.2 – Especificações da trena a laser 419D da Fluke® [41]. ....	52
Tabela 5.3 – Distribuição dos sensores ópticos a rede de Bragg relativo ao comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ): cordão A e B. ....	53
Tabela 5.4 – Valores das constantes utilizadas na calibração dos sensores. ....	56
Tabela 5.5 – Estatística da variação do coeficiente de sensibilidade, $k_s$ , e o coeficiente de determinação, $R^2$ .....	58
Tabela 5.6 – Distâncias obtidas, no eixo axial do tubo de PVC, para as medições dos pontos P1 a P18. ....	60
Tabela 5.7 – Valor absoluto das máximas curvaturas medidas pelos sensores a rede de Bragg para todos os casos experimentais ensaiados.....	68
Tabela 5.8 – Erro absoluto máximo e sua posição no tubo instrumentado para todos os casos ensaiados. ....	70
Tabela 5.9 – Erro máximo relativo ao comprimento do tubo instrumentado e sua posição no tubo para todos os casos ensaiados. ....	71
Tabela 5.10 – Erro máximo relativo ao máximo deslocamento horizontal e sua posição no tubo para todos os casos ensaiados.....	72
Tabela 5.11 – Raiz quadrada do erro médio quadrático para todos os casos ensaiados. ....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A – Área da Seção transversal de uma fibra óptica  
d – Deslocamento horizontal  
E – Módulo de Young  
EMQ – Erro médio quadrático  
FBG – *Fiber Bragg Grating*  
FDM – *Frequency Domain Multiplexing*  
FFP – Filtro de Fabry-Perrot  
g – Módulo da aceleração da gravidade  
 $k_s$  – Constante de sensibilidade relativa à deformação de uma rede de Bragg  
 $k_t$  – Constante de sensibilidade relativa à variação de Temperatura de uma rede de Bragg  
L – Comprimento de um torpedo  
LIF – Laboratório de Instrumentação e Fotônica  
m – Massa de um corpo  
 $n_{eff}$  – Índice de refração efetivo de uma rede de Bragg  
OFDR – *Optical Frequency Domain Reflectometry*  
OTDR – *Optical Time Domain Reflectometry*  
 $p_e$  – Coeficiente efetivo para o efeito fotoelástico  
PVC – Policoreto de vinila  
 $R^2$  - Coeficiente de determinação  
std – Desvio padrão  
TDM – *Time Domain Multiplexing*  
TNB – Conjunto de vetores formados por: vetor tangente ( $\vec{T}$ ), vetor normal ( $\vec{N}$ ) e vetor binormal ( $\vec{B}$ )  
WDM – *Wavelength Division Multiplexing*  
 $\alpha$  – Coeficiente de expansão térmica da sílica  
 $\beta$  – Ângulo em radianos associado a um arco de círculo  
 $\delta\theta$  – Variação do ângulo de um torpedo em relação à vertical  
 $\varepsilon$  – Deformação axial relativa  
 $\kappa$  – Curvatura  
 $\Lambda$  – Período de modulação do índice de refração de uma rede de Bragg  
 $\lambda_B$  – Comprimento de onda de Bragg  
 $\eta$  – Coeficiente termo-óptico  
 $\rho$  – Raio de curvatura  
 $\tau$  – Módulo da tensão mecânica

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Buscando garantir a segurança de construções e prevenir possíveis desastres ambientais, materiais ou humanitários, faz-se necessário a implementação de métodos e de sistemas de monitoramento que previnam a ocorrência de deslizamento de solo. Pode ser citado como exemplo o desastre ocorrido em Bento Rodrigues, região de Mariana – Minas Gerais – Brasil, em novembro de 2015, na qual a barragem de rejeitos de Fundão se rompeu devastando uma extensa área, como mostra a Figura 1.1. O impacto foi incalculável: vidas humanas foram perdidas, uma imensa devastação ambiental, incluindo a contaminação do Rio Doce, a destruição de parte da fauna e da flora da região; diversos desabrigados e danos materiais [1]. Um outro exemplo foi a tragédia do Morro Bumba, em Niterói – Rio de Janeiro – Brasil, ocorrida em abril de 2010. Centenas de casas, que haviam sido construídas em terrenos instáveis, foram soterradas, 48 pessoas morreram e quase 3 mil pessoas foram atingidas pelo desastre [2].



Figura 1.1 – Região de Bento Rodrigues, distrito de Mariana, onde ocorreu o rompimento da barragem de Fundão [1].

Os exemplos mencionados corroboram para o fato de que a instrumentação geotécnica é um elemento primordial na indústria de construção civil. Os registros revelam que a instrumentação voltada para o monitoramento de encostas surgiu entre os anos de 1930 e 1940 [3], desta forma existem atualmente diversas maneiras de avaliar as condições de solos em relação a sua estabilidade. Pode ser citado como exemplo o

medidor de nível de água, o marco superficial, o piezômetro, o medidor de deslocamento de superfície e torpedos com inclinômetros [4]. Os dois últimos métodos podem ser utilizados para medir movimentação de solos, por exemplo, movimentação de taludes colúviais, taludes de barragem de rejeitos, escavações a céu aberto, mineração, aterros sanitários e obras rodoviárias [4]-[6]. Na Figura 1.2, podemos ver um exemplo de sistema de monitoramento que utiliza torpedos com inclinômetro.



Figura 1.2 – Exemplo de um sistema de monitoramento de torpedo com inclinômetro [4].

Os inclinômetros são aplicáveis às medições de deslocamento de massa de solo no interior de uma região de interesse, e eles vêm sendo largamente utilizados, como exemplo, na avaliação de taludes em barragens, em obras de rodovias e em escavações a céu aberto e aterro sanitários [4]. O uso extensivo de inclinômetros vem do fato de que eles são eficazes na detecção de superfícies com alta probabilidade de ruptura e, em geral, resultam em parâmetros mais representativos quanto às análises de deslocamentos horizontais de solo em relação a outros métodos de instrumentação geotécnica [6].

Um importante aspecto a ser levado em consideração sobre o emprego de torpedos com inclinômetro é que a eficácia deste método depende da competência da equipe técnica responsável pela execução das medições em campo, como também o número considerável de intervenções em campo necessárias para acompanhar a evolução do deslocamento de solo ao longo do tempo. Por exemplo, pode-se haver cerca de 30 campanhas de medição em um período apenas de 4 meses [6]; esse fato revela o custo operacional necessário para acompanhar a evolução de determinada região de interesse. Assim, torna-se pertinente a adoção de uma metodologia que seja capaz de gerar um alto valor na avaliação de deslocamentos horizontais de solo, mantendo a exatidão necessária,

e que opere de maneira contínua, sem a necessidade de intervenções periódicas ao longo do tempo.

Um ponto bastante importante para propor uma alternativa à instrumentação geotécnica por inclinômetros é a avaliação das diversas vantagens obtidas de um sistema de monitoramento óptico. Os sensores ópticos possuem grandes vantagens em comparação à outras tecnologias de monitoramento, pois eles são imunes às interferências eletromagnéticas, possuem tamanho e peso reduzidos, são intrinsicamente seguros, possuem grande capacidade de multiplexação e dispõe de grande resistência mecânica. Além disso, os sensores ópticos podem estar a quilômetros de distâncias de suas unidades de aquisição de dados, pois a própria fibra óptica atua como um meio de envio e recepção de dados [7]. Todas as vantagens citadas revelam que os sistemas que utilizam sensores ópticos possuem grande potencial para se estabelecerem como uma tecnologia eficaz para o monitoramento de fenômenos geológicos.

## **1.2 Objetivo**

O presente trabalho tem por objetivo propor uma alternativa ao método de monitoramento de deslocamento de solos por torpedo com inclinômetro. Além disso, o método alternativo deve propor um sistema de monitoramento contínuo, que não necessite de intervenções periódicas em campo, que possa captar dados em tempo real e que resulte, potencialmente, em um sistema de instrumentação geotécnica de mais baixo custo em relação ao custo total da solução por torpedo com inclinômetro.

Os seguintes sub-objetivos foram definidos com base no objetivo geral deste estudo:

- Propor uma metodologia para um sistema de monitoramento, utilizando sensores a rede de Bragg, capaz de medir deslocamento de solos;
- Desenvolver um algoritmo capaz de converter as leituras de sensores ópticos em leituras de deslocamento em coordenadas cartesianas em duas dimensões, indicando deslocamento provocados ao sistema de monitoramento de maneira absoluta;
- Validar o algoritmo proposto para um caso real, ou seja, utilizar dados de medições por torpedos de inclinômetros feitos em campo para comprovar a eficácia do algoritmo desenvolvido;

- Projetar, construir e executar testes em escala laboratorial para simular o funcionamento do sistema de monitoramento proposto e avaliar o desempenho das medições realizadas.

### 1.3 Metodologia

Com o objetivo de medir deslocamentos de movimentações de solo, o presente trabalho propõe um tubo instrumentado o qual é capaz de medir a posição de cada ponto ao longo de sua própria extensão. Assim, uma vez instalado na vertical no interior do solo, de uma encosta ou barragem por exemplo, o tubo instrumentado poderia fornecer os dados do perfil do deslocamento de solo ao longo da profundidade. A instrumentação do tubo é realizada por meio de sensores ópticos a rede de Bragg, os quais devem medir as deformações na superfície do tubo ao longo de seu comprimento.

Dois cordões de sensores ópticos diametralmente opostos devem ser fixados ao tubo, por sua vez os sensores ópticos devem ser conectados à uma unidade de aquisição de dados. Essa unidade executa a interrogação de cada sensor separadamente, pois os sensores ópticos são multiplexados em relação ao comprimento de onda de Bragg de cada sensor. Portanto, o interrogador óptico deve possuir a tecnologia de multiplexação por WDM (*Wavelength Domain Multiplexing*). Embora existam outras técnicas de interrogação óptica, o método de WDM já está bastante consolidado e há várias opções de soluções comerciais atualmente.

Com base nos dados de deformação oriundos dos sensores ópticos, deve ser calculado, para cada sensor, a curvatura do tubo na região sobre a qual os sensores estão fixados. Os dados de curvatura devem ser interpolados para gerar um perfil de curvatura ao longo de todo o tubo instrumentado, de modo a obter a variação da curvatura de maneira suave e de boa resolução ao longo do comprimento do tubo.

Após o perfil de curvatura do tubo ser definido, para um instante no tempo, um algoritmo de reconstrução de curva fornece os dados da posição do perfil do tubo, ou seja, o perfil da posição do tubo é estabelecido em coordenadas cartesianas. O algoritmo de reconstrução é capaz de calcular o perfil da curva desejada com base apenas do perfil de curvatura obtido pelos sensores ópticos, utilizando as equações de Frenet-Serret e atendendo às condições iniciais necessárias.

Por fim, com o perfil do tubo instrumentado definido, é possível realizar a análise de deslocamento do solo na região onde o tubo foi instalado. A Figura 1.3 resume os

passos necessários para a análise do deslocamento horizontal com base nos sensores ópticos de deformação.

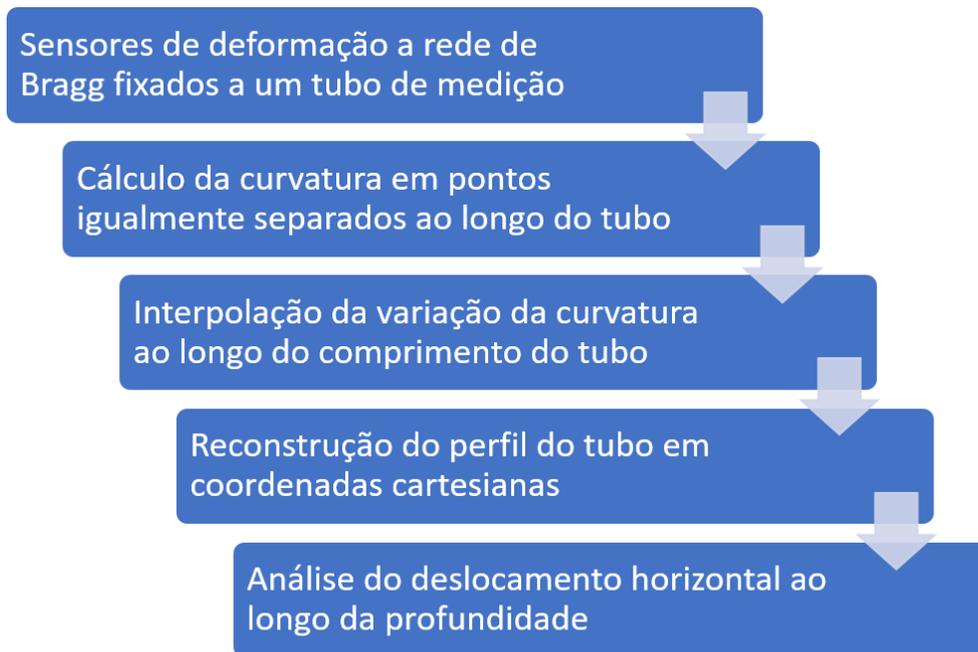


Figura 1.3 – Etapas para a análise do deslocamento horizontal de massas com base nos dados dos sensores ópticos.

#### 1.4 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está estruturada de acordo com os itens abaixo:

- Capítulo 1: motivação deste trabalho, objetivo, metodologia e a estrutura do trabalho;
- Capítulo 2: fundamentos teóricos sobre o uso e princípio de funcionamento de torpedos com inclinômetros. Também são apresentados os fundamentos teóricos acerca dos sensores a rede de Bragg e o seu uso como sensores de deformação. Adicionalmente, é feita a apresentação das equações de Frenet-Serret utilizadas no desenvolvimento do algoritmo proposto neste estudo. Além disso, é realizada uma apresentação sobre interpolação de curva utilizando o método por *splines* cúbicas. Por fim, é apresentada a revisão bibliográfica dos principais trabalhos relacionados ao presente estudo;
- Capítulo 3: desenvolvimento do algoritmo para reconstrução de curvas bidimensionais é apresentada e é discutida uma forma para medir curvatura de estruturas, além disso, resultados preliminares da reconstrução de curva são discutidos;

- Capítulo 4: uma exposição acerca de um caso real de medição por torpedo com inclinômetro é realizada. Adicionalmente, a aplicação do algoritmo desenvolvido para tal caso e seus resultados relacionados são apresentados e discutidos;
- Capítulo 5: a montagem experimental realizada no presente trabalho é descrita, assim como, a calibração dos sensores a rede de Bragg é apresentada e seus resultados exibidos. Casos dos testes experimentais realizados são apresentados e seus resultados são avaliados e discutidos;
- Capítulo 6: uma discussão abrangendo todo o trabalho é realizada, bem como as principais conclusões são expostas. Adicionalmente, propostas de futuros estudos são apresentados.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentado o princípio de funcionamento de torpedos com inclinômetros aplicados ao monitoramento de deslocamento de massa de solo. Em seguida, os fundamentos teóricos de sensores a Rede de Bragg são apresentados, uma vez que tais sensores são tema de grande importância para o desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto neste trabalho.

Uma breve apresentação sobre as fórmulas de Frenet-Serret, e seus conceitos matemáticos associados, são expostos neste capítulo, uma vez que essas equações são a base da construção do algoritmo desenvolvido neste estudo. Além disso, os fundamentos acerca do método de interpolação por *spline* cúbicas são expostos em seguida.

Por fim, neste capítulo também é abordado uma revisão bibliográfica sobre o uso de sensores a rede de Bragg aplicados ao monitoramento de massa de solos e uma revisão bibliográfica sobre métodos que utilizam sensores de deformação para reconstruir o perfil de uma estrutura ou um objeto, para diversos tipos de aplicações diferentes.

### 2.1 Instrumentação geotécnica por torpedos de inclinômetros

#### 2.1.1 Princípio de funcionamento

Os inclinômetros são utilizados, na instrumentação geotécnica, para mensurar eventos de deslocamento horizontal de solo, mais comumente, no interior de um maciço; todavia, eles são aplicáveis ao monitoramento de deslocamentos de solo também em superfícies e subsuperfícies [4]. Além disso, os inclinômetros são úteis para detectar não somente deslizamentos de solo; como também, para definir superfícies de deslizamentos em relação às zonas estáveis ou para definir superfícies cisalhantes no interior de um talude, por exemplo [5].

Segundo DUNNICLIFF [8], o sistema de monitoramento baseado em torpedo com inclinômetro possui os seguintes componentes:

- Um tubo guia instalado permanentemente;
- Um torpedo com parte sensível à gravidade e portátil;
- Uma unidade móvel para aquisição de dados;
- Um cabo de fornecimento de energia com marcações para sustentar e alimentar o torpedo ao longo do tubo guia.

O torpedo com inclinômetro é inserido no tubo guia instalado previamente em uma região de interesse. O tubo guia possui duas ranhuras perpendiculares entre si, comumente chamadas de Eixo A e Eixo B, e que deve ser instalado na vertical. Além disso, uma ranhura necessita estar sempre alinhada, preferencialmente com a direção de maior probabilidade de deslocamento de solo, sendo esta a direção principal (Eixo A). Também, o tubo guia deve ser instalado a uma profundidade que supere a profundidade máxima de deslocamento em camadas internas do solo, ou seja, deve-se atingir a profundidade de uma zona estável [4].

O torpedo é conduzido ao longo do tubo guia, suspenso pelo cabo de energia, e guiado pelas ranhuras deste tubo. Leituras são feitas a intervalos constantes ao longo do tubo guia, esses intervalos são compatíveis ao comprimento do torpedo, logo a cada intervalo é realizada a medição do ângulo em relação a vertical e, assim, calculada o deslocamento horizontal. Com a sucessivas medições feitas desde o fundo do tubo guia até a superfície, é possível construir o perfil de deslocamento horizontal da região de interesse. A Figura 2.1 mostra o esquemático geral do princípio de funcionamento da medição por torpedo de inclinômetro.

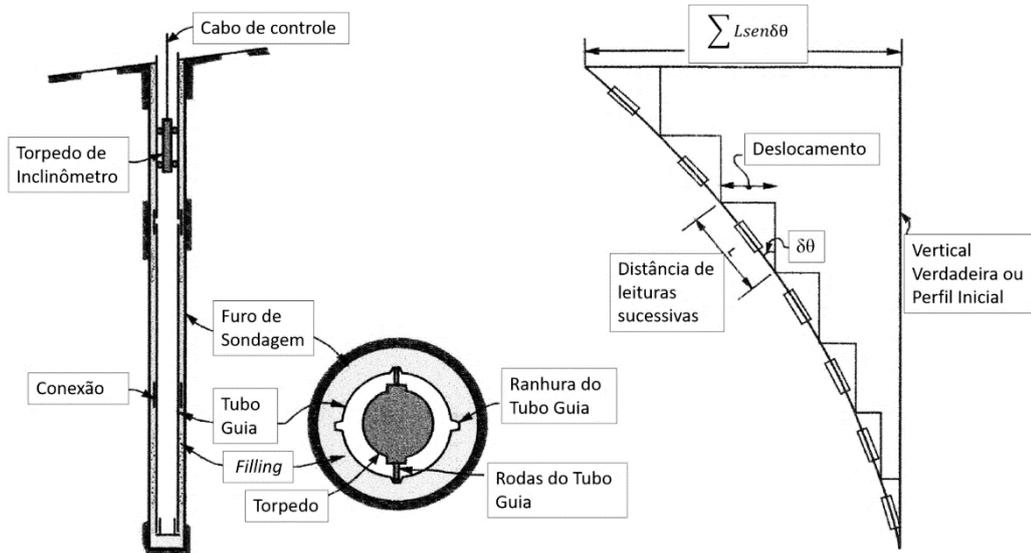


Figura 2.1 – Esquemático geral resumindo o princípio de funcionamento de um inclinômetro para medir deslizamento de solo, adaptado de [5].

A Figura 2.1 apresenta o deslocamento horizontal para um dado intervalo de medição é dado pela Equação 2.1 [5].

$$L \text{ sen } \delta\theta \quad 2.1$$

onde  $L$  é o comprimento do torpedo e  $\delta\theta$  a variação da inclinação do torpedo com relação à vertical ou ao perfil inicial. Somando-se o deslocamento obtido através da Equação 2.1, pode-se construir todo o perfil do deslocamento interno do solo, partindo de uma zona estável até a superfície.

### 2.1.2 Aplicações

Em [5], podemos verificar a aplicação da instrumentação geotécnica por inclinômetros para o monitoramento dos movimentos de taludes instáveis, na qual o uso do torpedo com inclinômetros é essencial para quantificar as deformações em subsuperfícies. Nesse trabalho, busca-se desenvolver um protótipo de torpedos de inclinômetros através de sensores magnéticos, todavia há algumas contrapartidas, entre elas a dificuldade de calibração e a influência da histerese na resposta do sensor.

Uma análise no comportamento de um aterro municipal é realizada em [6], em que diversos métodos de instrumentação, é utilizado dentre eles, o inclinômetro. Nesse estudo, foi acompanhada a evolução de um aterro sanitário, onde foram realizadas cerca de 30 campanhas de medição ao longo de 4 meses utilizando os inclinômetros. A Figura 2.2 mostra os gráficos das leituras geradas nesse trabalho, podemos ver uma profundidade de 30 metros e deslocamentos horizontais na ordem de 500 mm. É possível observar também uma zona onde não há um deslocamento considerável em profundidades mais elevadas; também pode ser visto que o Eixo A, à esquerda, possui um deslocamento elevado, ao passo que o eixo B possui um deslocamento horizontal de menor magnitude.

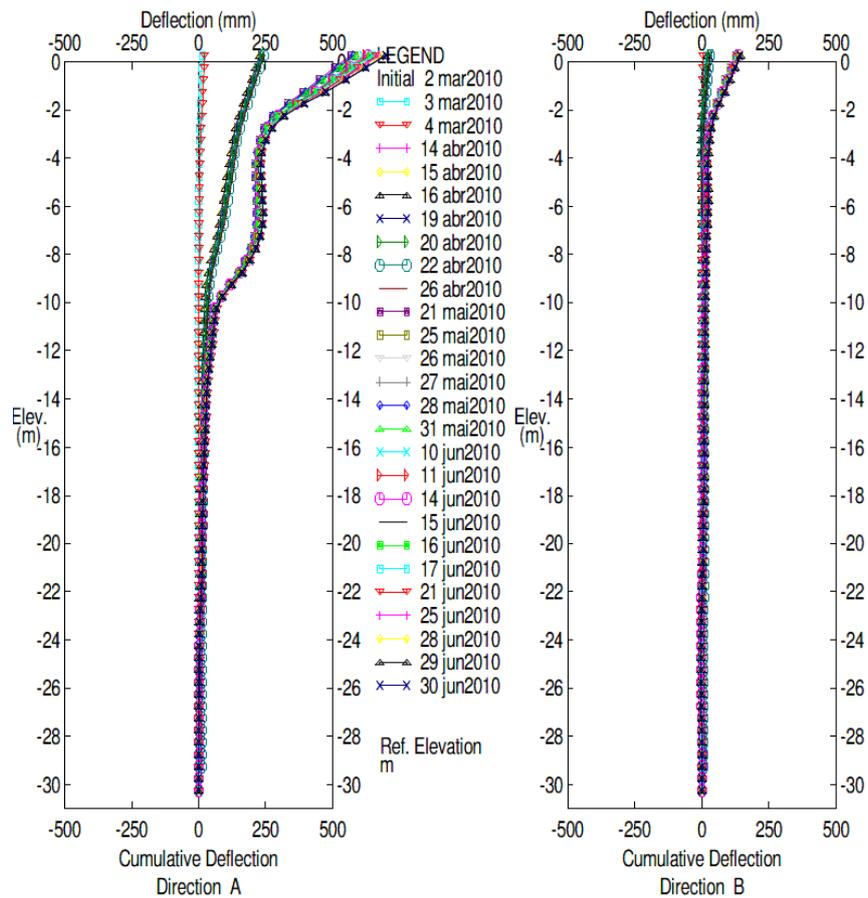


Figura 2.2 – Leituras de inclinômetros em um aterro municipal [6].

## 2.2 Sensores a rede de Bragg (FBG)

### 2.2.1 Fundamentos

Atualmente, no que tange às aplicações de fibras ópticas para sensoriamento, existem diversos tipos de sensores, dentre os quais há os sensores a rede de Bragg. Tais sensores são utilizados para um grande número de finalidades, por exemplo, como sensores de temperatura, sensores de deformação, transdutores de pressão, transdutores de aceleração, transdutores de tensão elétrica e sensores de gases [9][10].

As redes de Bragg, comumente chamadas de FBG (*Fiber Bragg Gratings*), são formadas pela variação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica, como exposto na Figura 2.3. Flutuações periódicas são geradas no núcleo de fibra óptica mantendo um espaçamento fixo denominado de período de modulação do índice de refração,  $\Lambda$ . Essa modulação no índice de refração do núcleo de fibra óptica age como um filtro óptico de determinada faixa de comprimento de onda, assim parte de um espectro

que se propaga em uma fibra óptica é refletido de maneira preferencial. Desta forma, é definido um espectro de transmissão e um espectro de reflexão para cada rede de Bragg inscrita em uma fibra.

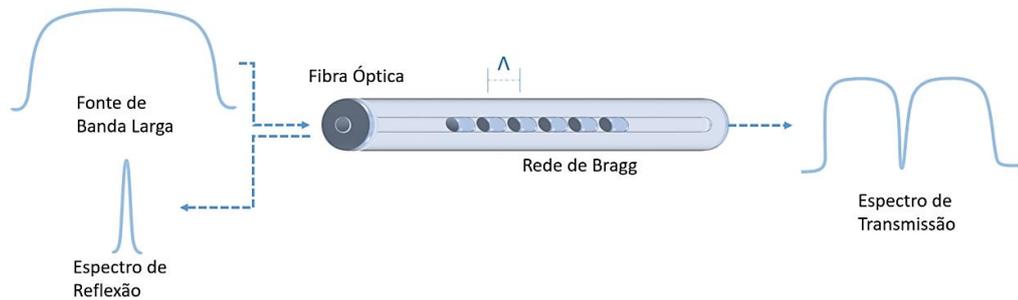


Figura 2.3 – Princípio de funcionamento de rede de Bragg em uma fibra óptica.

O espectro de reflexão de uma rede de Bragg dá origem ao comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , este comprimento pode ser definido pela Equação 2.2. O parâmetro  $n_{Eff}$  é o índice de refração efetivo do modo de propagação da onda. Pode-se, então, observar a dependência do comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , com o período de modulação do índice de refração,  $\Lambda$ , do núcleo de uma fibra; caso  $\Lambda$  seja alterado, o pico do máximo comprimento de onda refletido será modificado. Variações da temperatura e da deformação longitudinal na fibra óptica são exemplos de fatores que deslocam o espectro de reflexão de uma rede de Bragg [11].

$$\lambda_B = 2n_{Eff} \Lambda \quad 2.2$$

A partir da Equação 2.2, é possível chegar na Equação 2.3 [12], a qual relaciona a variação do comprimento de onda de Bragg com o efeito da deformação longitudinal aplicada à fibra óptica e com o efeito da variação de temperatura; ou seja, como mencionado, ocorre o deslocamento do comprimento de onda de Bragg quando esforços mecânicos e variações de temperaturas são submetidos à rede.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha + \eta)\Delta T \quad 2.3$$

Na Equação 2.3,  $p_e$  é o coeficiente efetivo para o efeito fotoelástico;  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica da sílica;  $\eta$  é coeficiente termo-óptico e a deformação axial relativa é dada por  $\varepsilon$ . Valores típicos das constantes de sensibilidades da Equação 2.3 são aproximadamente:

- $(1 - p_e)$  igual a 0,78;
- $(\alpha + \eta)$  igual a  $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

### 2.2.2 Métodos de fabricação

Há dois tipos de métodos principais de fabricação de redes de Bragg em fibras ópticas: o método holográfico, que será discutido mais a frente, e métodos não-interferométricos; este último, é baseado na aplicação direta de um feixe periódico de radiação ultravioleta em fibras fotossensíveis [13].

As fibras ópticas fotossensíveis normalmente possuem o seu núcleo dopado com Germânio, assim quando a radiação ultravioleta incide na fibra ocorre uma sensibilização e o índice de refração do núcleo da fibra é modificado. Pelo método interferométrico, um raio de ultravioleta é dividido em dois e, após reflexões, eles são encontrados novamente gerando um padrão de interferência óptica. Este padrão formado é associado ao comprimento de onda de Bragg que se deseja produzir e é dependente do ângulo de encontro entre os dois raios ultravioletas [13]. Vale salientar que este método depende da coerência dos raios emitidos e da distância espacial que os raios percorrem.

Um outro método bastante empregado pela sua simplicidade é o método por máscara de fase. Neste método, uma máscara contendo finas ranhuras, geradas por um processo de fotolitografia, é disposta como anteparo a fim de originar a difração de raios incidentes. A razão da distância entre as marcações da máscara definirá o comprimento de Bragg a ser produzido na fibra óptica. Uma desvantagem deste método é o fato que é preciso obter uma máscara de fase para cada comprimento de onda de Bragg que se deseja produzir.

Um outro método de grande vantagem é o método que mescla o uso da máscara de fase com o da interferometria; nesta forma é possível obter um método de fabricação de redes de Bragg sintonizável, ou seja, quando há a possibilidade de ajustar qual comprimento de Bragg deseja-se fabricar; este método também é chamado de interferômetro de Talbot [13]. A máscara de fase serve como um divisor de raios incidentes os quais refletem em dois espelhos simetricamente dispostos e que são capazes de girar em torno de seus eixos, veja a Figura 2.4. Os raios oriundos da máscara de fase refletem nos espelhos e, ao entrar em contato com a fibra, provocam um padrão de interferência definindo  $\lambda_B$ . Ao alterar o ângulo formado pelos dois espelhos, torna-se possível sintonizar qual  $\lambda_B$  se deseja produzir. O estudo [14] mostra um exemplo do uso dessa técnica na fabricação de redes de Bragg em uma mesma fibra e com diferentes comprimentos de onda.

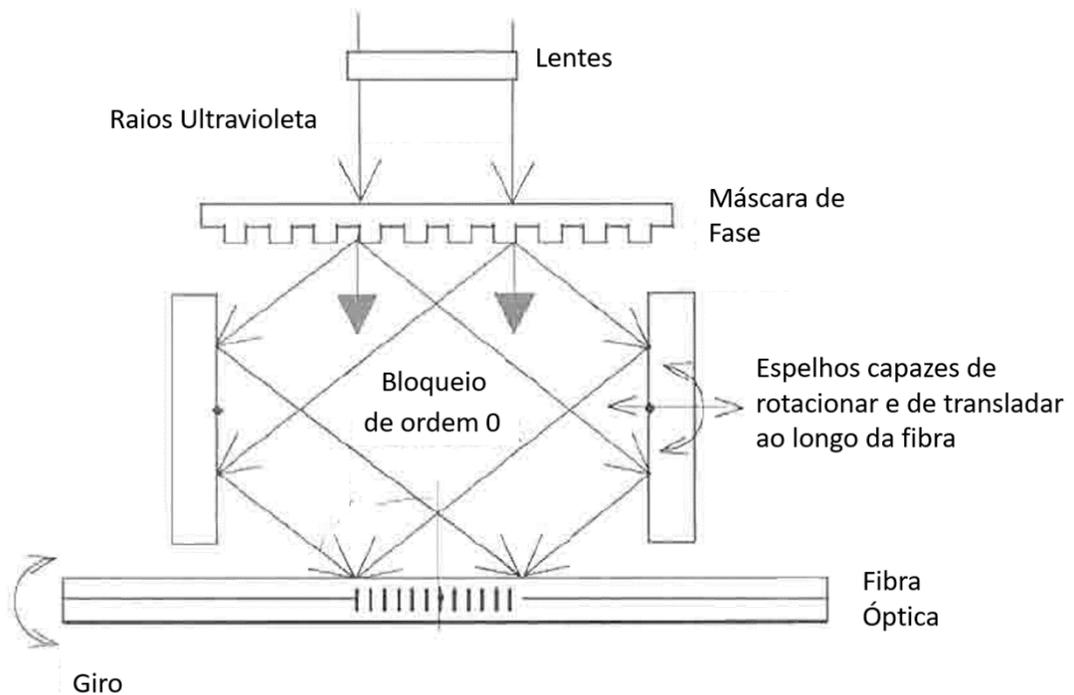


Figura 2.4 – Método de fabricação de rede de Bragg através do interferômetro de Talbot, adaptado de [13].

### 2.2.3 Métodos de multiplexação

Uma das principais vantagens das redes de Bragg é sua capacidade de multiplexação, na qual uma série de sensores a rede de Bragg podem ser fabricados em uma mesma fibra óptica, como também vários conjuntos de sensores podem ser interrogados por um mesmo sistema de demodulação. Esta característica representa um grande vantagem dos sensores a rede de Bragg em relação a outros tipos de tecnologia, como os sensores elétricos, pois reduz a complexidade e o custo em casos quando uma grande quantidade de sensores é requerida para uma aplicação. Como exemplo, pode-se citar os testes em aviões em que uma grande quantidade de dados é necessária para validar a resposta mecânica das asas de aeronaves [15].

No que tange aos métodos de multiplexação, existem basicamente três tipos de metodologias [16]:

- WDM (*Wavelength Division Multiplexing*);
- TDM (*Time Domain Multiplexing*);
- FDM (*Frequency Domain Multiplexing*).

A técnica de WDM é bastante utilizada e há vários equipamentos comerciais disponíveis; nesta técnica existe um conjunto de sensores a rede de Bragg com diferentes

comprimentos de onda de Bragg, desta forma é possível distinguir a resposta de cada sensor separadamente ao analisar o espectro óptico de reflexão do conjunto de sensores. Na Figura 2.5, vemos um exemplo desta técnica de multiplexação utilizando um analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyzer*). O OSA é um espectrômetro óptico capaz de obter a correlação entre potência óptica e comprimento de onda de um sinal em uma determinada largura de banda.

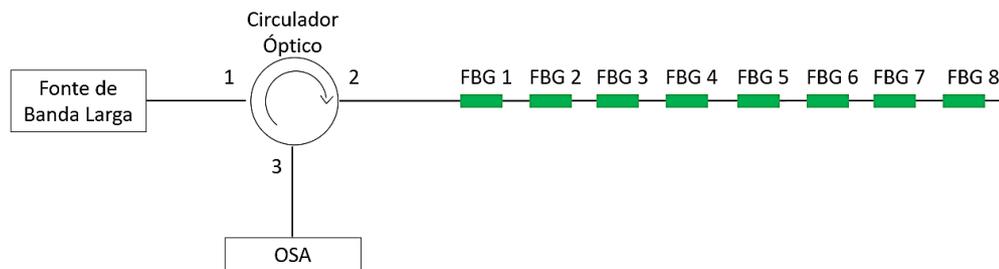


Figura 2.5 – Princípio de multiplexação por WDM, cada sensor a rede de Bragg, em verde, possui um comprimento de onda de Bragg distinto e contido no espectro da fonte de banda larga.

A técnica TDM utiliza a diferença espacial entre os sensores a rede de Bragg, em que o tempo de resposta, ou seja, a duração da transmissão do sinal óptico desde a sua reflexão em uma rede de Bragg até a recepção na unidade de aquisição, é o parâmetro utilizado para separar a resposta de cada sensor.

Em um tipo de aplicação da técnica TDM, utiliza-se um equipamento chamado OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) para a demodulação do sensor [17], sendo necessária uma distância espacial mínima entre os sensores associada aos parâmetros do OTDR utilizado. Em outro cenário, pode-se utilizar vários canais ópticos os quais são alternativamente selecionados por um *switch* óptico – dispositivo que chaveia a emissão e recepção de um sinal óptico, no domínio do tempo, entre os diferentes canais ópticos [18]. As técnicas WDM e TDM podem ser combinadas [17][18], como mostra a Figura 2.6, resultando no aumento na capacidade de interrogação por um mesmo dispositivo e reduzindo custos.

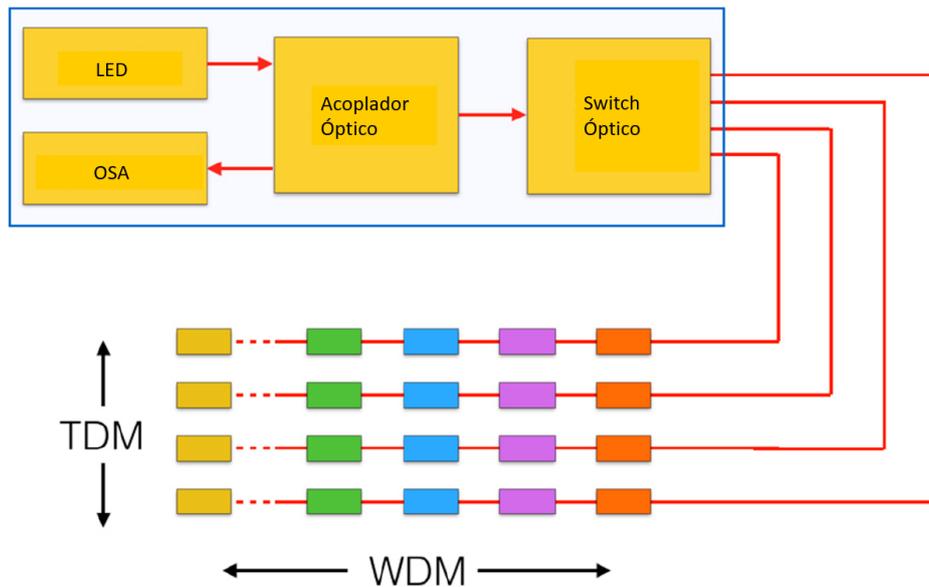


Figura 2.6 – Esquemático da combinação da técnica TDM e WDM, onde as caixas coloridas representam sensores a rede de Bragg, adaptado de [18].

A técnica de demodulação por FDM utiliza, assim como a técnica TDM, a diferença espacial entre sensores a rede de Bragg, os quais podem ter o mesmo comprimento de onda ao longo da fibra. A resposta de cada sensor é multiplexada no domínio da frequência, entretanto, utilizando um OFDR (*Optical Frequency Domain Reflectometer*). Vale salientar que esta técnica se difere das demais pela capacidade de multiplexação de sensores na ordem de milhares e da grande proximidade espacial na qual os sensores podem estar dispostos [15].

#### 2.2.4 Métodos de interrogação

Atualmente, existem sistemas próprios para a interrogação de rede de Bragg e podem ser diferenciados de acordo com a frequência de aquisição; os sistemas estáticos, possuem frequência de aquisição variando entre 1 e 10 Hz; já aqueles chamados de sistema dinâmicos, são os que possuem frequência de aquisição da ordem de kHz [18]. O presente estudo contempla o uso de sistemas estáticos apenas.

Pela Figura 2.5, pode ser visto um método bastante simples para interrogar sensores a rede de Bragg através de um OSA e uma fonte de banda larga. A emissão do sinal gerado passa da porta 1 para a porta 2 do circulador óptico, em seguida ocorre a reflexão do sinal pelas redes de Bragg. O espectro de reflexão é transmitido da porta 2 para porta 3; e por fim, é detectado pelo OSA, o qual gera o espectro de reflexão de todos os sensores do conjunto simultaneamente.

Vale ressaltar que há algumas contrapartidas ao utilizar tal método: seu elevado custo, sua baixa resolução espectral, seu baixo tempo de resposta, sua reduzida faixa dinâmica e sua limitada largura de banda [19]. Desta maneira, há outros métodos específicos para interrogar rede de Bragg visando melhorar o desempenho na leitura dos sensores e reduzir custos.

Em outra perspectiva, pode ser feita a distinção entre as técnicas de interrogação pelos parâmetros: fonte de sinal óptico gerada e método de detecção do espectro de reflexão. Assim, os seguintes grupos para a interrogação de sensores podem ser apresentados [19]:

- Método interferométrico;
- Método que utiliza uma fonte óptica sintonizável;
- Método que utiliza um filtro óptico sintonizável.

No presente trabalho é apresentado o sistema de interrogação óptica que utiliza filtro óptico sintonizável de Fabry-Perrot; em [19]-[21] é apresentada uma revisão das diversas possibilidades para a interrogação de redes de Bragg referentes aos grupos mencionados anteriormente.

O Filtro de Fabry-Perrot (FFP) tem sido muito utilizado em sistemas de interrogação de rede de Bragg e ele pode ser sintonizado numa determinada faixa de comprimento de onda. Esse filtro é formado por uma cavidade ressonante, onde em seu interior ocorrem sucessivas reflexões do sinal emitido, limitando a largura espectral de transmissão da radiação (Figura 2.7). Essa limitação é dependente do comprimento da cavidade; assim, associando um elemento piezoelétrico – o qual correlaciona sua deformação mecânica à tensão elétrica – é possível sintonizar a largura da banda de passagem deste filtro [22].

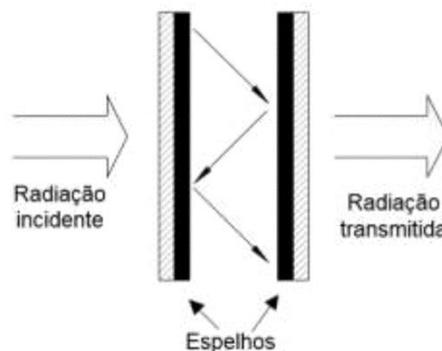


Figura 2.7 – Esquemático do princípio de funcionamento de um filtro de Fabry-Perrot [22].

Com o uso de um FFP sintonizável com um elemento piezoelétrico, é possível aplicar este dispositivo a um sistema para interrogação de múltiplos sensores a rede de Bragg. Na Figura 2.8, há um esquemático de um sistema para demodular um conjunto com quatro sensores a rede de Bragg, no qual um sinal de varredura é aplicado ao FFP, assim sua banda de transmissão é alterada constantemente dentro de um intervalo específico. Com uma banda larga como fonte de radiação, ocorre uma reflexão de cada sensor a rede de Bragg (R1-4); esse sinal é constantemente enviado ao FFP sintonizável. Por sua vez, o FFP varre separadamente o sinal de reflexão de cada FBG, sendo assim possível obter o a resposta do pico de reflexão de cada FBG individualmente na saída [20].

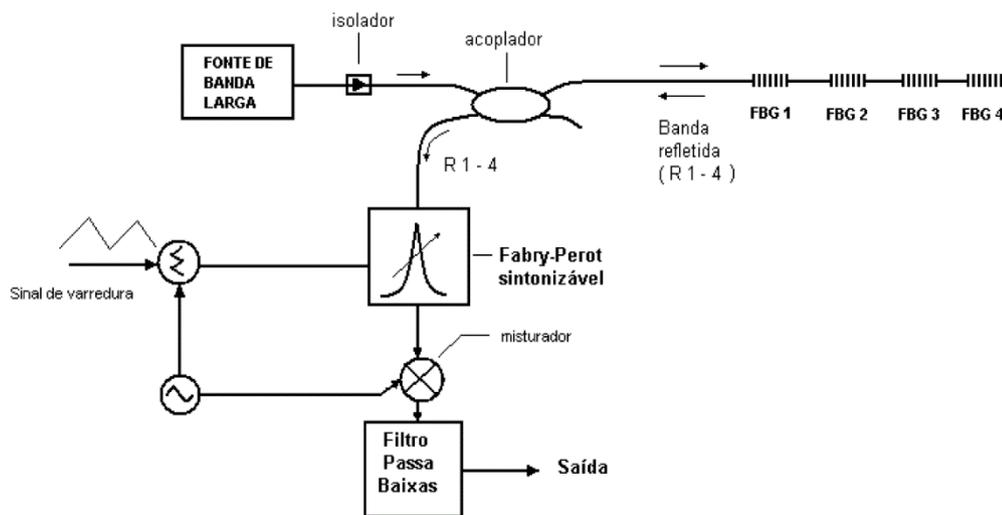


Figura 2.8 – Esquemático de sistema de modulação de múltiplos sensores a rede de Bragg utilizando um FFP sintonizável, adaptado de [20].

### 2.2.5 Sensores de deformação por rede de Bragg

Como vimos na Equação 2.3, redes de Bragg sofrem influência da deformação axial causada em uma fibra óptica, portanto pode ser correlacionada a deformação sofrida por um corpo com a variação do comprimento de Bragg. Para isto, basta fixar a rede de Bragg na dada estrutura de interesse, desta forma o sensor sofrerá o mesmo esforço mecânico da estrutura a qual está aderido. Todavia, como mencionado anteriormente, sensores a rede de Bragg sofrem variações tanto causada pela deformação axial em uma fibra óptica, quanto por variações de temperatura. Assim, para a medição de deformação através desses sensores, é necessário compensar a influência térmica a fim de obter uma melhor exatidão na leitura.

Existem diversos métodos de compensação da influência da temperatura para sensores a rede de Bragg, WERNECK [7] e RIBEIRO [23] descrevem algumas delas. Será discutido nesta seção dois métodos de compensação; o primeiro, muito comumente utilizado; o segundo, referente ao presente estudo.

Um possível método de compensação de temperatura é o uso de uma segunda rede de Bragg, a qual permanece livre de esforços mecânicos e que busca sofrer variações no  $\lambda_B$  causadas apenas pela variação de temperatura. Pode-se realizar os seguintes cálculos; da Equação 2.3, é possível reescrevê-la como na Equação 2.4 para o sensor a rede de Bragg (1) fixado em um corpo; também a Equação 2.3 pode ser reescrita para o caso de um sensor solto (2), ou seja, consideramos sua deformação axial nula; assim, é possível chegar na Equação 2.5. Substituindo a Equação 2.5 na Equação 2.4, chegamos à Equação 2.6. Vale destacar que  $k_s$  e  $k_t$  é a constante de sensibilidade em relação à deformação axial e a constante de sensibilidade em relação à variação de temperatura, respectivamente.

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = k_s \varepsilon_1 + k_T \Delta T \quad 2.4$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = k_T \Delta T \quad 2.5$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = k_s \varepsilon_1 \quad 2.6$$

Pela Equação 2.6, é possível verificar que a influência da temperatura foi compensada através da leitura do segundo sensor, (2), desta forma é possível medir a deformação sofrida pela rede de Bragg fixada no corpo de interesse, (1).

O método exposto possui como principal desvantagem o fato que nem sempre é possível considerar o segundo sensor, (2), como livre de influência de deformação; outro ponto importante é que é preciso garantir que os dois sensores estejam à mesma temperatura, o que nem sempre ocorre. Para casos em que não há a necessidade de uma exatidão elevada para a medição de deformação, o método apresentado torna-se muito simples e eficaz.

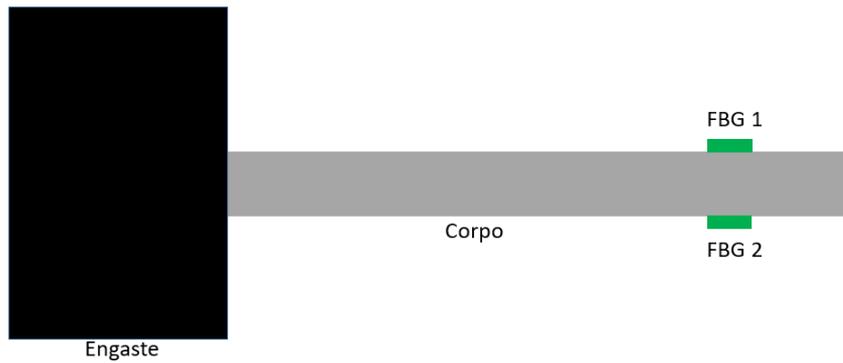


Figura 2.9 – Esquema representado o posicionamento dual de sensores a rede de Bragg em um corpo de interesse, o qual está fixado por um engaste.

Um outro método para a compensação de temperatura é o método de medição dual de deformação. Neste método, utilizam-se dois sensores a rede de Bragg fixados em um mesmo corpo e opostos entre si, veja Figura 2.9; assim, é realizada a leitura diferencial dos sensores, ou seja, a resposta de um sensor é subtraída pela do outro sensor. Quando esta configuração é viável para uma aplicação, obtém-se uma leitura livre da variação de temperatura, uma vez que o termo associado à variação de temperatura dos sensores, da Equação 2.3 é o mesmo. O resultado é dado pela Equação 2.7, na qual foi considerado que os sensores pertencem à mesma fibra óptica, ou seja, possuem o mesmo  $k_s$ .

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = k_s(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad 2.7$$

Como veremos mais a frente este segundo método de compensação é utilizado no presente estudo.

### 2.3 Equações de Frenet-Serret

No estudo do cálculo vetorial no espaço Euclidiano bidimensional, o movimento de uma partícula no espaço pode ser dado pela função vetorial da Equação 2.8, tendo  $t$  como parâmetro.

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} \quad 2.8$$

O comprimento do espaço percorrido por essa partícula em um dado intervalo, digamos de 0 a  $t$ , é dado pela Equação 2.9. Tal comprimento é chamado de comprimento de arco [24]. Note que a marcação ‘’ representa a derivada do vetor.

$$s(t) = \int_0^t \|\vec{r}'(u)\| du \quad 2.9$$

As equações de Frenet-Serret são apresentadas no campo da geometria diferencial e elas definem as funções vetoriais ortogonais: o vetor tangente ( $\vec{T}$ ), o vetor normal ( $\vec{N}$ ) e o vetor binormal ( $\vec{B}$ ) (que são também identificados neste trabalho como vetores TNB); todos eles possuem módulo unitário. Os vetores TNB acompanham o movimento de uma partícula em uma curva ao longo de todo o seu comprimento. É possível reescrever o movimento de uma partícula parametrizado pelo comprimento de arco  $s$ ; assim, os vetores TNB são definidos, dada a Equação 2.10, pelas Equações 2.11 a 2.13 [25]. Note que ‘ $\| \cdot \|$ ’ representa a norma de um vetor.

$$\vec{R}(s) = X(s)\vec{i} + Y(s)\vec{j} \quad 2.10$$

$$\vec{T}(s) = \vec{R}'(s) = X'(s)\vec{i} + Y'(s)\vec{j} \quad 2.11$$

$$\vec{N}(s) = \frac{\vec{T}'(s)}{\|\vec{T}'(s)\|} \quad 2.12$$

$$\vec{B}(s) = \vec{T}(s) \times \vec{N}(s) \quad 2.13$$

É possível perceber que, para um espaço bidimensional, o vetor  $\vec{B}$  é nulo. Os vetores TNB são relacionados com a curvatura ( $\kappa$ ) e a torsão ( $\tau$ ) de uma curva, os quais são campos escalares em função de  $s$ , no espaço através da Equações 2.14 a 2.16 [25].

$$\vec{T}'(s) = \kappa(s)\vec{N}(s) \quad 2.14$$

$$\vec{N}'(s) = -\kappa(s)\vec{T}(s) + \tau(s)\vec{B}(s) \quad 2.15$$

$$\vec{B}'(s) = -\tau(s)\vec{N}(s) \quad 2.16$$

O vetor tangente ( $\vec{T}$ ) para uma curva retilínea é sempre constante, ou seja, a derivada do vetor tangente é sempre zero. Quando uma curva não segue uma linha reta, há uma tendência para a variação do vetor tangente, em outras palavras, a derivada do vetor tangente passa a ser diferente de zero. Assim, a curvatura ( $\kappa$ ) de uma curva é definida como a taxa de variação do vetor tangente em relação ao comprimento de arco, ou seja, a curvatura é parâmetro que mede o grau de desvio de uma curva em relação a uma linha reta para um dado ponto [24]. Por esta definição, podemos escrever a Equação 2.17 para determinar a curvatura de uma curva em um dado ponto.

$$\kappa(s) = \|\vec{T}'(s)\| \quad 2.17$$

Partindo da Equação 2.12 e 2.17, chega-se à Equação 2.18, pela qual pode ser visto que o vetor  $\vec{T}'$  possui módulo igual a  $\kappa$  e direção igual a  $\vec{N}$ , que é um vetor unitário;

em outras palavras,  $\vec{T}'$  representa o vetor curvatura  $\vec{\kappa}$ . Este ponto é importante para a reconstrução de uma curva partindo de seus dados de curvatura  $\kappa$ , pois com o vetor  $\vec{\kappa}$  é possível chegar ao vetor  $\vec{T}'$ , e assim, por sucessivas integrações, o vetor original  $\vec{R}$  pode ser reconstruído, representando o mapeamento da posição da curva no espaço.

$$\vec{T}'(s) = \kappa(s)\vec{N}(s) \quad 2.18$$

## 2.4 Interpolação de Curva (*Splines*)

### 2.4.1 Fundamentos

Quando existe um conjunto de pontos em coordenadas cartesianas, seja representado por  $(x_i, y_i)$  com  $i$  variando de 0 a  $n$ , o valor de  $y_i$  pode ser assumido como sendo a resposta de uma função desconhecida dependente de  $x_i$ . Em um grande número de problemas, é necessário obter valores que não pertencem ao conjunto discreto  $(x_i, y_i)$ , mas que mais se aproximam da função desconhecida que descreve tal conjunto de pontos. Há duas formas distintas para aproximar valores em pontos desconhecidos [26]:

- Ajuste de função;
- Função de interpolação.

A principal diferença entre esses dois conceitos é: no primeiro, uma representação do conjunto de pontos dados é procurada, não necessariamente pretende-se atender aos pontos já conhecidos; no segundo, necessariamente deseja-se atender aos conjuntos de pontos conhecidos, como também aproximar ao máximo valores em intervalos desconhecidos. O primeiro método é normalmente utilizado quando os dados são aproximados, com relativo grau de confiança, por exemplo, dados oriundos de estudos estatísticos. O segundo método é conveniente quando há um grande grau de confiança nos dados ou caso eles sejam considerados exatos, por exemplo, quando os pontos conhecidos são provenientes de medições físicas [26].

Há diversos tipos de métodos de interpolação, pode-se citar:

- Linear;
- Polinomial;
- Exponencial;
- *Splines*.

No presente trabalho será abordado o método de interpolação por *splines* cúbicas, em outras palavras, interpolação por partes de polinômios de 3º grau atendendo a um determinado número de condições.

Uma *spline* consiste em dividir um intervalo total de pontos em intervalos menores, nos quais é aplicada uma interpolação baseado em um polinômio. O número de pontos dos subintervalos é definido pelo grau do polinômio que se deseja utilizar. Por exemplo, caso seja um polinômio cúbico, deve-se usar quatros pontos para os subintervalos.

Na interpolação por *spline*, há uma superposição dos subintervalos, ou seja, o último ponto de um subintervalo pertence ao primeiro ponto do subintervalo seguinte. Esta é a principal diferença entre uma interpolação polinomial e uma por *spline*. DIEGUEZ [26] afirma que uma *spline* pode ser compreendida como uma curva mecânica, na qual a curva é submetida a esforços mecânicos de modo a passar por todos os pontos conhecidos mantendo a menor energia potencial possível do corpo. Em outra análise, é possível afirmar que a energia potencial é proporcional a sua segunda derivada, a qual também é proporcional a curvatura desta curva.

#### 2.4.2 Definição matemática

Seja um conjunto de  $n+1$  pontos representados por  $(x_i, y_i)$  com  $i$  variando de 0 a  $n$ , também seja  $x_i$  de modo que  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ . Além disso, seja  $f(x)$  uma função de interpolação cúbica por *spline*. As seguintes condições devem ser atendidas:

- $p(x_i)$ , pertencente a  $[x_i, x_{i+1}]$ , é um polinômio cúbico para  $i$  igual a 0 até  $n-1$ ;
- $f(x_i)$  passa por todos os pontos  $y_i$ ;
- Para o intervalo  $[x_0, x_n]$ ,  $f(x)$ , sua primeira derivada e sua segunda derivada são funções contínuas;
- Há duas opções para as condições de contorno:
  - Extremidade engastadas: as primeiras derivadas da função de interpolação para os pontos  $x_0$  e  $x_n$  são dadas;
  - Extremidades livres: as segundas derivadas da função de interpolação são iguais a zero.

Seja  $p_i(x)$  e  $h_i$ , com  $i$  entre 0 a  $n-1$ , e  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$  coeficiente reais, tais quais satisfazem as Equação 2.19 e 2.20.

$$p_i(x) = (x - x_i)^3 d_i + (x - x_i)^2 c_i + (x - x_i) b_i + y_i \quad 2.19$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad 2.20$$

Considerando o caso para a condição de contorno de extremidade livres, *spline* natural; a solução para a interpolação por *splines* cúbicas recai no sistema abaixo, no qual podemos encontrar os valores de  $c_i$ :

$$h_0 c_0 + 2(h_0 + h_1) c_1 + h_1 c_2 = 3(y_2 - y_1)/h_1 - 3(y_1 - y_0)/h_0 \quad (i = 1)$$

$$h_1 c_1 + 2(h_1 + h_2) c_2 + h_2 c_3 = 3(y_3 - y_2)/h_2 - 3(y_2 - y_1)/h_1 \quad (i = 2)$$

$$h_2 c_2 + 2(h_2 + h_3) c_3 + h_3 c_4 = 3(y_4 - y_3)/h_3 - 3(y_3 - y_2)/h_2 \quad (i = 3)$$

...

$$h_{n-2} c_{n-2} + 2(h_{n-2} + h_{n-1}) c_{n-1} + h_{n-1} c_n = 3(y_n - y_{n-1})/h_{n-1} - 3(y_{n-1} - y_{n-2})/h_{n-2} \\ (i = n - 1)$$

com  $c_0$  e  $c_n$  iguais a zero, pois as segundas derivadas em  $x_0$  e  $x_n$  são nulas. Além disso, é possível calcular os coeficientes  $b_i$  e  $d_i$  através das Equações 2.21 e 2.22, com  $i$  variando de 1 a  $n-1$ .

$$b_i = (y_{i+1} - y_i)/h_i - h_i(2c_i + c_{i+1})/3 \quad 2.21$$

$$d_i = (c_{i+1} - c_i)/(3h_i) \quad 2.22$$

## 2.5 Estudos relacionados ao tema proposto

Basicamente, os trabalhos pesquisados se dividem em dois grupos. O primeiro apresenta o desenvolvimento de sistema para monitorar formas de estruturas utilizando sensores de deformação; assim, há um número considerável de diferentes métodos para reconstruir o formato de um corpo através de sensores de deformação, como os sensores a rede de Bragg. No segundo grupo, há estudos que propõem metodologias específicas para o monitoramento do deslocamento de massa de solo utilizando sensores de deformação. Os principais estudos relacionados aos dois tópicos mencionados serão apresentados nesta Seção.

BALDWIN [27] apresenta um trabalho no qual é utilizado sensores a rede de Bragg para reconstruir a forma de uma placa metálica engastada sujeita a esforços dinâmicos; o objetivo é a análise dos modos vibracionais em que a placa metálica é sujeita, veja Figura 2.10. Neste trabalho, utiliza-se o triedro de Frenet como base para desenvolver um algoritmo de reconstrução de curva bidimensional, utilizando também

aproximações das séries de Taylor. Além disso, há uma comparação de métodos de interpolação aplicáveis ao algoritmo de reconstrução: interpolação linear, interpolação cúbica hermitiana e interpolação por *splines*. Em [27], o método de interpolação por *splines* apresentou os melhores resultados dentre os demais, o que motivou o presente estudo a escolher o método por *splines* no seu desenvolvimento.

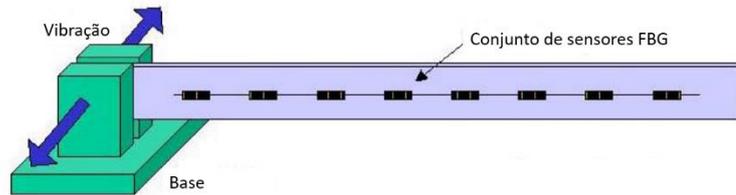


Figura 2.10 – Placa metálica instrumentada com sensores FBG sujeita a vibrações mecânicas, adaptado de [27].

Em [28], é apresentado um método para reconstruir a forma de uma fibra óptica em três dimensões espaciais. Neste estudo, utiliza-se sensores a rede de Bragg distribuídos ao longo de uma fibra óptica, a qual possui três núcleos distintos. Através da interrogação óptica dos sensores por OFDR e utilizando as equações de Frenet-Serret como base para o algoritmo de reconstrução; é obtido a reconstrução tridimensional de uma fibra óptica inserida em uma ranhura na superfície de um cilindro, como mostra a Figura 2.11.



Figura 2.11 – Fibra óptica posicionada na ranhura de um cilindro para que seja realizada a reconstrução do formato da fibra em três dimensões espaciais [28].

Um estudo considerando a reconstrução de curva bidimensional através de dados de posição, ou posição e curvatura, ou somente curvatura é apresentado em [29]; os diversos casos são comparados. Neste estudo, é utilizado interpolação por *B-splines* – na qual polinômios de diversas ordens podem ser combinados na interpolação – e são

utilizados sensores de deformação convencionais, ou seja, elétricos. É utilizado também a teoria de viga engastada de Euler-Bernoulli para a reconstrução de curva usando apenas dados de curvatura. Em [29], também é analisado o impacto de diferentes posicionamentos e número de sensores de deformação no desempenho da reconstrução de curvas.

Nos estudos [30]-[32], são realizadas reconstrução de curvas em três dimensões através de sensores a rede de Bragg; os sensores a rede de Bragg são utilizados para calcular a deformação, para que em seguida seja convertido em dados de curvatura, definindo também sua direção no espaço. Nesses estudos são considerados uma interpolação linear para obter pontos de curvatura para regiões onde não são realizadas medições; também, utiliza-se métodos geométricos para reconstruir a curva com base nos dados de curvatura obtidos pelos sensores, através de um plano de coordenadas que é transladado e rotacionado a cada passo da reconstrução de curva – o plano osculador [30]. Na Figura 2.12, pode ser visto uma das técnicas empregadas: um cabo contendo quatro arranjos de sensores a rede de Bragg para a reconstrução de sua disposição no espaço tridimensional.

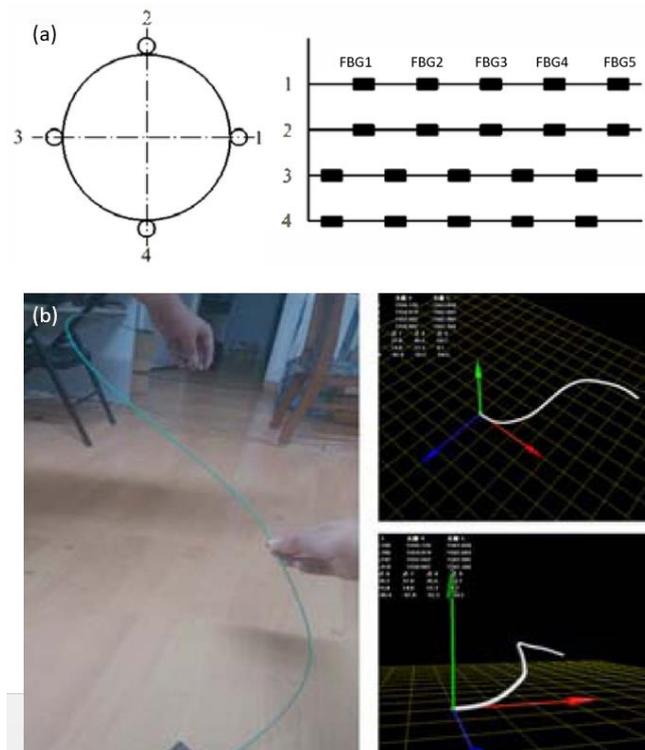


Figura 2.12 – (a) Fibras ópticas dispostas em um arranjo específico. (b) Ensaio experimental e resposta da reconstrução de curva em três dimensões, adaptador [30].

Uma revisão do estado da arte de aplicações de sensores a rede Bragg para prover soluções de monitoramento aplicadas a fenômenos geológicos pode ser encontrada em [33]. Mais especificamente, nesse estudo são apresentadas diversas metodologias para o monitoramento do deslocamento de terra através de sensores a rede de Bragg, como por exemplo, soluções baseadas em inclinômetro que usam sensores a rede de Bragg e que ficam permanentes no interior de uma encosta, veja a Figura 2.13.

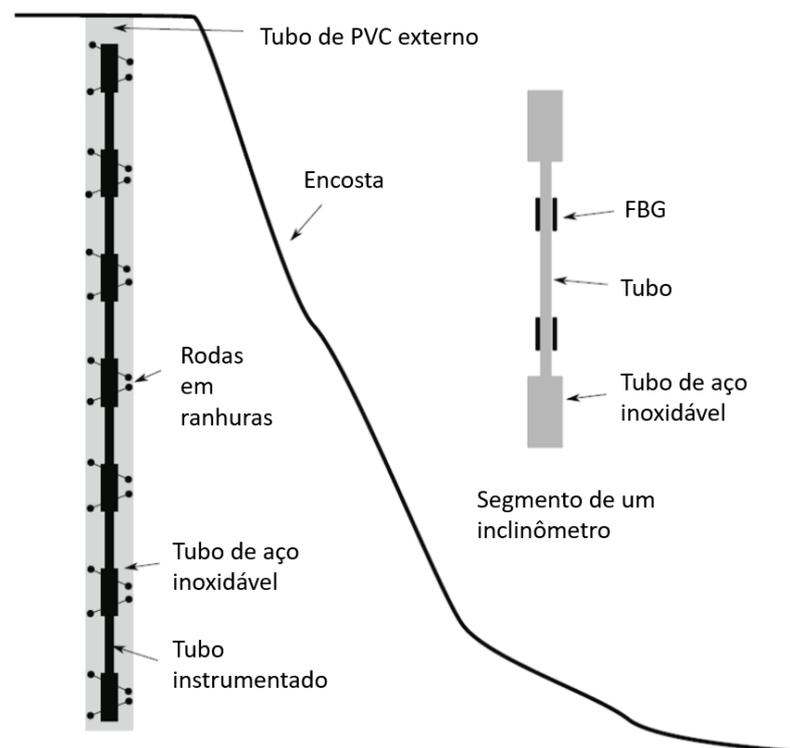


Figura 2.13 – Esquemático para o monitoramento de uma encosta utilizando um tipo inclinômetro com sensores a rede de Bragg, adaptado de [33].

WANG *et al.* [34] apresentam um inclinômetro baseado em sensores a rede de Bragg para o monitoramento de deslocamento de solo. Nesse trabalho, é utilizada a teoria de vigas para correlacionar o deslocamento horizontal de um tubo à deformação superficial do tubo. Além disso, o trabalho de WANG *et al.* [34] apresenta resultados da metodologia proposta aplicada à uma encosta em Wenzhou, China; veja Figura 2.14.

Similarmente, em [35], também é apresentada uma metodologia para a monitoração de deslizamentos de terra através de sensores a rede de Bragg, também utilizando a teoria de viga engastada de Euler-Bernoulli como base de um algoritmo de reconstrução de curva. GUO *et al.* [35] verificam a metodologia proposta em ensaios de laboratório, como também em campanhas de monitoramento em campo. No

monitoramento em campo, um sistema em tempo real (Figura 2.15) é implementado para o monitoramento contínuo de uma encosta localizada em Zhejiang, China.

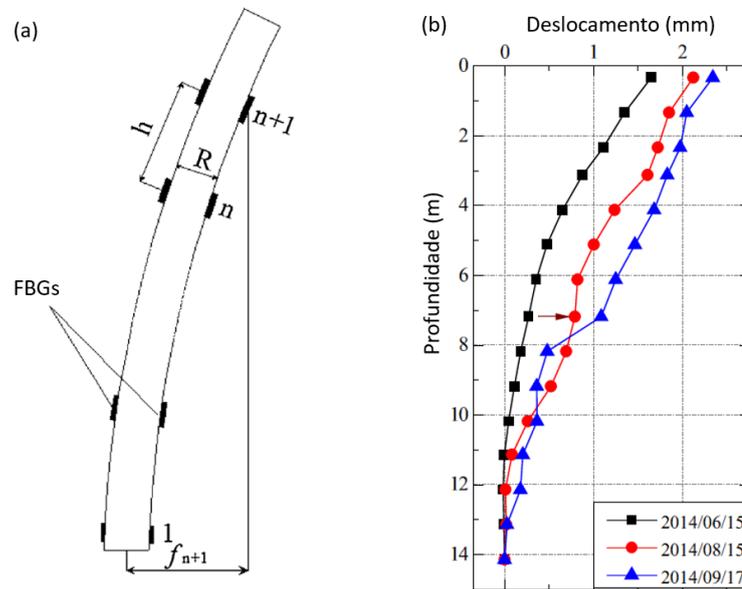


Figura 2.14 – (a) Deslocamento horizontal ( $f_{n+1}$ ) em um trecho de um tubo onde sensores a rede de Bragg estão fixados. (b) Resultados obtidos de leituras em campo pelo inclinômetro a rede de Bragg, adaptado de [34].

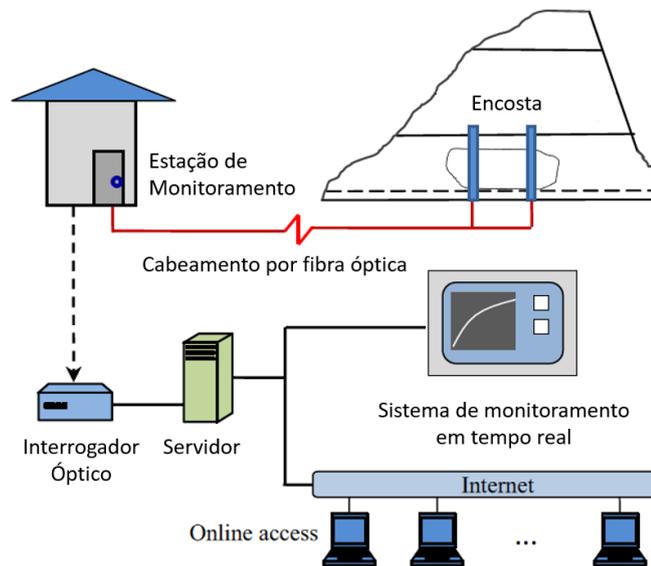


Figura 2.15 – Sistema de monitoramento em tempo real para uma encosta, adaptado de [35].

### 3 DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA A RECONSTRUÇÃO DE CURVAS BIDIMENSIONAIS

Neste capítulo, os detalhes do desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto no presente trabalho são apresentados. Uma forma de medição de curvatura é discutida, seguida da explanação do desenvolvimento de um algoritmo de reconstrução de curva bidimensionais. Dados fictícios foram criados com o intuito de avaliar o desempenho da reconstrução de curvas pelo algoritmo proposto, os resultados e análises também se encontram neste capítulo.

#### 3.1 Medição de curvatura

Como apresentado na Seção 2.3, para uma curva no espaço é possível definir os valores de curvatura ( $\kappa$ ) para cada ponto pertencente à curva. Assim, para a reconstrução de curva, os dados de  $\kappa$  são imprescindíveis. Para obter os dados de curvatura, podemos definir um corpo de espessura  $2y$  e comprimento  $x$ . Ao flexionar tal estrutura, distensões e compressões ao longo do corpo passam a existir. Assim, pode ser obtida uma correlação da deformação superficial dessa estrutura com a curvatura aplicada.

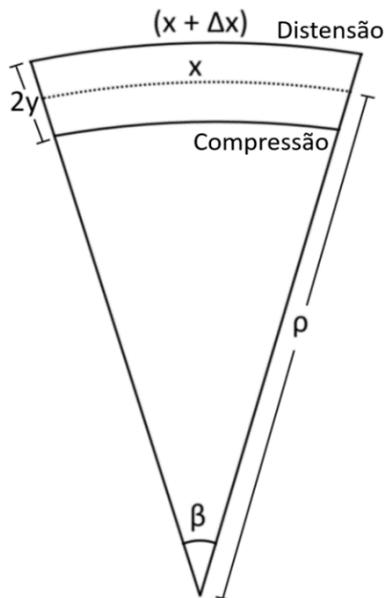


Figura 3.1 – Curvatura de raio  $\rho$  de um corpo de comprimento  $x$  e espessura  $2y$ . A deformação relativa na superfície do corpo que está a uma distância  $y$  da linha neutra (linha pontilhada) e é dada por  $\Delta x/x$ .

Ao fletir um corpo homogêneo, dado pela Figura 3.1, criam-se duas regiões: uma região trativa, que sofre distensão, e uma região compressiva. Além disso, cria-se também uma superfície que não sofre deformação, chamada de linha neutra. Seja a distância da linha neutra para a superfície do corpo é dada por  $y$ , a curvatura associada à flexão do corpo é dada pela Equação 3.1 [29].

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{\Delta x/x}{y} = \frac{\varepsilon}{y} \quad 3.1$$

Utilizando uma abordagem diferente, a curvatura pode ser correlacionada com a diferença da deformação na região trativa ( $\varepsilon_t$ ) e da região compressiva ( $\varepsilon_c$ ) através da Equação 3.2.

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{2\varepsilon}{2y} = \frac{\Delta x/x - (-\Delta x)/x}{2y} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{2y} \quad 3.2$$

Pode ser observada a relação entre a Equação 3.2 e a Equação 2.7, ou seja, para uma medição diferencial de deformação utilizando sensores a rede de Bragg, conforme foi apresentado na Seção 2.2.5, pode ser extraído o valor da curvatura na região onde os sensores são fixados. Além disso, utilizando essa abordagem, é possível obter uma medição livre da influência da temperatura. Portanto, pode-se obter o valor da curvatura através da medição de dois sensores a rede de Bragg opostos e fixados em uma estrutura homogênea, resultando em uma medição livre da influência de temperatura. A Equação 3.3 mostra a relação entre a curvatura e a medição da variação dos comprimentos de onda de dois sensores a rede de Bragg opostos entre si, como exposto na Figura 2.9.

$$\kappa = \frac{1}{2yk_s} \left( \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) \quad 3.3$$

### 3.2 Reconstrução de curva a partir de dados de curvatura

Através da metodologia apresentada na Seção 3.1 é possível medir o valor da curvatura em um determinado ponto de uma estrutura; estendendo esse raciocínio, pode ser calculado o valor da curvatura ao longo de uma estrutura aplicando a medição proposta em diversos pontos. Desta maneira, é possível construir um perfil discreto da curvatura ao longo de um corpo. Com o perfil discreto de curvatura, pode-se interpolar os valores da curvatura medidos para pontos sem medição de curvatura e, assim, obter um perfil de curvatura mais próximo a um perfil contínuo.

Como mencionado na Seção 2.5, BALDWIN [27] apresenta um estudo comparando alguns métodos de interpolação para dados de curvatura. Foram comparados

os métodos de interpolação linear, interpolação cúbica hermitiana e interpolação por *splines* cúbicas. Dentre os métodos analisados, o método de interpolação por *splines* cúbicas apresentou os melhores resultados e, por esta razão, este método foi o escolhido para realizar a interpolação do perfil de curvatura durante a reconstrução da curva desejada.

Como obter as posições de uma curva bidimensional a partir de seu perfil de curvatura? Para responder a esta pergunta é preciso levar em consideração as equações de Frenet-Serret apresentadas na Seção 2.3. Como visto, uma curva parametrizada em relação ao seu comprimento de arco,  $\vec{R}(s)$ , está relacionada ao seu vetor tangente  $\vec{T}(s)$  através da Equação 2.11. Logo, o vetor  $\vec{R}(s)$  pode ser obtido através da Equação 3.4 [28], na qual  $\vec{R}(0)$  é o ponto escolhido no espaço cartesiano para iniciar a reconstrução.

$$\vec{R}(s) = \int \vec{T}(s) ds + \vec{R}(0) \quad 3.4$$

Para obtermos o vetor unitário  $\vec{T}(s)$  é preciso relacionar tal vetor aos valores de curvatura e considerar algumas condições de contorno. Assim, seja um arco de curvatura  $s$  definido entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$ , com centro no ponto  $O$  e raio  $\rho$ , como mostra a Figura 3.2; por definição, a relação dada pela Equação 3.5 é válida.

$$\beta = \frac{s}{\rho} = \kappa \cdot s \quad 3.5$$

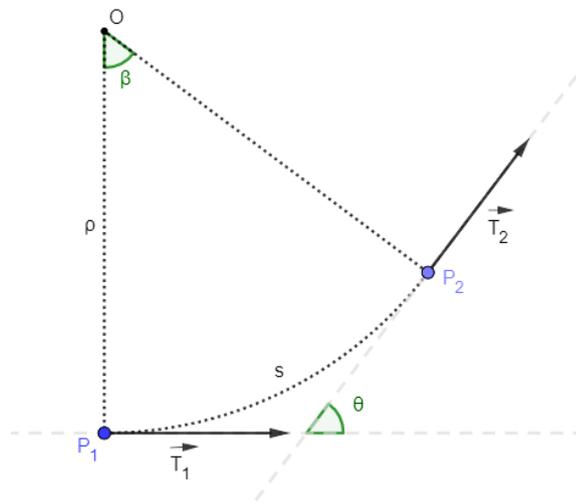


Figura 3.2 – Arco de círculo com centro em  $O$ , raio  $\rho$  e comprimento  $s$  limitados pelos pontos  $P_1$  e  $P_2$ .  $\vec{T}_1$  e  $\vec{T}_2$  são os vetores tangentes aos pontos  $P_1$  e  $P_2$ , respectivamente, e  $\theta$  é o ângulo entre os dois vetores tangentes.

Sejam os vetores tangentes e consecutivos ( $\vec{T}_1(s)$  e  $\vec{T}_2(s)$ ) associados respectivamente aos pontos  $P_1$  e  $P_2$  de uma curva bidimensional, o ângulo entre  $\vec{T}_1(s)$  e

$\vec{T}_2(s)$  é dado por  $\theta$ . Pode-se extrair que  $\beta$  é igual a  $\theta$ , logo derivando a Equação 3.5, pode ser obtido:

$$\begin{aligned} d\theta &= \kappa ds \\ \int d\theta &= \int \kappa ds \\ \theta(s) &= \int \kappa ds + \theta(0) \end{aligned} \quad 3.6$$

Pela Equação 3.6, podemos então definir o vetor  $\vec{T}(s)$ , uma vez que este vetor é unitário através da Equação 3.7. Portanto, existem todas as informações necessárias para reconstruir uma curva bidimensional.

$$\vec{T}(s) = \cos(\theta(s))\vec{i} + \sin(\theta(s))\vec{j} \quad 3.7$$

Vale salientar que é preciso assumir para o presente estudo a condição inicial para  $\theta$  sendo dado pela Equação 3.8, pois iniciando a curva como uma curva retilínea é possível minimizar o erro na reconstrução final. Este assunto é discutido no Capítulo 4.

$$\theta(0) = 0 \quad 3.8$$

Com o intuito de resumir o desenvolvimento apresentado, a Figura 3.3 mostra um fluxograma contendo todas as etapas para a reconstrução da posição de um corpo em coordenadas cartesianas através da medição da deformação superficial ao longo de seu comprimento, conforme descrito na presente Seção.

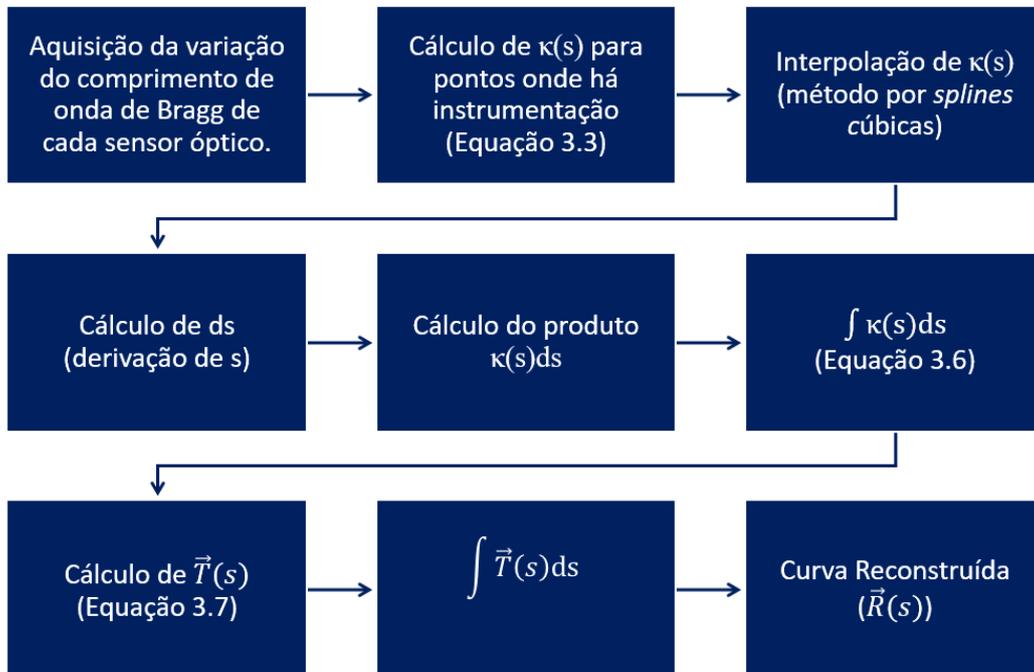


Figura 3.3 – Fluxograma de reconstrução de curva bidimensional proposta no presente trabalho.

### 3.3 Simulações e análises

Com o intuito de realizar uma avaliação preliminar no desempenho do método proposto na Seção 3.2, foram gerados dados arbitrários de curvas conhecidas para simular medições de curvaturas ao longo das curvas geradas. Com os dados de curvaturas, buscou-se reproduzir a reconstrução de dados com o algoritmo proposto. Por conseguinte, foi realizada uma análise entre a curva reconstruída e a curva original. Todas as simulações e programações do presente trabalho foram realizadas através do software MATLAB®, versão 2015 [36].

Foram escolhidos quatro tipos de curvas diferentes, dadas pelas Equações 3.9 a Equação 3.12, definidas no plano cartesiano: uma curva quadrática, uma curva circular, uma curva cúbica e uma curva senoidal. Para esta simulação, limitou-se em 30 metros para o comprimento das curvas no eixo das abscissas. Além disso, foi definida uma resolução de 1 centímetro para os dados gerados. Por último, foi definida a separação de 0,5 metros entre os pontos de curvaturas, simulando pontos obtidos por medições físicas. A unidade de distância (metro) foi escolhida apenas para dar sentido físico às simulações.

$$y_1(t) = 0,05t^2 \quad 3.9$$

$$y_2(t) = 30 - \sqrt{30^2 - t^2} \quad 3.10$$

$$y_3(t) = \frac{t^3}{80} \quad 3.11$$

$$y_4(t) = 0,5 - 0,5\cos(0,2t) \quad 3.12$$

A Figura 3.4 mostra as curvas geradas. Em seguida, através das Equações 2.9, 2.11 e 2.17, foi calculada a variação absoluta da curvatura para cada uma das curvas apresentadas. Desta maneira, foram escolhidos pontos a cada 0,5 m que representam locais nos quais são simuladas medições de curvaturas, como mostra a Figura 3.5. Com exceção da curva cúbica, os valores iniciais (próximo de  $t = 0$  m) de curvatura ascendem rapidamente. Isto se deve ao fato de que os valores de curvatura são assumidos inicialmente como nulos, pois não há número de pontos suficiente para o correto cálculo da curvatura, ou seja, é um ponto de singularidade. Pode ser visto também, para a curva circular e a curva senoidal, que ao final (próximos de  $t = 30$  m) do cálculo da curvatura o mesmo ocorre. Os valores variam rapidamente devido ao fato de um ponto de singularidade estar aproximando e, assim, interferindo no correto cálculo da curvatura com a diminuição de pontos existentes.

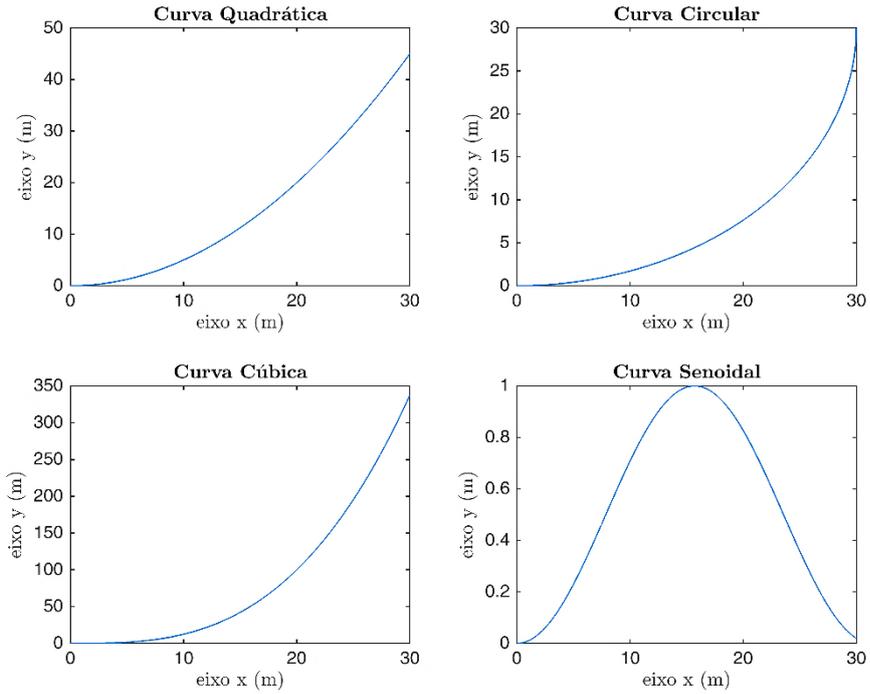


Figura 3.4 – Curvas geradas para simular o algoritmo de reconstrução proposto.

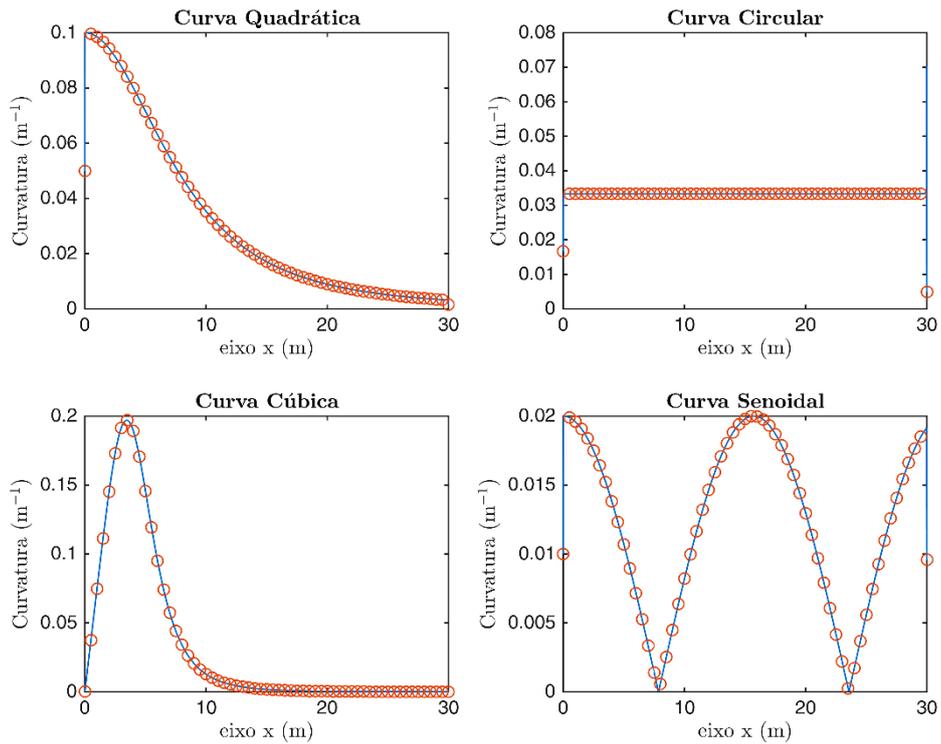


Figura 3.5 – Perfil de curvatura para cada curva gerada. Os pontos marcados foram escolhidos a cada 0,5 m para representar medições de curvatura.

Em seguida, foi aplicada a interpolação por *splines* cúbicas aos pontos escolhidos. Na Figura 3.6 é apresentada, para cada curva estudada, a comparação entre o perfil de curvatura originalmente calculado e o perfil de curvatura gerado através da interpolação.

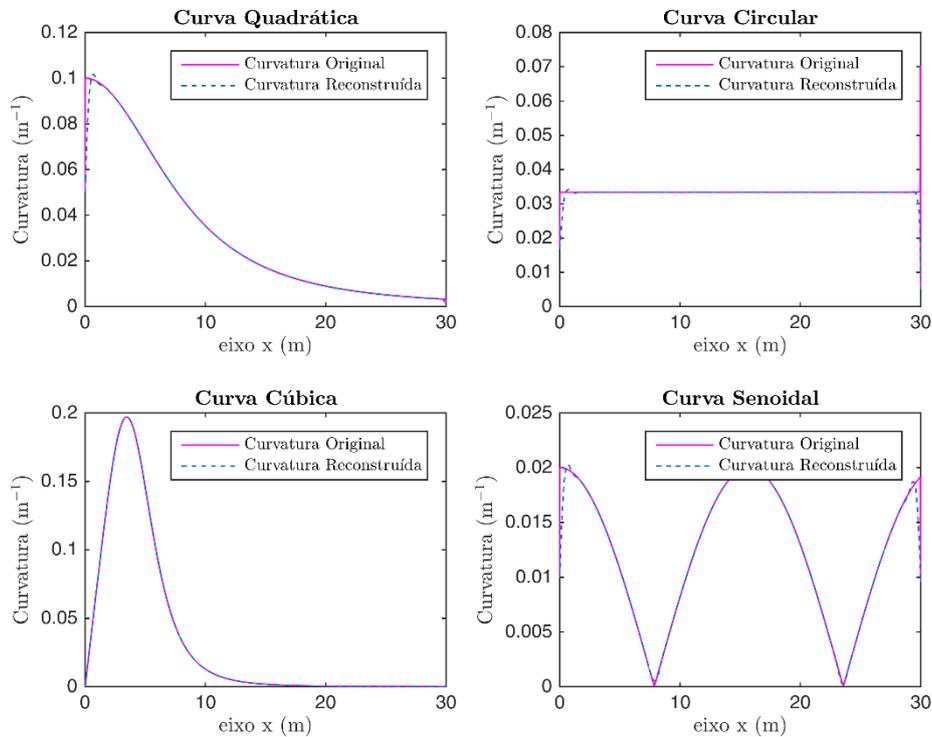


Figura 3.6 – Comparação do perfil de curvatura originalmente calculado e os reconstruídos pela interpolação de pontos para cada tipo de curva.

O próximo passo foi a aplicação do algoritmo descrito na Figura 3.3, partindo da etapa “Cálculo de  $ds$ ”. Desta maneira, cada curva foi reconstruída; vale ressaltar que as curvas escolhidas satisfazem a condição inicial apresentada na Equação 3.8. Em outras palavras, para todas as curvas o vetor tangente inicial (em  $x = 0$  m) é igual ao versor  $\vec{i}$ . Uma comparação da resposta da reconstrução de cada curva com a curva original é apresentada na Figura 3.7, na qual pode ser visto que as curvas reconstruídas apresentaram respostas próximas às curvas originais. O erro médio quadrático foi calculado para cada curvatura, os resultados estão presentes na Tabela 3.1.

Quando os valores no eixo  $x$  aumentam, o erro aumenta para cada curva. Isto deve-se ao fato de que o método de reconstrução de curva é um método recursivo no qual cada ponto reconstruído depende da reconstrução do ponto anterior. Desta forma, o erro em um dado ponto é acumulado para a reconstrução dos pontos seguintes a ele.

Pela Tabela 3.1, é possível verificar que o erro é máximo para a curva quadrática e mínimo para a curva cúbica, entretanto, visualmente, poderíamos afirmar que o erro

maior seria o da curva senoidal. Isso ocorre porque os valores absolutos no eixo y para as curvas quadrática e circular são elevados em comparação à curva senoidal, assim essas curvas apresentaram um erro médio quadrático mais elevado. Contrariamente, a curva cúbica apresentou valores no eixo y muito superiores aos das demais curvas, todavia obteve uma reconstrução do perfil de curvatura mais exata. Isso ocorreu para a curva cúbica apenas pelo fato de que os valores de curvatura partiram do início da curva (em  $t = 0$  m) e ascenderam mais brandamente, como mostra a Figura 3.8, como também tenderam a zero ao final da curva ( $t = 30$  m) suavemente. Assim, este fato contribuiu significativamente para uma reconstrução de curva mais fidedigna, uma vez que a reconstrução do perfil de curvatura foi mais eficaz.

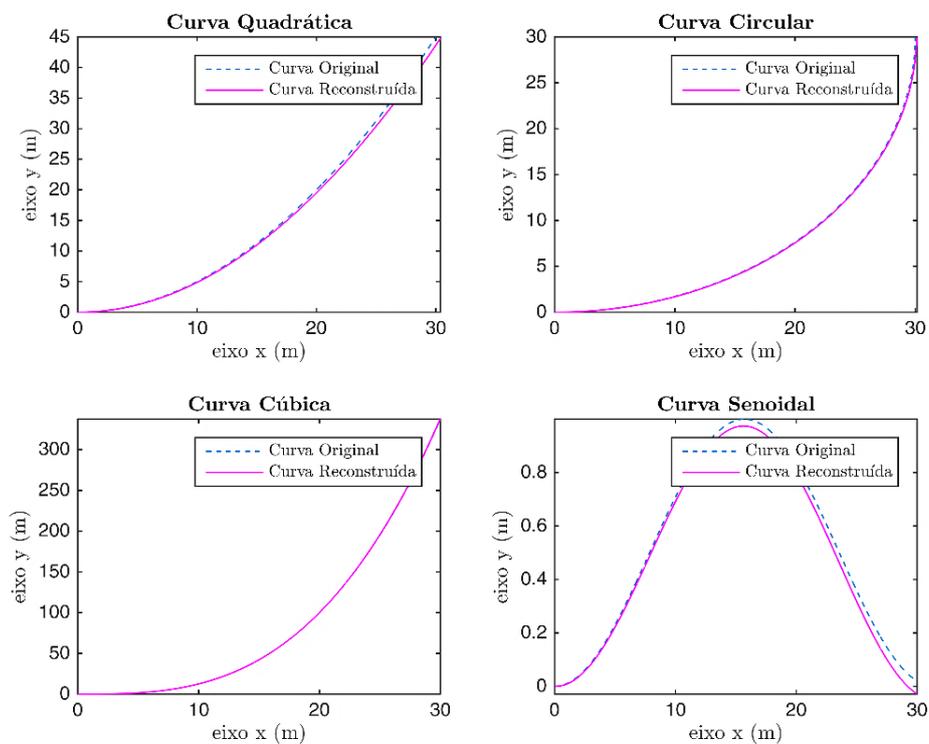


Figura 3.7 – Comparação entre as curvas originais e as curvas reconstruídas através do método proposto no presente trabalho.

Tabela 3.1 – Erro médio quadrático para todas as curvas simuladas.

<b>Tipo de Curva</b>	<b>Erro Médio Quadrático (m<sup>2</sup>)</b>
Curva Quadrática	$2,17 \times 10^{-2}$
Curva Circular	$2,40 \times 10^{-3}$
Curva Cúbica	$1,00 \times 10^{-6}$
Curva Senoidal	$8,00 \times 10^{-4}$

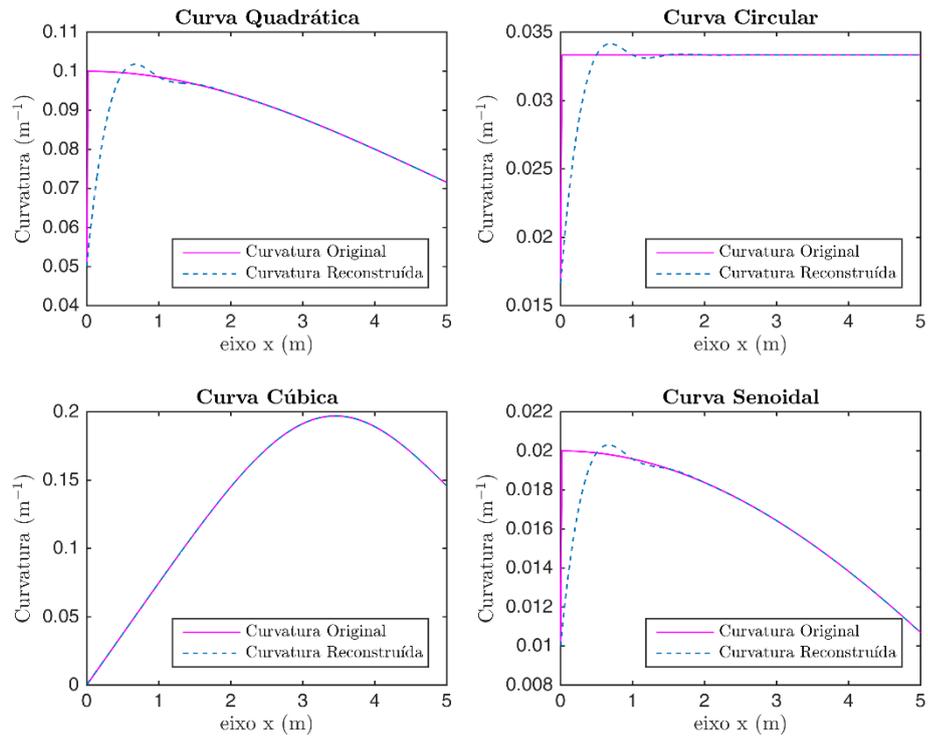


Figura 3.8 – Comparação do perfil de curvatura originalmente calculado e os reconstruídos pela interpolação de pontos para cada tipo de curva para t variando entre 0 m e 5 m.

## 4 ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DE MASSA DE SOLO

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso de medição do deslocamento de massa de solo por inclinômetros. São exibidos diversos cenários de medições em campo do deslocamento de solo ao longo de aproximadamente 1 ano. Dados brutos dessas medições são tratados e discutidos.

Em seguida, o algoritmo de reconstrução de curva proposto no capítulo 3 é aplicado às curvas geradas pela instrumentação por inclinômetro, bem como são discutidas algumas abordagens para melhorar o desempenho do algoritmo de reconstrução.

Por último, uma análise quantitativa da resposta do algoritmo de reconstrução sobre os casos com dados de campo é realizada ao final deste capítulo.

### 4.1 Medições geotécnicas por inclinômetro

Nesta Seção é apresentado um caso real de monitoramento por inclinômetro; o caso foi gerido e executado pela empresa Geoprojetos Engenharia Ltda (Geoprojetos) [37], baseada no Rio de Janeiro e que utiliza o sistema *Digitilt Classic System*, Figura 4.1, do fabricante DGSi (Durham Geo Slope Indicator) [38]. O sistema mencionado possui os seguintes componentes:

- Inclinômetro: Digitilt Probe;
- Cabo de controle: Heavy-Duty Control Cable;
- Unidade de aquisição: DataMate Readout;
- Software de dados: DigiPro 2.



Figura 4.1 – Sistema de monitoramento por inclinômetro Digitilt Classic System [39].

Algumas informações técnicas do torpedo utilizado estão resumidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Especificações do sistema Digitild Classic System [39]

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Peso	1,8 Kg
Temperatura de operação	- 20 °C a 80 °C
Raio mínimo para leitura	4,5 m
Comprimento do cabo de controle	30 m
Faixa de leitura	0 ° a 53 °
Comprimento do torpedo	500 mm
Exatidão	6 mm (até 25 m de profundidade)

Alguns dados e informações foram gentilmente disponibilizados para complementar o presente trabalho pela Geoprojetos [37]. Os dados apresentados são de campanhas de medição com os torpedos realizadas entre 07/10/2015 até 19/08/2016, a profundidade máxima de leitura foi de 15,5 metros. Nesse período foram realizadas um total de 45 campanhas de medição, contudo foram compartilhados dados de 9 destas campanhas e distribuídos da seguinte forma:

- Total de 3 medições para referência do torpedo, realizadas em 06/10/2015;
- Total de 3 medições durante a fase inicial das campanhas de medição, realizadas em 07/10/2015, 09/10/2015 e 13/10/2015;
- Total de 3 medições durante a fase final das campanhas de medição, realizadas em 23/06/2016, 15/07/2016 e 19/08/2016.

Conforme mencionado na Seção 2.1, os tubos guias de um sistema de monitoramento por inclinômetro – explicitado na Figura 2.1 – possuem geralmente dois eixos de medição, Eixo A e Eixo B. Durante a instalação do tubo guia, o Eixo A é alinhado com a direção que se espera obter o maior deslocamento de solo; o Eixo B permanece ortogonal ao Eixo A, como mostra a Figura 4.2.

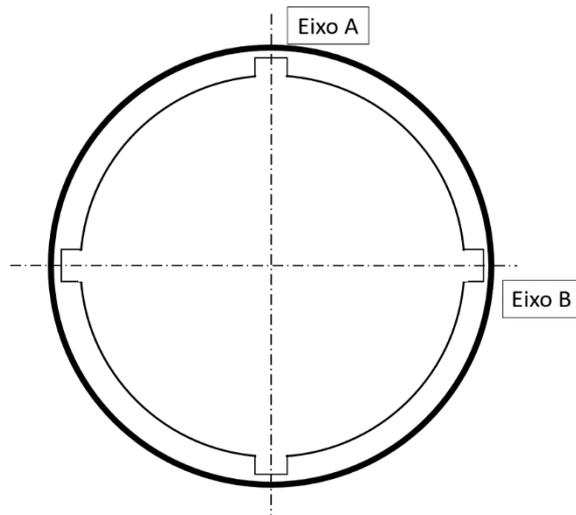


Figura 4.2 – Perfil transversal de um tubo guia para torpedos. As ranhuras ortogonais entre si definem os dois eixos para medição: Eixo A (principal), Eixo B.

Os dados brutos das leituras dos inclinômetros foram tratados utilizando o princípio descrito na Seção 2.1.1. Desta forma, os resultados das campanhas de medição por inclinômetros foram gerados através do software MATLAB®, versão 2015. Nas Figura 4.3 e Figura 4.4 são apresentados todos os resultados obtidos.

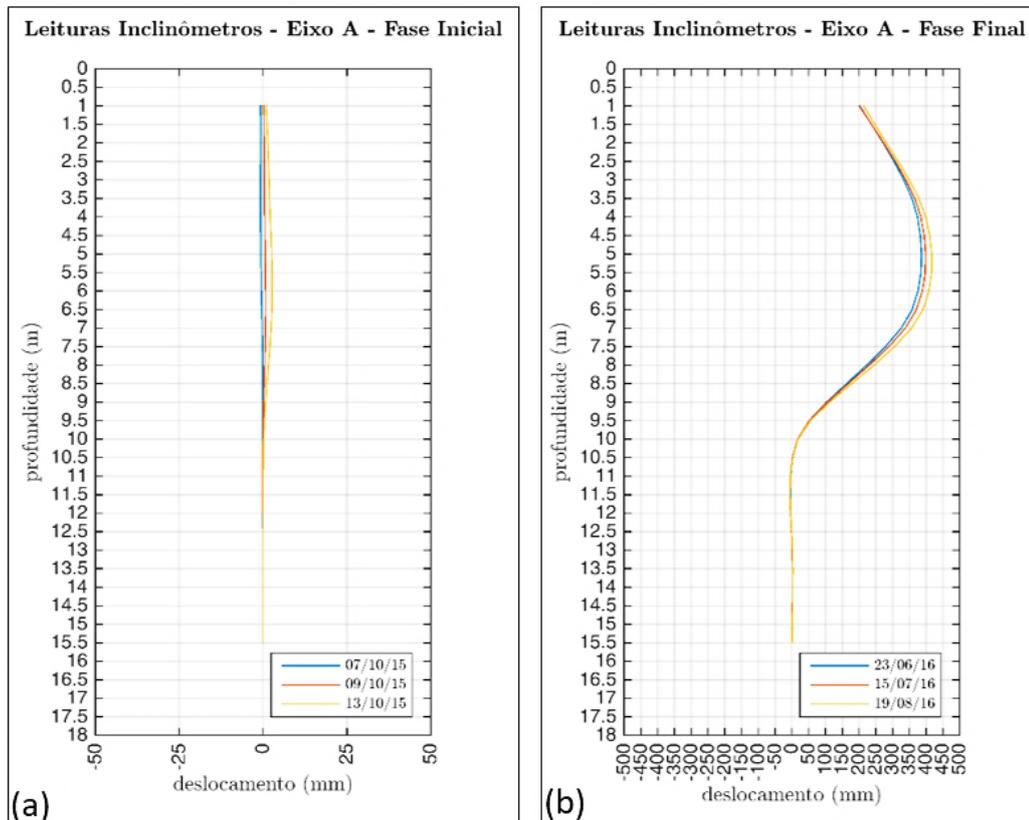


Figura 4.3 – Medições por inclinômetros para o Eixo A durante a fase inicial (a) e final (b) das campanhas de monitoramento em campo.

Pela Figura 4.3 pode-se observar que, durante a fase inicial das campanhas de medições, há pouco desvio no perfil reconstruído pelos inclinômetros. Além disso, pode ser verificado que, na profundidade de 15,5 m até 11 m, há um deslocamento horizontal muito reduzido, tanto para a fase inicial quanto para a fase final. Nessa região, basicamente não há grandes alterações na posição e, assim, podemos supor que a curvatura é mínima. Essa observação é muito importante, pois como visto na Seção 3.3, o algoritmo de reconstrução apresentado obtém uma melhor resposta e menor erro quando, no início da reconstrução, a curvatura inicia próxima de  $0 \text{ m}^{-1}$  e aumenta gradativamente.

Pelos dados obtidos, o valor máximo de deslocamento horizontal foi de 416 mm, no dia 19/08/2016, a uma profundidade de 5,5 m. É possível verificar também que, como esperado para a fase final, a deformação horizontal do solo aumenta com o decorrer do tempo, no caso, entre os dias 23/06/2016 e 19/08/2016.

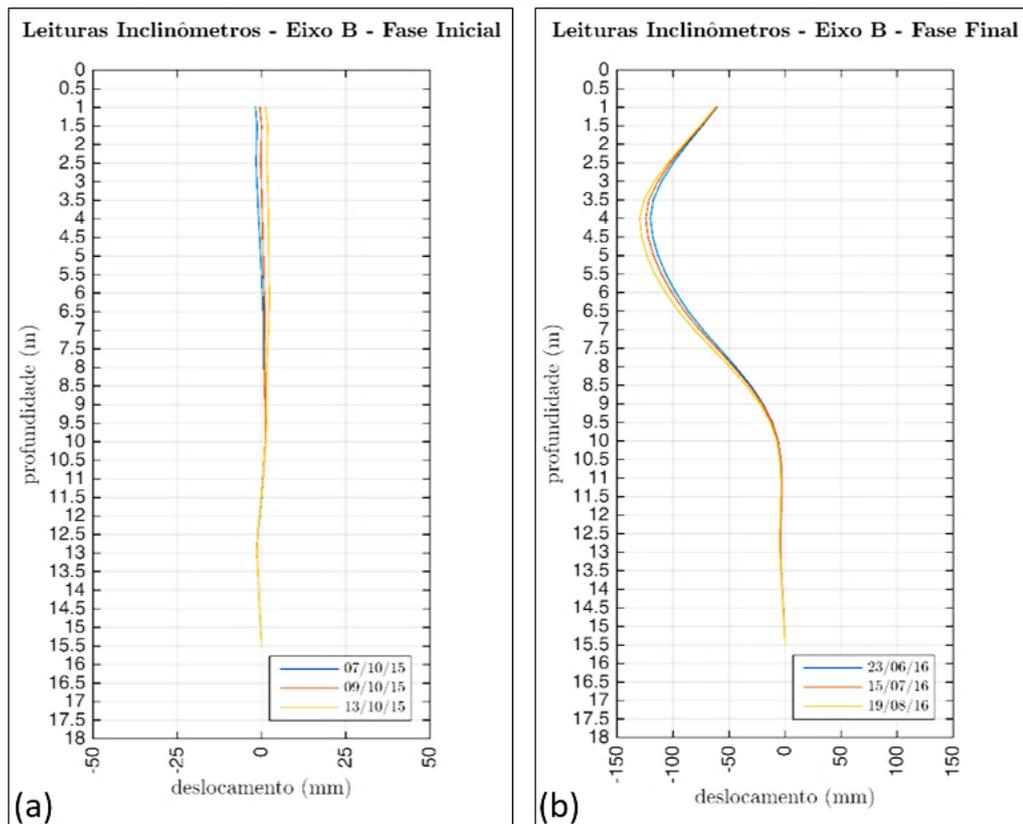


Figura 4.4 – Medições por inclinômetros para o Eixo B durante a fase inicial (a) e final (b) das campanhas de monitoramento em campo.

Para o Eixo B foi realizado o mesmo procedimento feito para o Eixo A, entretanto uma correção na leitura dos inclinômetros teve que ser efetuada no pós-processamento de dados, uma vez que os valores de inclinação apresentaram um valor constante ao longo

da profundidade, acarretando em uma inclinação exagerada dos perfis de deslocamento, mesmo durante a fase inicial das medições. Os dados da medição do perfil de deslocamento durante fase inicial, Eixo B, sem correção no pós-processamento de dados podem ser visualizados na Figura 4.5. Para corrigir esta situação foi adicionado um valor constante oposto ao apresentado na leitura, ao longo da profundidade, de modo que o perfil durante a fase inicial permanecesse o mais alinhado possível ao eixo vertical.

Leituras Inclinômetros - Eixo B - Fase Inicial - Sem Correção

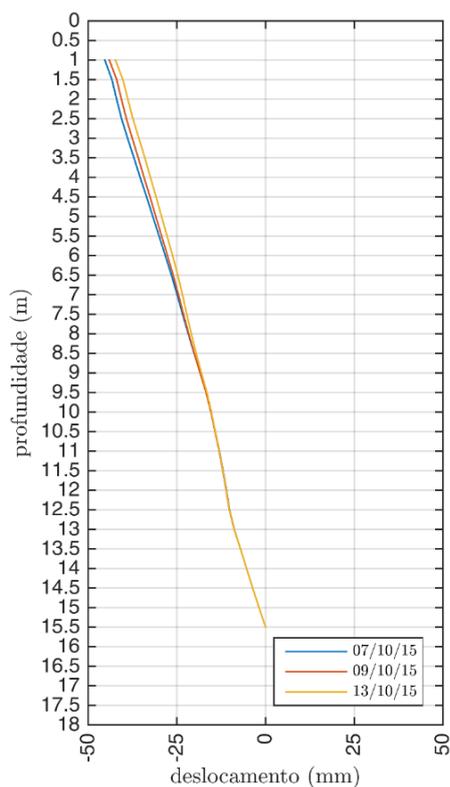


Figura 4.5 – Medições por inclinômetros para o Eixo B durante a fase inicial sem correção no pós-processamento de dados.

## 4.2 Reconstrução de curva através do algoritmo proposto

Com os dados de medição por inclinômetro em campo é possível aplicar um método análogo ao que foi realizado na Seção 3.3 a fim de simular o algoritmo de reconstrução de curva proposto no presente trabalho. Para isto, foram calculados inicialmente os perfis de curvatura para todos os casos, fase inicial e fase final. Em seguida, foram escolhidos pontos espaçados a cada 0,5 m dos valores de curvatura obtidos; este espaçamento segue o mesmo espaçamento utilizado pelos torpedos. Ou seja, pontos de medição de curvatura são simulados a cada 0,5 m entre 15,5 m e 1 m de profundidade.

Com os dados discretos a cada 0,5 m dos valores de curvatura para todos os perfis de deslocamento, aplicou-se o algoritmo proposto na Figura 3.3, iniciando o algoritmo a partir da etapa “Interpolação de  $\kappa(s)$  (método por *splines* cúbicas)”. A Figura 4.6 apresenta os perfis de curvaturas calculados para as curvas de deslocamento do Eixo A, na qual foram marcados os pontos a cada 0,5 m para simular pontos de medição de curvatura.

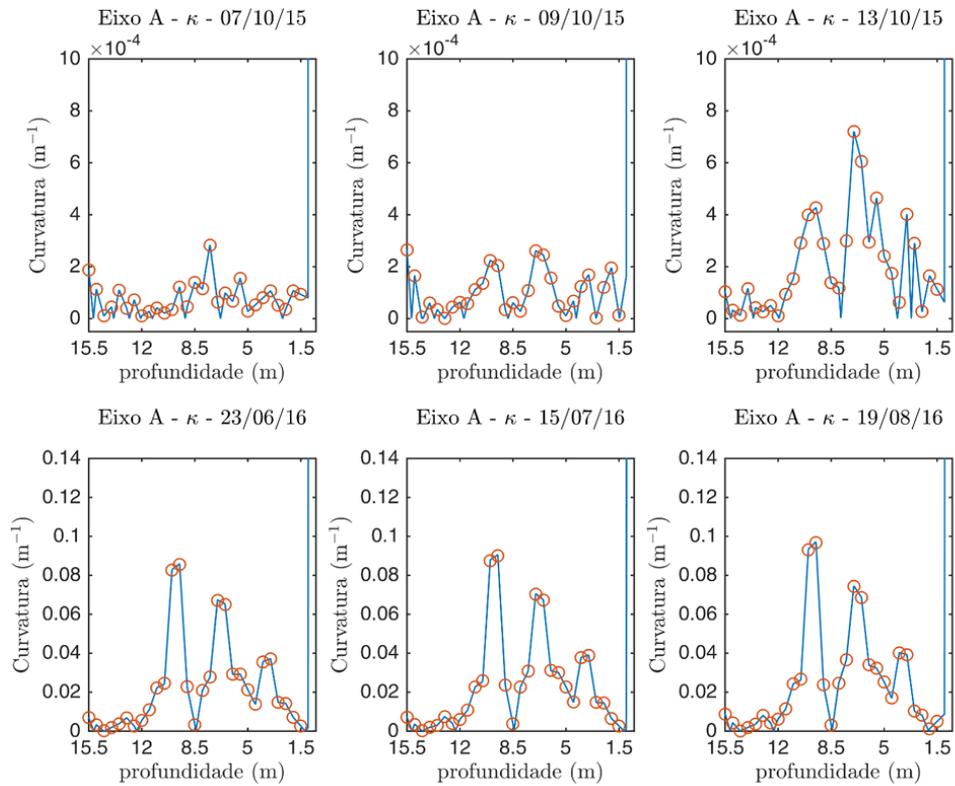


Figura 4.6 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo A. Pontos marcadas escolhidos a cada 0,5 m.

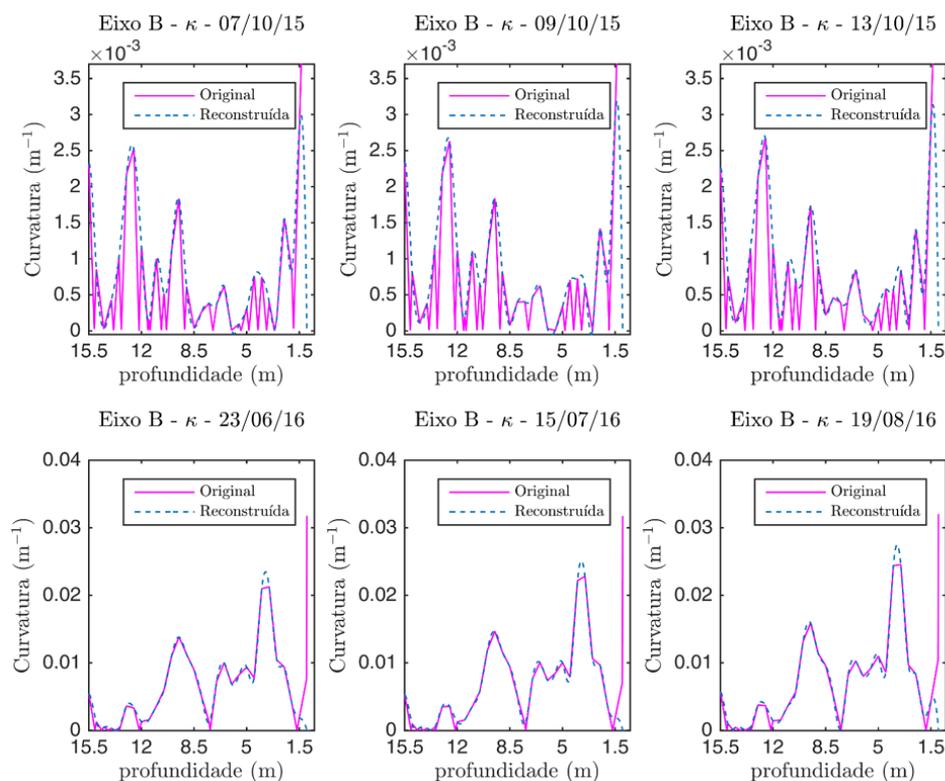


Figura 4.7 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo B: comparação entre perfil calculado (Original) e perfil interpolado de curvatura (Reconstruída).

Na Figura 4.7 podem ser visto os perfis de curvaturas para cada curva de deslocamento relativo ao Eixo B, na qual os perfis calculados de curvatura são comparados com os perfis oriundos da interpolação dos valores de curvatura a cada 0,5 m. Entre todos os casos, pode ser visto que o valor máximo de curvatura medido ocorre na profundidade de 9,5 m, no Eixo A, chegando a valores não superiores a  $0,1 \text{ m}^{-1}$ . Todos os perfis de curvatura calculados podem ser encontrados no ANEXO A.

Os valores de curvatura durante a fase inicial – entre 07/10/2015 a 13/10/2015 – são da ordem de  $10^{-4} \text{ m}^{-1}$  para o Eixo A e  $10^{-3} \text{ m}^{-1}$  para o Eixo B, bem inferiores em relação aos valores de curvatura durante a fase final – entre 23/06/2016 a 19/08/2016. Como esperado, ao final das curvas de deslocamento (profundidade de 1 m), os valores de curvatura aumentam rapidamente devido ao término de dados ao final da curva. Esse efeito ocorreu também na simulação realizada na Seção 3.3, no entanto, para o presente caso, o valor de curvatura na profundidade de 1 m foi substituído por  $0 \text{ m}^{-1}$ . Essa substituição acarreta em uma melhor interpolação de dados de curvatura, uma vez que os dados interpolados próximos à profundidade de 1m permanecem na mesma ordem de grandeza ao longo de toda a curva. Basicamente, é assumido que a curva ao final do perfil

de deslocamento tende à uma reta, assim, como detalhado adiante, tal proposição não prejudica a reconstrução de curva.

Visando melhorar o desempenho do algoritmo de reconstrução de curva, foram criados pontos abaixo da profundidade de 15,5 m e assumido valores de curvatura nulo; mais especificamente, para as profundidades 16 m, 16,5 m e 17 m, foram assumidos pontos fictícios de medição de curvatura de  $0 \text{ m}^{-1}$ . Após finalização da reconstrução de curva, os pontos abaixo da profundidade de 15,5 m são descartados.

Esta estratégia foi adotada com o intuito de gerar uma transição mais suave possível, no início da reconstrução, para os valores de curvatura. Desta forma, a condição inicial dada pela Equação 3.8 é estritamente obedecida; além disso, foi visto na Seção 3.3 que a simulação que alcançou os menores valores de erro foi aquela que apresentou uma melhor transição para os valores de curvatura no início da curva analisada, no caso, a curva cúbica, veja Figura 3.8.

O algoritmo proposto no presente trabalho foi aplicado, juntamente com as alterações mencionadas, às curvas de deslocamento para todos os casos apresentados nesta Seção. No ANEXO A estão presentes todos os gráficos gerados.

Na Figura 4.8 exibe a comparação da curva de deslocamento gerada pelo inclinômetro e a curva reconstruída através do algoritmo deste trabalho para o Eixo A durante a campanha de medição do dia 23/06/2016. Esse caso é o que obteve o maior deslocamento horizontal. A reconstrução foi realizada satisfatoriamente ao longo da profundidade; é possível afirmar que a reconstrução de curva apresentou uma boa resposta frente à proporção reduzida entre o máximo deslocamento horizontal e o comprimento total da curva. As análises quantitativas de todas as reconstruções são realizadas na Seção 4.3.

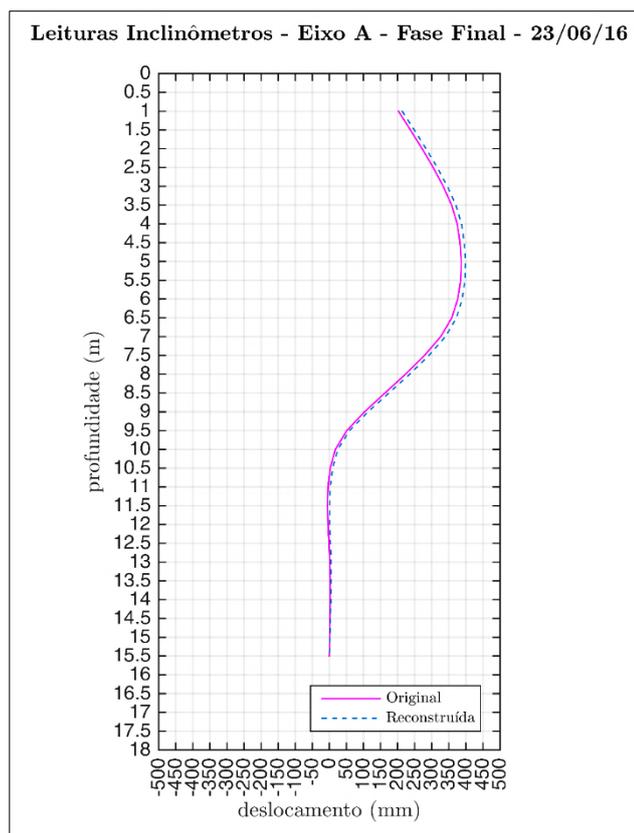


Figura 4.8 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetro (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 23/06/2016.

A Figura 4.9 exibe a comparação da curva de deslocamento gerada pelo inclinômetro e a curva reconstruída através do algoritmo proposto para o Eixo B durante a campanha de medição do dia 13/10/2015, na fase inicial. A curva reconstruída apresentou um deslocamento maior que o real; potencialmente pode ser suposto que a correção realizada nessas curvas (Figura 4.5) pode ter influenciado no desempenho da reconstrução; esse caso será discutido na Seção 4.3.

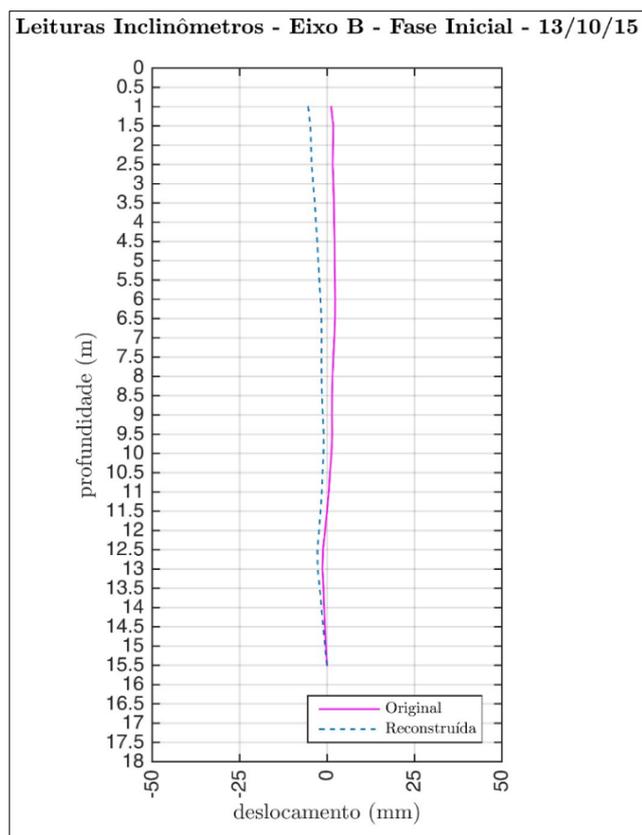


Figura 4.9 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 13/10/2015.

### 4.3 Análise de Resultados

Foram calculados o máximo erro absoluto, o máximo erro relativo ao deslocamento máximo e o erro médio quadrático para todos os casos das campanhas de medição por inclinômetros. A Figura 4.10 apresenta os erros absolutos para todos os cenários; pode ser visto que os maiores erros absolutos foram durante a fase final de leitura para o Eixo A, no qual o máximo erro encontrado foi de 16,9 mm no dia 19/08/2016. Para o Eixo B, o erro absoluto foi relativamente da mesma ordem entre a fase inicial e final.

Potencialmente, a correção realizada no pós-processamento de dados do Eixo B, Figura 4.5, pode ter contribuído para um erro maior em relação ao Eixo A, visto que o forma das curvas durante a fase inicial entre o Eixo A e o Eixo B é muito similar. Contudo, diferentemente do Eixo B, os dados relativos ao Eixo A apresentaram erros baixíssimos, menores que 1 mm, para a reconstrução de curva.

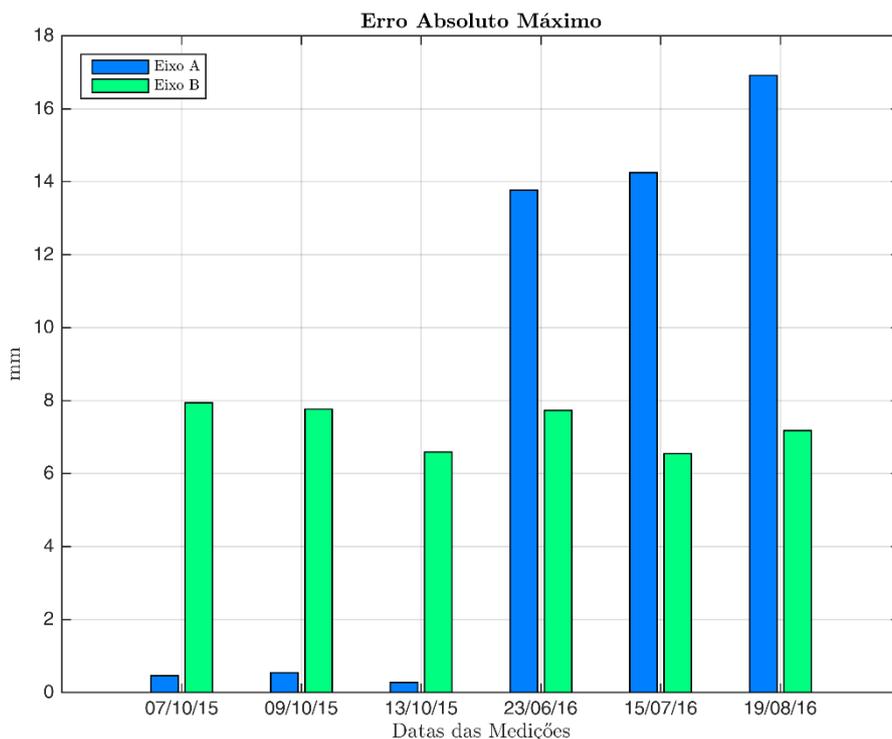


Figura 4.10 – Erro absoluto máximo em mm para todos os casos de medição.

A discrepância entre as respostas entre o Eixo A e B fica mais evidente quando analisado o erro relativo ao máximo deslocamento obtido por cada curva (Figura 4.11). Pode-se observar que os dados do Eixo B apresentaram os maiores valores para o erro relativo tanto para a fase inicial de medição quanto para a fase final. Vale mencionar que o erro máximo relativo ao deslocamento máximo foi 6,1 % considerando todos os casos analisados.

Na fase inicial, para o Eixo B, o algoritmo de reconstrução apresentou um erro absoluto mais elevado enquanto o deslocamento máximo nessa fase é bem inferior à fase final; assim, a diferença entre o erro relativo fica mais destacada quando se compara os resultados entre o Eixo A e B.

Na fase final, para o Eixo B, as curvas geradas pelo algoritmo de reconstrução resultaram em um erro absoluto da mesma ordem do que na fase inicial; todavia, durante a fase final, o deslocamento máximo para o Eixo B obteve valores inferiores em relação ao Eixo A. Além disso, o erro relativo ao deslocamento máximo para o Eixo B, mais uma vez, apresentou valores superiores comparativamente ao Eixo A.

Não foi possível identificar os principais fatores que acarretaram um erro absoluto maior para o Eixo B em relação ao Eixo A ao aplicar o algoritmo de reconstrução de curva; uma vez que não se pode notar uma divergência significativa entre as curvaturas

calculada e interpoladas ao se comparar os dois eixos. Apenas pode ser percebido que, para a fase inicial, o Eixo B apresentou um perfil de curvatura mais oscilante do que o Eixo A.

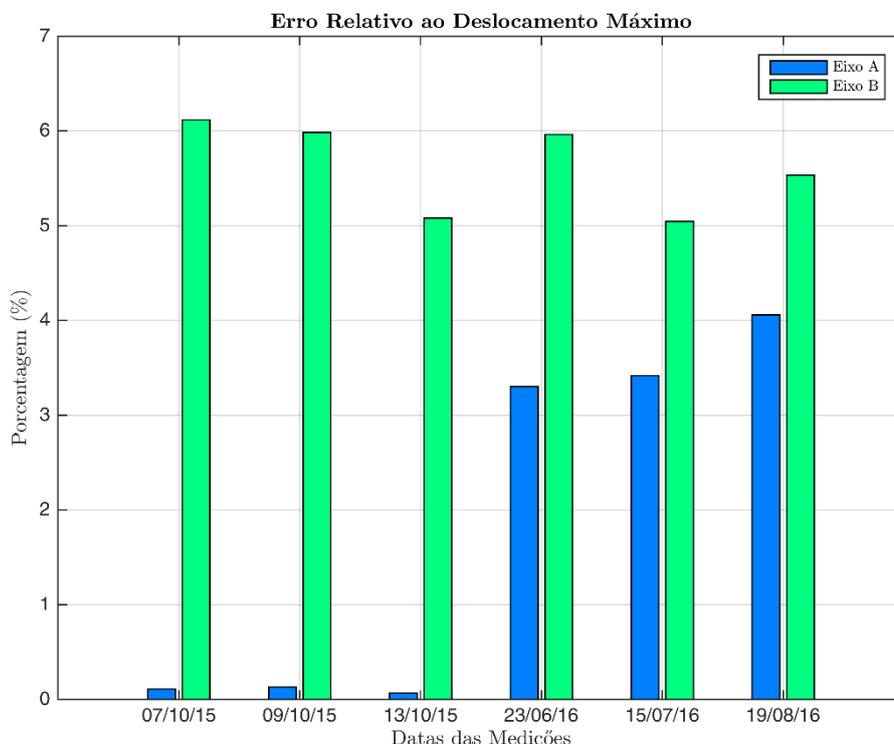


Figura 4.11 – Erro relativo ao deslocamento máximo (%) para todos os casos de medição.

Por último, foi calculado o erro médio quadrático (EMQ) para todos os cenários apresentados, Figura 4.12. Neste caso, o Eixo A apresentou os maiores valores para o EMQ durante a fase final de medição, uma vez que o erro absoluto foi maior nessa fase. Mais uma vez, o EMQ para a reconstrução do Eixo B se manteve relativamente próximo entre a fase inicial e final. O EMQ para o Eixo A durante a fase inicial foi significativamente baixo, da ordem de  $10^{-3}$ , assim eles não foram apresentados na Figura 4.12. Por outro lado, pode ser observado que máximo EMQ considerando todos os casos analisados foi de  $149,7 \text{ mm}^2$  e, assim, a raiz quadrada do máximo valor de EMQ foi de  $12,2 \text{ mm}$ .

De uma maneira geral, pode ser afirmado que o algoritmo de reconstrução de curva, proposto no presente estudo, aplicado aos dados reais de medição do deslocamento de solo apresentou uma resposta significativa para sua aplicação em um potencial sistema de monitoramento de massa de solo.

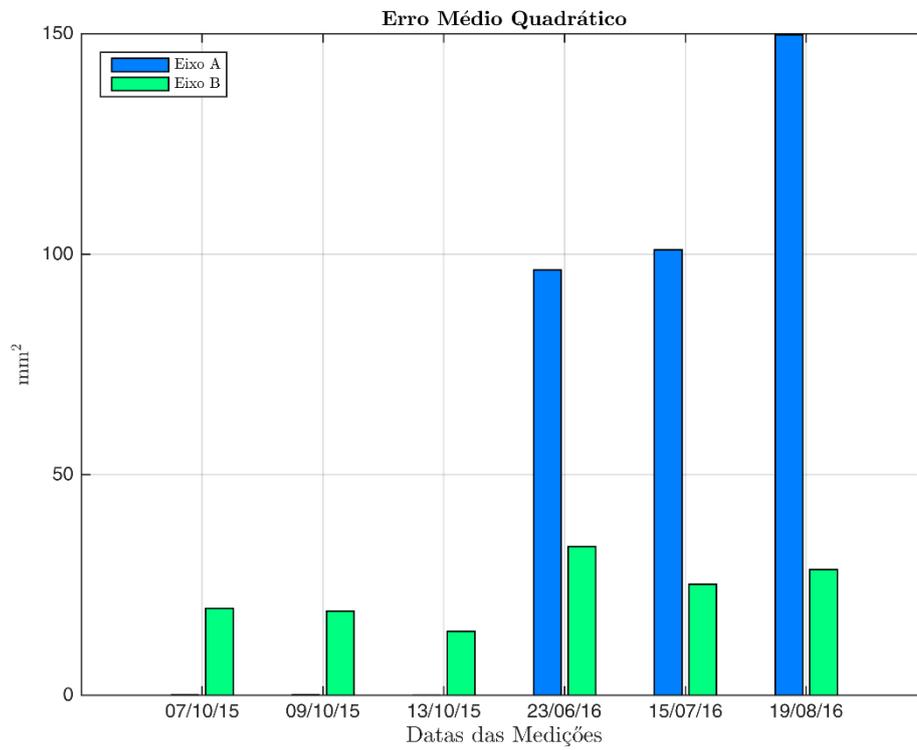


Figura 4.12 – Erro relativo ao deslocamento máximo (%) para todos os casos de medição.

## 5 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo o esquemático definido para a realização dos ensaios laboratoriais é apresentado; os materiais e equipamentos utilizados nos experimentos são definidos e os passos da montagem executada são descritos.

Em seguida, todas as informações relativas à calibração dos sensores a rede de Bragg em relação à variação da deformação são detalhadas e os resultados da calibração são apresentados.

As informações pertinentes à montagem final do experimento em escala reduzida são apresentadas, também são estabelecidos todos os tipos de ensaios executados. Os resultados da reconstrução e curva para os casos experimentais, bem como uma análise de erro, são discutidos ao final deste capítulo.

### 5.1 Descrição

Com o intuito de simular todos os componentes do sistema de monitoramento para a medição do deslocamento de solo através de sensores a rede de Bragg, incluindo a aplicação do algoritmo desenvolvido para este método, foi definida uma montagem experimental que representasse, em escala reduzida, o fenômeno geológico mencionado.

Foi projetado um tubo instrumentado no qual foram fixados sensores a rede de Bragg, diametralmente opostos, a fim de que fosse possível aplicar o método de medição de curvatura proposto na Seção 3.1. A Figura 5.1 mostra o esquemático da montagem experimental definida para o presente trabalho. Foi definido um espaçamento entre cada dupla de sensores, opostos entre si, de acordo com o comprimento total do tubo para a medição do perfil de curvatura. Para a montagem experimental, foi definido um espaçamento de 100 mm entre cada medição de curvatura, o qual representaria 1 m, aplicando uma proporção direta, de distância para uma aplicação de campo; e um comprimento total do tubo de 1,8 m, o que representaria 18 m de profundidade.

O material do tubo escolhido é o PVC (policloreto de vinila), pois este material permite razoável flexibilidade para executar deflexões ao tubo; também, foi estabelecido que as duas primeiras posições (P1 e P2) não seriam instrumentadas. A razão dessa escolha visa garantir as condições iniciais imposta pela Equação 3.8; além disso, as posições iniciais são fixadas para simular a região inicial de medição a qual não sofre deslocamentos horizontais, conforme foi discutido na Seção 4.1. Essas posições são

referentes às posições P1 a P4 da Figura 5.1, posições que estão fixadas na bancada de teste.

Os sensores foram definidos para ser fixados entre as posições P3 e P17, desta forma um total de 30 sensores a rede de Bragg são necessários para a montagem apresentada. Para a posição P18 foi decidido também desconsiderar instrumentação, pois foi decidido estipular uma curvatura nula no ponto final do tubo. Esta escolha vem da mesma estratégia utilizada na reconstrução de curva com dados do monitoramento em campo por inclinômetro, discutido na Seção 4.2, tendo como finalidade suavizar a interpolação dos dados de curvatura no início e no término da curva.

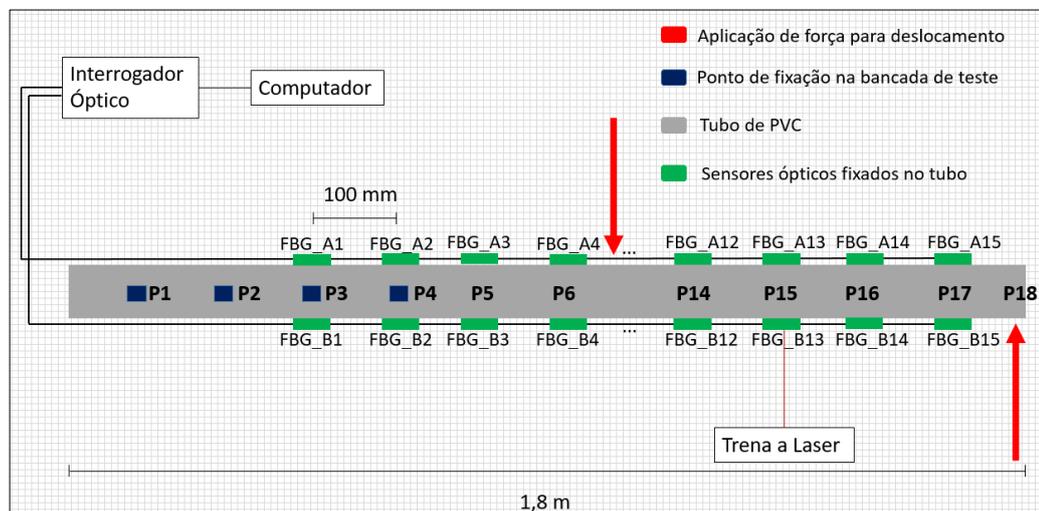


Figura 5.1 – Esquemático da montagem experimental para simular o monitoramento do deslocamento de massa de solo.

Para simular o deslocamento horizontal do solo, foram aplicadas, para pontos definidos no tubo, forças a fim de provocar deslocamento ao tubo instrumentado e assegurar que o tubo permanecesse em uma posição estável ao longo da medição; como mostra a representação das setas vermelhas na Figura 5.1.

O interrogador óptico escolhido foi o sm125 da Micron Optics [40] (Figura 5.2). Este módulo de sensoriamento utiliza o método de multiplexação por comprimento de onda, WDM. Sua fonte de luz é um laser óptico de varredura sincronizado com um filtro de Fabry-Perot (FFP) sintonizável. O software de aquisição utilizado foi o Enlighth, do próprio fabricante, versão 1.14.0.0. A Tabela 5.1 apresenta as principais características deste equipamento.

Tabela 5.1 – Especificações do sistema sm125 da Micron Optics [40].

Parâmetro	Valor
Número de canais ópticos	4
Frequência de aquisição	2 Hz
Repetitividade	0,5 pm em 1 Hz
Faixa dinâmica	50 dB
Faixa de comprimento de onda	1510 nm – 1590 nm
Tipo de conector óptico	FC/APC
Exatidão	1 pm



Figura 5.2 – Interrogador óptico sm125 da Micron Optics [40].

Para que fosse estabelecido uma referência do posicionamento de cada ponto entre P1 a P18, foi utilizado uma trena a laser, veja Figura 5.1. A trena é fixada na bancada de modo a correr livremente ao longo do comprimento do tubo instrumentado, mas mantendo sempre um ângulo reto entre a direção da porção inicial do tubo e a direção de medição da trena. A trena escolhida foi a trena a laser 419D da Fluke®, veja Figura 5.3. A Tabela 5.2 apresenta as principais características dessa trena.

Tabela 5.2 – Especificações da trena a laser 419D da Fluke® [41].

Parâmetro	Valor
Máxima distância de leitura	80 m
Exatidão	$\pm 1$ mm



Figura 5.3 – Trena a laser 419D da Fluke® [41].

Dois cordões de sensores praticamente idênticos, cordão A e cordão B, foram utilizados para a instrumentação do tubo de PVC. Cada sensor possui 15 sensores ópticos espaçados aproximadamente a cada 5 nm, conforme mostrado na Tabela 5.3; todos os sensores ópticos possuem comprimento de onda de Bragg entre 1510 nm e 1590 nm.

Tabela 5.3 – Distribuição dos sensores ópticos a rede de Bragg relativo ao comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ): cordão A e B.

<b>Cordão A</b>	<b>Cordão B</b>	<b><math>\lambda_B</math> (nm)</b>
FBG_A1	FBG_B1	1515
FBG_A2	FBG_B2	1520
FBG_A3	FBG_B3	1525
FBG_A4	FBG_B4	1530
FBG_A5	FBG_B5	1535
FBG_A6	FBG_B6	1540
FBG_A7	FBG_B7	1545
FBG_A8	FBG_B8	1550
FBG_A9	FBG_B9	1555
FBG_A10	FBG_B10	1560
FBG_A11	FBG_B11	1565
FBG_A12	FBG_B12	1570
FBG_A13	FBG_B13	1575
FBG_A14	FBG_B14	1580
FBG_A15	FBG_B15	1585

## 5.2 Calibração de sensores FBG

Antes de iniciar os ensaios experimentais foi necessário calibrar os sensores a rede de Bragg com o propósito de definir o coeficiente de sensibilidade relativo à deformação,  $k_s$ . A calibração dos sensores frente a variação de temperatura não se faz necessária, uma vez que a constante  $k_t$  não influencia a resposta da Equação 2.7.

Os cordões de sensores A e B foram fixados, em momentos distintos, a uma haste de suporte de modo que a região entre os sensores permanecesse suspensa, veja a Figura 5.4. Na extremidade inferior de cada cordão foi fixado um recipiente para armazenar pesos de modo a tracionar o cordão óptico. Devido ao longo comprimento dos cordões ópticos, o recipiente foi fixado depois do sensor de índice 12 de cada cordão, assim as leituras dos sensores de índices superiores não foram computadas. Esses descartes não acarretaram redução da qualidade da calibração, visto que um número de 12 sensores foi suficiente para determinar a constante  $k_s$  e sua variação entre os sensores de um cordão.

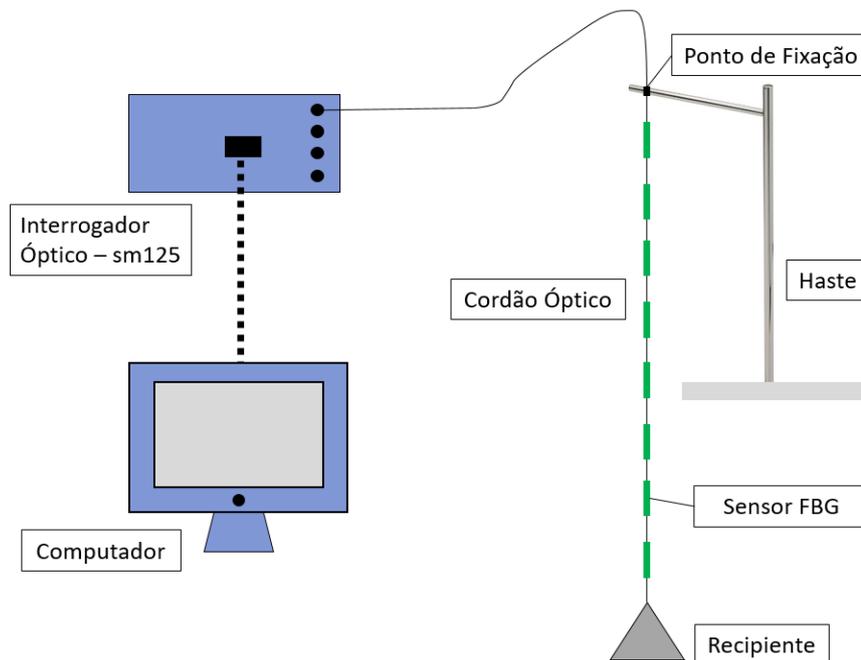


Figura 5.4 – Esquemático para calibração dos sensores a rede de Bragg relativo à variação da deformação.

O cordão óptico foi conectado ao interrogador óptico, por sua vez o interrogador foi conectado a um computador. A variação do comprimento de onda era registrada enquanto pesos de diferentes massas eram adicionados ao recipiente. Ao longo do

processo de calibração a temperatura ambiente variou entre 23,8 °C e 24,2 °C, essa variação não foi considerada significativa e assim não foi utilizada no cálculo para definir calibração dos sensores. Portanto, considerando a variação de temperatura como nula e partindo da Equação 2.4, tem-se a Equação 5.1, utilizada durante a sensibilização da variação da deformação dos sensores a rede de Bragg.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k_s \varepsilon \quad 5.1$$

Através da Equação 5.1, basta calcular a variação relativa do comprimento de onda, dada pela aquisição dos sensores a rede de Bragg, e a correspondente deformação sofrida pela fibra óptica; considerando o cenário apresentado pela Figura 5.4. Assim, pode ser obtida a constante de sensibilidade  $k_s$ .

Para que seja calculada a deformação na fibra, retorna-se ao módulo de Young da fibra ( $E$ ) o qual é a relação da tensão ( $\vec{\tau}$ ) e a deformação, dada pela Equação 5.2. Além disso, por definição, a tensão é definida pela razão entre a força aplicada a um corpo ( $\vec{F}$ ) e sua área da Seção transversal do corpo ( $A$ ), como mostra a Equação 5.3. Caso a força aplicada a um corpo seja a força peso, temos válida a Equação 5.4, onde  $m$  é a massa de um corpo e  $\vec{g}$  é o vetor da aceleração da gravidade. Assim, é possível chegar na expressão final dada pela Equação 5.5.

$$E = \frac{\vec{\tau}}{\varepsilon} \quad 5.2$$

$$\vec{\tau} = \frac{\vec{F}}{A} \quad 5.3$$

$$\vec{F} = m\vec{g} \quad 5.4$$

$$\varepsilon = \frac{m|\vec{g}|}{AE} \quad 5.5$$

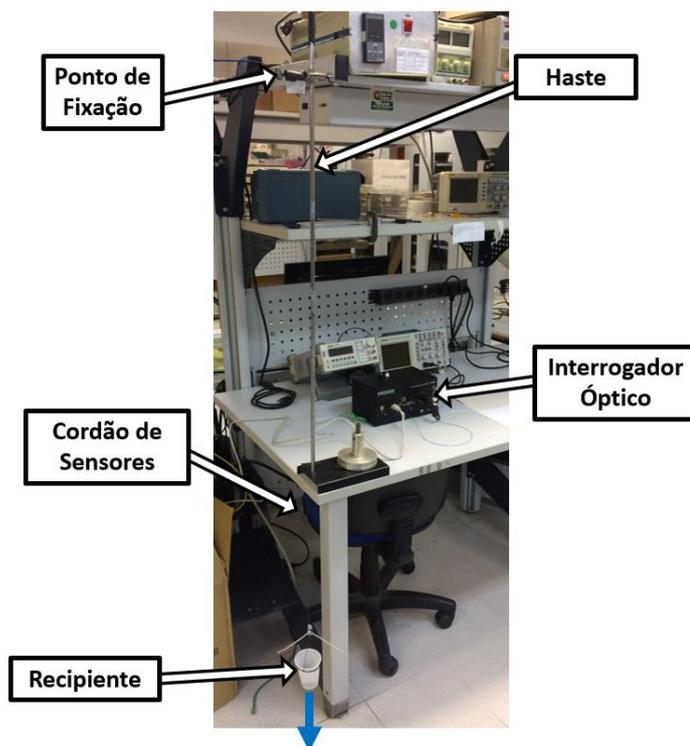


Figura 5.5 – Montagem utilizada para a calibração dos cordões de sensores. A seta azul indica a direção e sentido da força aplicada ao cordão.

A Tabela 5.4 exibe os valores de todas as constantes utilizadas na calibração dos sensores a rede de Bragg em relação a deformação. A Figura 5.5 apresenta a montagem utilizada durante a calibração dos sensores a rede de Bragg.

Tabela 5.4 – Valores das constantes utilizadas na calibração dos sensores.

Constante	Valor
E	71,71 GPa
g	9,81 m/s <sup>2</sup>
A	1,23 x 10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup>

## Cordão A

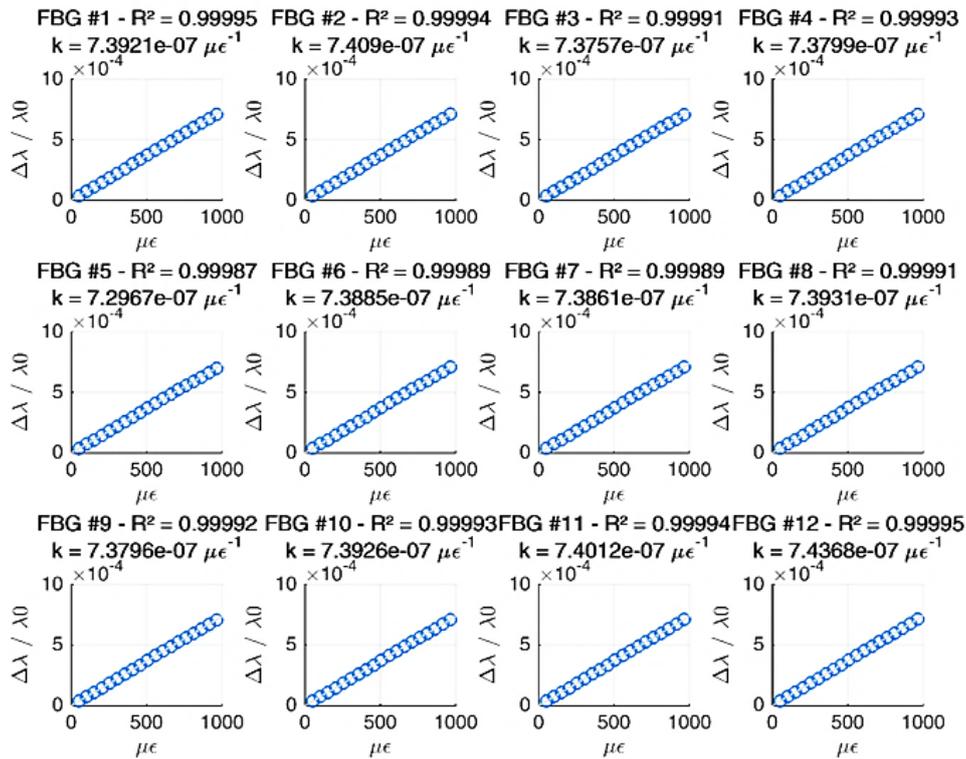


Figura 5.6 – Calibração dos 12 primeiros sensores do cordão A.  $R^2$  é o coeficiente de determinação para cada curva de calibração e  $k$  é a constante  $k_s$  de cada sensor calibrado.

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 mostram os resultados da calibração realizada, respectivamente para o cordão A e o cordão B. A deformação aplicada a cada sensor variou entre os valores  $0 \mu\epsilon$  e  $1000 \mu\epsilon$ , aproximadamente. Pelos valores dos coeficientes de determinação,  $R^2$ , para cada sensor calibrado, é possível afirmar que todos os sensores apresentaram um respostar linear, como previsto através da Equação 5.1.

Na Tabela 5.5, pode-se observar que o cordão A apresentou a média de  $k_s$  como igual a  $0,7386 \mu\epsilon^{-1}$ ; para o cordão B, a média de  $k_s$  foi igual  $0,7481 \mu\epsilon^{-1}$ . O desvio padrão de  $k_s$  foi o mesmo para os dois cordões, de  $0,0032 \mu\epsilon^{-1}$ ; já para os valores de  $R^2$ , a média foi a mesma para os dois cordões de  $0,9999$ ; e o desvio padrão foi de  $2,61 \times 10^{-5}$  para o cordão A,  $2,36 \times 10^{-5}$  para o cordão B.

Foi definido utilizar o mesmo valor de  $k_s$  entre os sensores de um mesmo cordão, pois sua variação foi considerada muito pequena entre os sensores de modo a influenciar a leitura dos sensores.

## Cordão B

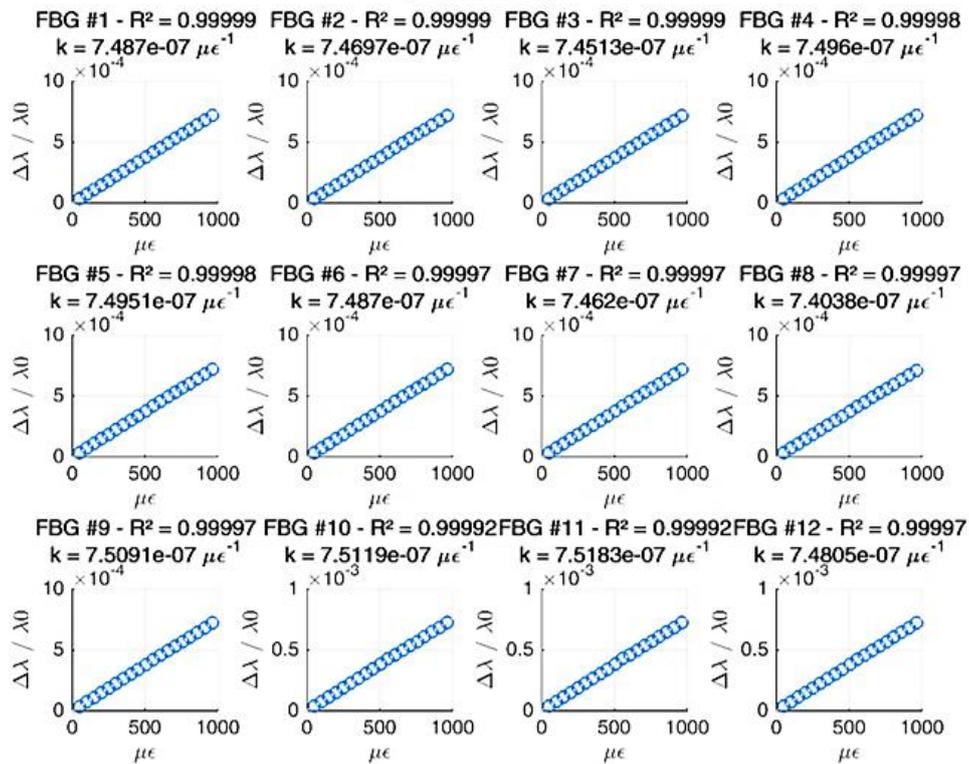


Figura 5.7 – Calibração dos 12 primeiros sensores do cordão B.  $R^2$  é o coeficiente de determinação para cada curva de calibração e  $k$  é a constante  $k_s$  de cada sensor calibrado.

Tabela 5.5 – Estatística da variação do coeficiente de sensibilidade,  $k_s$ , e o coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Cordão	$k_s$	$k_s$	$R^2$	$R^2$
	média	std	média	std
	$\mu\epsilon^{-1}$	$\mu\epsilon^{-1}$		
A	0,7386	0,0032	0,9999	$2,61 \times 10^{-5}$
B	0,7481	0,0032	0,9999	$2,36 \times 10^{-5}$

Como a média do valor de  $k_s$  apresentou um valor diferente entre os cordões A e B, foi considerado uma aproximação para o cálculo de curvatura apresentado no item 3.1. A Equação 3.2 pode ser desenvolvida para Equação 5.6, onde  $k_{sA}$  e  $k_{sB}$  são, respectivamente, as médias dos coeficientes de sensibilidade em relação à deformação do cordão A e do cordão B.

$$\kappa = \frac{1}{2y} \left( \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B k_{sB}} - \frac{\Delta\lambda_A}{\lambda_A k_{sA}} \right) \quad 5.6$$

### 5.3 Montagem e casos experimentais

Inicialmente, um tubo de PVC de 1,8 m de comprimento e diâmetro externo de aproximadamente 25 mm foi medido e as posições P1 a P4 foram marcadas, e o tubo de PVC foi fixado em uma bancada de teste utilizando parafusos. Após a fixação do tubo, todas as marcações necessárias foram realizadas a fim de definir as posições de P5 a P18, como também definir os eixos nos quais os cordões A e B foram alinhados e fixados no tubo, veja a Figura 5.8. Também, foi definido o sinal para a curvatura medida como positivo para curvaturas à direita e negativo para curvatura à esquerda.

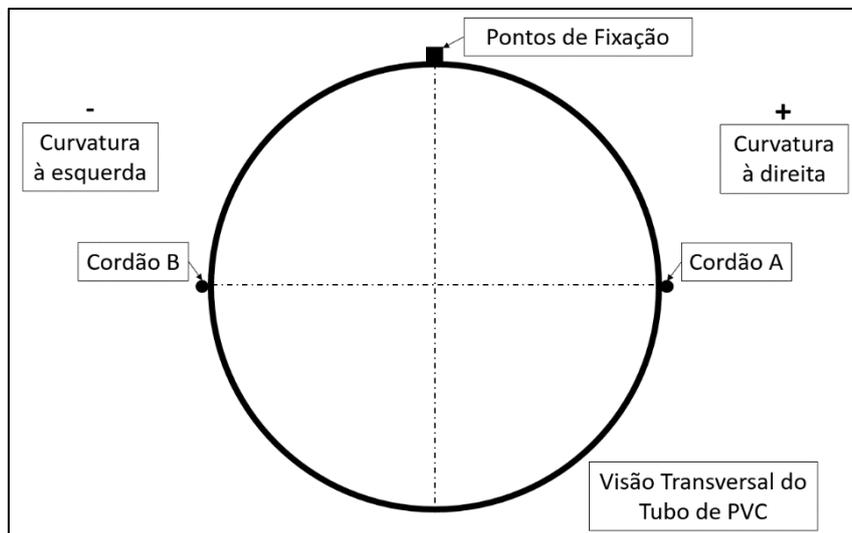


Figura 5.8 – Visão transversal do posicionamento do Pontos de Fixação, Cordão A e B.

O diâmetro do tubo de PVC foi medido para cada ponto de P1 a P18, por três vezes, utilizando um paquímetro da Mytutoyo [42] de resolução de 0.05 mm, Série 530, veja Figura 5.9. A variação do diâmetro foi considerada pequena resultando em uma média de 25,25 mm e desvio padrão de 0,0425 mm. Para efeito de cálculo, foi considerado o valor de 25,25 mm ao longo de todo o comprimento do tubo de PVC. Além disso, foram medidas as distâncias ao longo do eixo axial do tubo para os pontos P1 a P18, partindo do início do tubo; a Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.6 – Distâncias obtidas, no eixo axial do tubo de PVC, para as medições dos pontos P1 a P18.

Ponto	Distância - mm	Ponto	Distância - mm
P1	100	P11	1097
P2	197	P12	1196
P3	298	P13	1297
P4	396	P14	1397
P5	495	P15	1496
P6	596	P16	1598
P7	696	P17	1696
P8	796	P18	1797
P9	896	-	-
P10	998	-	-



Figura 5.9 – Medição do diâmetro do tubo de PVC para o ponto P14.

Os sensores ópticos foram fixados ao tubo de PVC utilizando um adesivo de uso geral à base de cianoacrilato, Loctite® 496 [43]. Este adesivo foi escolhido por ter boa adesão para superfícies em geral, como superfícies metálicas ou plásticas, por ter baixa viscosidade e rápido tempo de cura (por volta de 30 s para uma superfície de PVC). A baixa viscosidade e o rápido tempo de cura ajudam na colagem quando não realizada em

uma superfície horizontal; no caso do tubo de PVC, a colagem foi realizada nas laterais do tubo, considerando a disposição apresentada na Figura 5.8. Além disso, a colagem dos sensores foi realizada de modo que o meio do comprimento do sensor coincidisse com a marcação de cada ponto (P1 a P18).



Figura 5.10 – Resultado de um exercício de colagem de sensor óptico utilizando a cola Loctite 496. Sensor alinhado pela direção indicada através da seta A.

Para a preparação da colagem do sensor, foram executadas as recomendações do fabricante do adesivo utilizado: a superfície foi lixada e, após, propriamente limpa com álcool isopropílico antes da deposição da cola. A cola foi aplicada diretamente ao sensor óptico, conforme mostra a Figura 5.10, fitas plásticas foram utilizadas para estabilizar o sensor na posição desejada durante a cura do adesivo. Como o sensor óptico possui uma proteção de um material cerâmico, a transferência das solicitações mecânicas entre o sensor óptico e a cola fixada ao tubo ocorre de maneira satisfatória.

Após o processo de colagem dos sensores ópticos ao tubo de PVC, o tubo foi fixado à bancada de teste. Após isso, os cordões ópticos foram conectados ao interrogador ópticos sm125, que por sua vez foi conectado a um computador; o resultado final da montagem é apresentado na Figura 5.11.

Com o objetivo obter um sistema de posicionamento de referência para cada ponto marcado do tubo de PVC (pontos P1 a P18), a trena a laser, mencionada na Seção 5.1, foi utilizada para medir o deslocamento do tubo. A trena foi fixada à bancada e alinhada com um ponto desejado do tubo, em seguida, uma leitura em varredura foi feita ao longo da lateral do tubo, na direção da vertical, de modo a ler a mínima distância possível, veja a Figura 5.12. Assim, para calcular o deslocamento horizontal de um ponto do tubo, foi realizada a subtração da distância do tubo de PVC ao ser deslocado da leitura inicial do

tubo nesse mesmo ponto. A posição inicial do tubo de PVC é aquela em que o tubo se encontra o mais retilíneo possível em toda sua extensão.

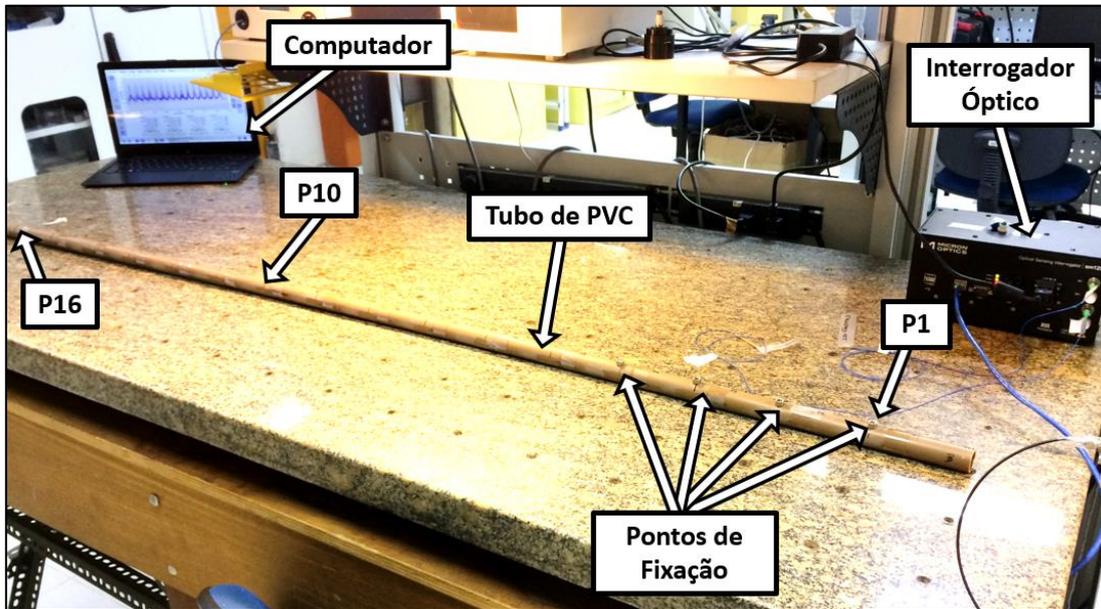


Figura 5.11 – Montagem experimental: pontos P1, P10 e P16 estão indicados, assim como os pontos de fixação do tubo de PVC. Sobre a bancada de teste estão indicados também o interrogador óptico e os computador utilizado.



Figura 5.12 – Procedimento de leitura da distância horizontal de um ponto do tubo de PVC utilizando uma trena a laser.

Ao total foram realizados 4 tipos de ensaios diferentes, conforme exposto na Figura 5.13, para provocar deflexões ao tubo de PVC:

- Caso 1: deflexão à direita com a aplicação de força no ponto P18;
  - Casos: 1.0, 1.1, 1.2 e 1.3;
- Caso 2: pequena deflexão à esquerda com a aplicação de força no ponto P18;
  - Casos: 2.0, 2.1 e 2.2;
- Caso 3: deflexão à direita com a aplicação de força no ponto P18, com o ponto P9 fixo à bancada de teste;
  - Casos: 3.0, 3.1 e 3.2;
- Caso 4: deflexão à direita com a aplicação de força no ponto P18, juntamente com uma deflexão à esquerda com a aplicação de força no ponto P18;
  - Casos: 4.0, 4.1 e 4.2.

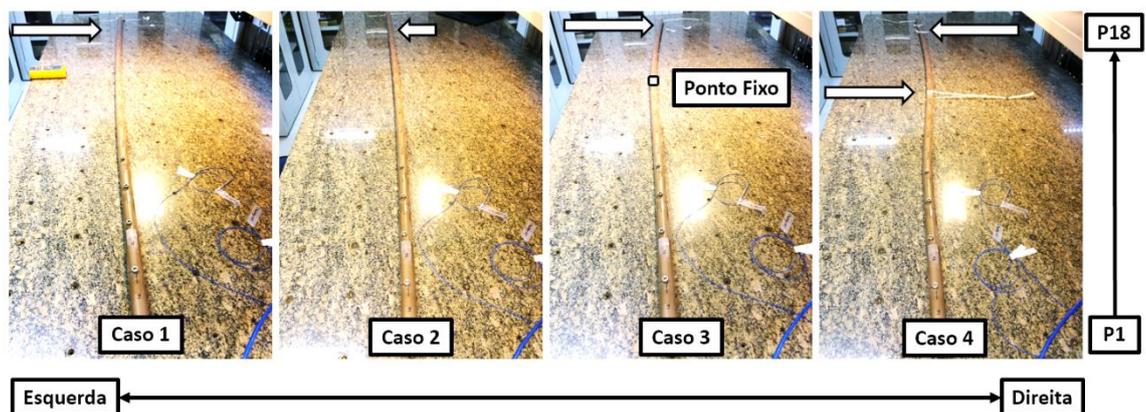


Figura 5.13 – Apresentação dos 4 tipos de casos ensaiados para provocar de deflexões ao tubo instrumentado. Na vertical, está indicado a sequência dos pontos P1 a P18; na horizontal, está indicado a direção para à direita e para à esquerda.

## 5.4 Análise de Resultados

### 5.4.1 Reconstrução de curvas

O algoritmo para reconstrução de curva apresentado na Seção 3.2 foi aplicado de forma completa para todos os casos de apresentados na Seção 5.3. Foi considerada uma resolução de 1 mm para a reconstrução das curvas oriundas das deflexões do tubo de PVC; esses resultados foram comparados com a medição do deslocamento para cada ponto de P1 a P18 utilizando a trena a laser. Vale destacar que, conforme mencionado na

Seção 5.1, pontos P1, P2 e P18, não foram instrumentados, uma vez que a curvatura nesses pontos foi considerada nula.

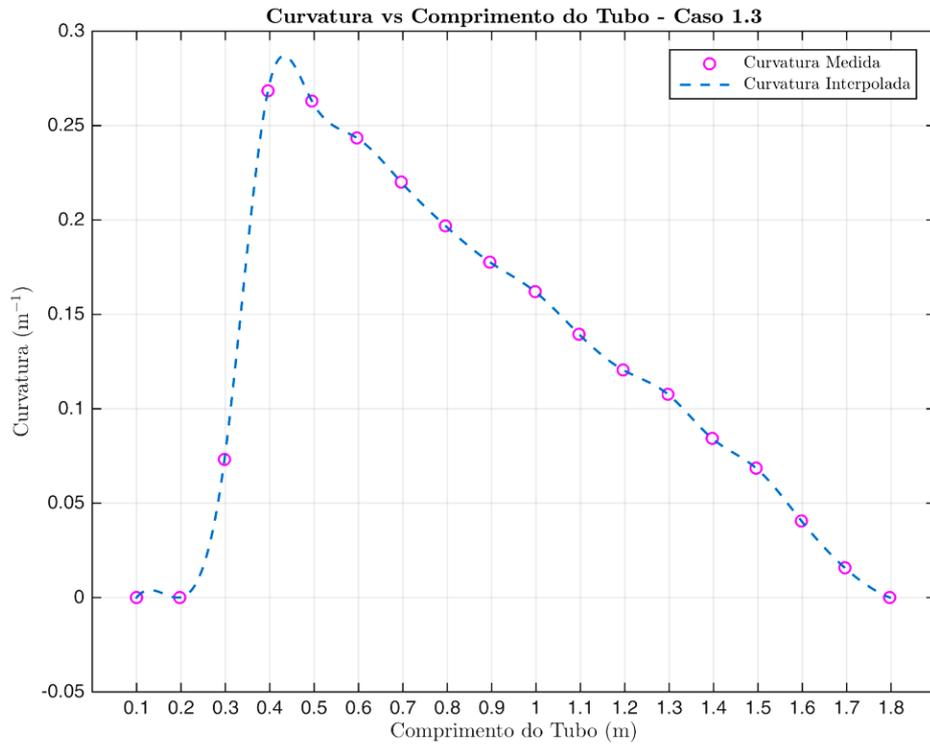


Figura 5.14 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.3.

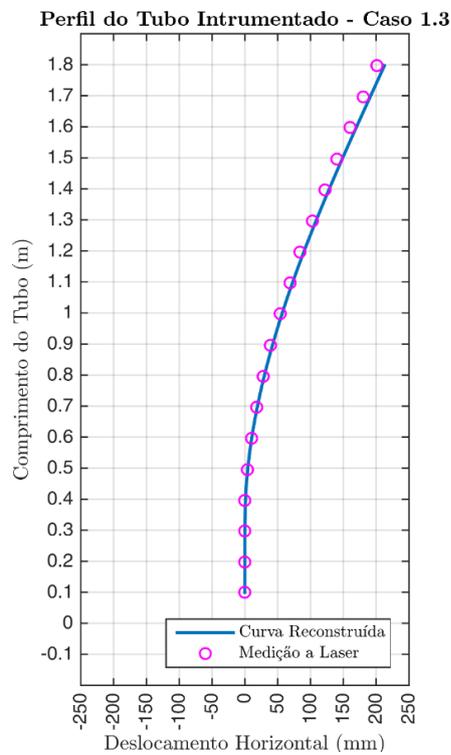


Figura 5.15 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.3.

A Figura 5.14 apresenta as curvaturas calculadas para o Caso 1.3, como também o resultado da interpolação da curvatura em relação a cada ponto ao longo do comprimento do tubo. O resultado da reconstrução está exposto na Figura 5.15, onde pode ser visto que o perfil de reconstrução da curva ficou muito próximo, em uma análise qualitativa, do perfil de deslocamento medido com a trena a laser. Vale ressaltar que P3, próximo ao comprimento 0,3 m, e P4, próximo ao comprimento 0,4, apresentaram medições de curvatura considerável, mesmo sendo pontos fixados à bancada de teste com deslocamento horizontal quase nulo. Para o Caso 1.3, a curvatura máxima medida foi de  $0,268 \text{ m}^{-1}$  e o deslocamento horizontal máximo superior a 200 mm.

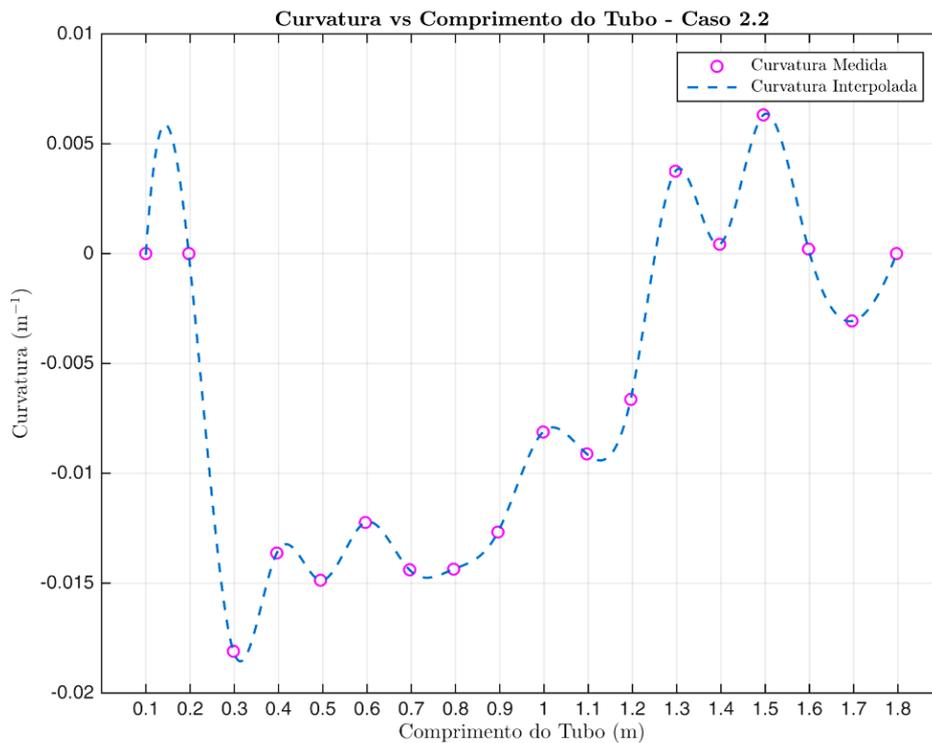


Figura 5.16 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.2.

A Figura 5.16 mostra o perfil da curvatura para o Caso 2.2. É possível observar que os valores de curvatura foram bem inferiores aos valores encontrados do Caso 1.3. A máxima curvatura medida, em valor absoluto, foi de  $0,018 \text{ m}^{-1}$ ; a resposta da reconstrução para esse caso está presente na Figura 5.17.

Para o Caso 3, a Figura 5.18 apresenta a reconstrução de curva para o Caso 3.2. Em todos os casos apresentados o erro máximo na reconstrução da curva supostamente ocorre próximo ao ponto P18, na referência de 1,8 m de comprimento do tubo instrumentado. Este efeito é esperado, dado que o algoritmo de reconstrução é recursivo,

cada ponto reconstruído depende da reconstrução dos pontos anteriores, desta forma, pode ser esperado que o erro máximo se apresente ao final da reconstrução da curva.

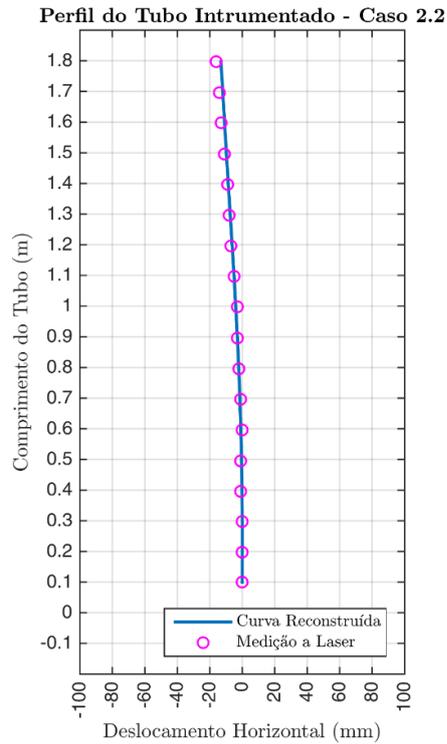


Figura 5.17 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.2.

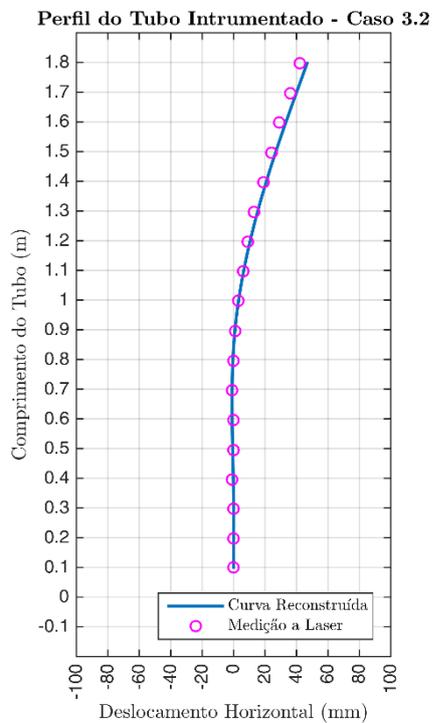


Figura 5.18 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.2.

A Figura 5.19 exibe o perfil da curvatura para o Caso 4.1, no qual a curvatura é positiva até o comprimento de 0,6 m (P6), e negativa de 0,7 m (P7) até o final do comprimento do tubo. Os valores de curvatura oscilam entre valores opostos de significativa magnitude:  $0,428 \text{ m}^{-1}$  e  $-0,232 \text{ m}^{-1}$ . Contudo, através da Figura 5.20, podemos verificar que o deslocamento horizontal é pequeno. O deslocamento horizontal máximo, medido pela trena a laser, foi de 41 mm. Em uma análise qualitativa, podemos verificar que este caso apresentou, potencialmente, um maior erro perante aos outros casos analisados.

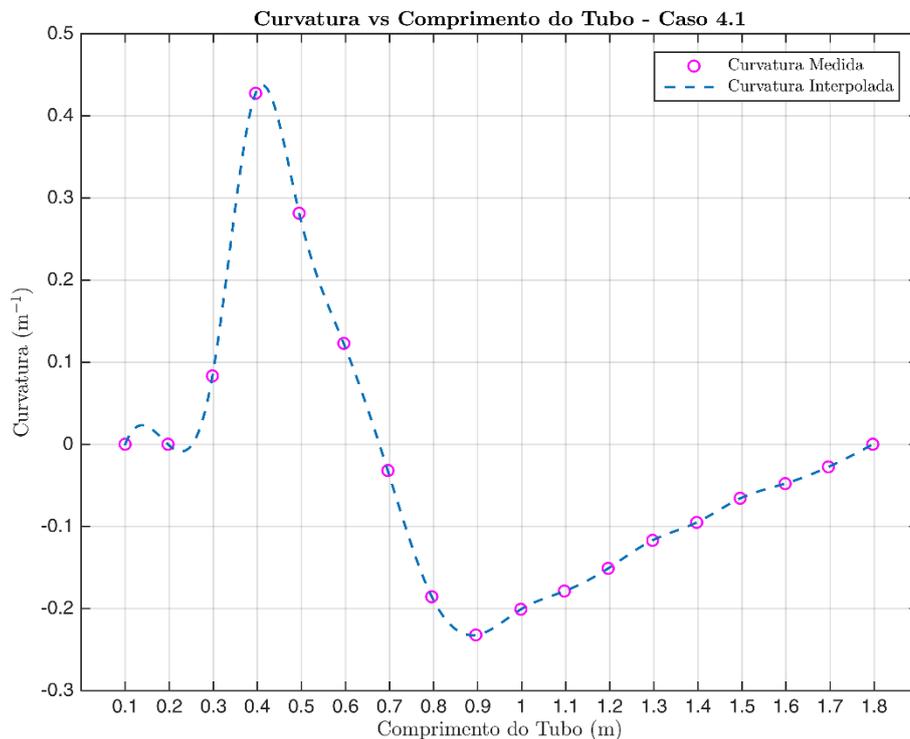


Figura 5.19 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.1.

A Tabela 5.7 exibe o valor absoluto das máximas curvaturas medidas entre todos os casos ensaiados. Pode-se observar que para os ensaios do Caso 2, os valores foram os menores entre  $0,018 \text{ m}^{-1}$  e  $0,051 \text{ m}^{-1}$ , em virtude de que nesse tipo de ensaio foram aplicados os menores deslocamentos. Já para o tipo de ensaio do Caso 4, os valores de curvatura medidos foram os mais elevados, variando entre  $0,428 \text{ m}^{-1}$  e  $0,547 \text{ m}^{-1}$ , pois nesses ensaios foi provocado elevadas deformações ao tubo de modo a simular um perfil em ‘S’, ou seja, para alternar o sinal da curvatura ao longo do comprimento do tubo.

Por fim, todos os perfis de curvatura medidos e todas as reconstruções de curvas para cada caso ensaiado podem ser encontrados no ANEXO B.

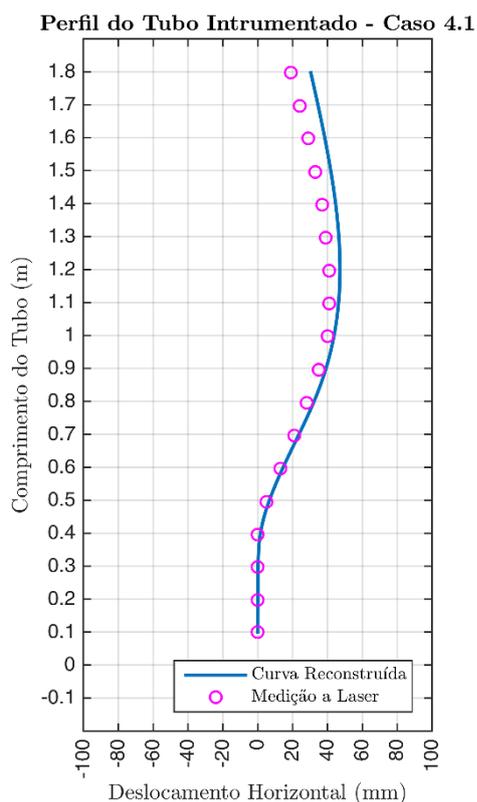


Figura 5.20 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.1.

Tabela 5.7 – Valor absoluto das máximas curvaturas medidas pelos sensores a rede de Bragg para todos os casos experimentais ensaiados.

<b>Caso</b>	<b>Curvatura (<math>m^{-1}</math>)</b>	<b>Caso</b>	<b>Curvatura (<math>m^{-1}</math>)</b>
Caso 1.0	0,106	Caso 3.0	0,188
Caso 1.1	0,066	Caso 3.1	0,166
Caso 1.2	0,052	Caso 3.2	0,102
Caso 1.3	0,268	Caso 4.0	0,547
Caso 2.0	0,051	Caso 4.1	0,428
Caso 2.1	0,022	Caso 4.2	0,513
Caso 2.2	0,018	-	-

#### 5.4.2 Análise de erro

Para uma análise quantitativa, foram calculados os seguintes erros, Equações 5.7 a 5.10:

- O erro absoluto máximo (mm) e sua posição no tubo;

$$Erro_{absoluto} = d_{laser} - d_{reconstruída} \quad 5.7$$

- O erro máximo relativo (%) ao comprimento do tubo e sua posição no tubo;

$$Erro_{relativo\ comprimento} = (d_{laser} - d_{reconstruída})/s \quad 5.8$$

- O erro máximo relativo (%) ao máximo deslocamento horizontal e sua posição no tubo;

$$Erro_{relativo\ deslocamento} = (d_{laser} - d_{reconstruída})/d_{max} \quad 5.9$$

- A raiz quadrada do erro médio quadrático (mm).

$$Erro_{relativo\ deslocamento} = \sqrt{\frac{\sum(d_{laser} - d_{reconstruída})^2}{n}} \quad 5.10$$

onde  $d_{laser}$  é o deslocamento medido para um dado ponto (P1 a P18) pela trena a laser;  $d_{reconstruída}$  é o deslocamento obtido pelo algoritmo de reconstrução nesse mesmo ponto;  $s$  é comprimento do tubo até o dado ponto em questão;  $d_{max}$  é o máximo deslocamento entre todos os pontos do tubo; e  $n$  é o número total de pontos do tubo, ou seja, 18.

Com exceção aos Casos 2.0 e 2.1, todos os erros absolutos máximos encontram-se na última posição do tubo, P18. Os ensaios do Caso 2 obtiveram os menores erros absolutos, juntamente com o caso 1.2; tais ensaios apresentaram os menores valores de curvatura, devido à baixa deflexão provocada no tubo. O valor do menor erro absoluto máximo para um ensaio encontrado foi de 1,61 mm, Caso 2.0.

Já para os tipos de ensaios do Caso 4, foram encontrados os maiores erros absolutos máximos, com valores variando entre 11,45 mm a 14,01 mm, todos na posição P18. Para os ensaios do Caso 4, foram realizados grandes deflexões ao tubo, resultando, contudo, em baixos valores de deslocamentos horizontais.

Os valores de curvaturas encontrados para os ensaios do Caso 4, veja a Tabela 5.7, foram bem superiores à máxima curvatura encontradas perante todos os casos analisados na Seção 4.3 – com o valor máximo não superior a  $0,1\ m^{-1}$  para as curvas obtidas pela instrumentação em campo por inclinômetros. Potencialmente, a alta deflexão aplicada – resultando em elevadas curvaturas – em um pequeno trecho de tubo pode ter contribuído para um maior desvio na reconstrução de curva.

Tabela 5.8 – Erro absoluto máximo e sua posição no tubo instrumentado para todos os casos ensaiados.

<b>Caso</b>	<b>Erro Absoluto Máximo (mm)</b>	<b>Posição no Tubo</b>
Caso 1.0	6,92	P18
Caso 1.1	3,81	P18
Caso 1.2	2,87	P18
Caso 1.3	11,51	P18
Caso 2.0	1,61	P16
Caso 2.1	2,97	P17
Caso 2.2	2,89	P18
Caso 3.0	6,02	P18
Caso 3.1	5,54	P18
Caso 3.2	4,72	P18
Caso 4.0	14,01	P18
Caso 4.1	11,45	P18
Caso 4.2	13,32	P18

A Tabela 5.9 mostra que os valores para o erro máximo relativo ao comprimento do tubo foram todos inferiores a 1 % e não houve uma variação considerável entre os tipos de ensaios executados. Esse tipo de erro, relaciona o erro absoluto em um dado ponto com o comprimento do tubo até o ponto analisado; desta maneira, os maiores erros absolutos para uma curva tendem a ser os que estão em comprimentos maiores do tubo, portanto o erro tende a não variar muito ao longo do comprimento do tubo.

É possível comparar os resultados obtidos na Tabela 5.9 com os resultados obtidos no trabalho [28]. Em [28], o erro relativo ao comprimento, para curvas bidimensionais, variou entre 1,06 % e 1,68 %; desta forma, é possível concluir que o presente trabalho apresentou erro relativo ao comprimento da curva inferior ao estudo [28].

Tabela 5.9 – Erro máximo relativo ao comprimento do tubo instrumentado e sua posição no tubo para todos os casos ensaiados.

<b>Caso</b>	<b>Erro Máximo relativo ao comprimento do tubo (%)</b>	<b>Posição no Tubo</b>
Caso 1.0	0,39	P18
Caso 1.1	0,21	P18
Caso 1.2	0,16	P18
Caso 1.3	0,64	P18
Caso 2.0	0,18	P18
Caso 2.1	0,21	P18
Caso 2.2	0,22	P18
Caso 3.0	0,33	P10
Caso 3.1	0,31	P10
Caso 3.2	0,26	P13
Caso 4.0	0,80	P9
Caso 4.1	0,64	P18
Caso 4.2	0,74	P9

Como o objetivo final do método de monitoramento proposto é avaliar o deslocamento horizontal máximo de uma curva, foi definido o erro relativo ao máximo deslocamento horizontal para um dado ensaio experimental; os valores máximos desse erro foram dispostos na Tabela 5.10. Pode ser visto que os valores percentuais são mais elevados que os apresentados na Tabela 5.9, pois quando o erro absoluto aumenta para uma curva em que o deslocamento horizontal máximo não é não considerável, esse tipo de erro tende a aumentar. Assim, pode ser visto que para os tipos de ensaios do Caso 4, o erro relativo ao deslocamento horizontal máximo é bem significativo, com valores variando entre 23,35 % e 26,64 %. Esse erro também é significativo para os ensaios que apresentaram baixos valores de erro absoluto, como os casos 2.0, 2.1, 2.2 e 1.2, pois tais casos apresentam reduzidos valores de deslocamento horizontal máximo.

Tabela 5.10 – Erro máximo relativo ao máximo deslocamento horizontal e sua posição no tubo para todos os casos ensaiados.

<b>Caso</b>	<b>Erro Máximo relativo ao máximo deslocamento horizontal (%)</b>	<b>Posição no Tubo</b>
Caso 1.0	8,76	P18
Caso 1.1	7,78	P18
Caso 1.2	7,55	P18
Caso 1.3	5,73	P18
Caso 2.0	4,03	P16
Caso 2.1	14,84	P17
Caso 2.2	18,05	P18
Caso 3.0	8,36	P18
Caso 3.1	8,27	P18
Caso 3.2	11,23	P18
Caso 4.0	23,35	P18
Caso 4.1	27,93	P18
Caso 4.2	26,64	P18

Por fim, foi também calculada a raiz quadrada do erro médio quadrático, Tabela 5.11. Pode ser observado que os maiores valores encontrados foram para os casos 4.0, 4.1 e 4.2, com valores variando entre 6,03 mm e 7,86 mm. O menor valor encontrado para este tipo de erro foi de 0,78 mm para o caso 2.0.

Tabela 5.11 – Raiz quadrada do erro médio quadrático para todos os casos ensaiados.

<b>Caso</b>	<b>Raiz quadrada do EMQ (mm)</b>
Caso 1.0	2,66
Caso 1.1	1,58
Caso 1.2	1,22
Caso 1.3	5,44
Caso 2.0	0,78
Caso 2.1	1,25
Caso 2.2	1,13
Caso 3.0	2,37
Caso 3.1	2,24
Caso 3.2	2,02
Caso 4.0	7,86
Caso 4.1	6,03
Caso 4.2	7,18

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusão

Nesta pesquisa uma metodologia para o monitoramento do deslocamento de massa de solo utilizando sensores a rede de Bragg, essa metodologia foi desenvolvida e validada em testes laboratoriais.

A metodologia apresentada neste trabalho depende de um algoritmo para reconstrução de curvas bidimensionais, assim foi apresentado o desenvolvimento do algoritmo proposto, o qual se baseia nas equações de Frenet-Serret e utiliza o método de interpolação por *splines* cúbicas. Além disso, o algoritmo proposto depende da medição de curvatura através de sensores a rede de Bragg, foram apresentadas as equações necessárias para calcular a curvatura de um corpo em um dado ponto com os sensores ópticos. O método apresentado para o cálculo de curvatura não sofre influência da temperatura ambiente, pois tal método utiliza a medição diferencial de deformação, eliminando de maneira eficaz o efeito da temperatura.

O método para a reconstrução de curva em duas dimensões foi apresentado e o seu desempenho foi validado utilizando dados simulados de curva conhecidas e dados de curvas oriundas da instrumentação geotécnica por inclinômetros em campo. Para ambos os casos, o algoritmo apresentou uma reconstrução de curva adequada e satisfatória com as curvas originais. Para o caso das validações utilizando dados de instrumentação geotécnica, o erro absoluto máximo foi de 16,9 mm, enquanto a raiz quadrada do máximo valor encontrado para o EMQ foi de 12,2 mm.

Como parte deste trabalho, foi descrita toda a montagem experimental realizada com o intuito de simular um sistema de monitoramento contínuo para o monitoramento de deslocamentos horizontais de solo. Um tubo de PVC de 1,8 m de comprimento e 25 mm de diâmetro externo foi instrumentado com 30 sensores a rede de Bragg, divididos em dois cordões ópticos; deflexões foram provocadas ao tubo instrumentado a fim de simular o deslocamento de massa de solo em uma escala reduzida. Uma trena a laser, com exatidão de 1 mm, foi utilizada para medir o deslocamento provocado pelas deflexões ao tubo, de modo a servir como um sistema de medição de referência.

Um interrogador óptico estático, com multiplexação por WDM, foi utilizado para obter os sinais de todos os sensores ópticos. Grande parte dos sensores ópticos foram

calibrados em relação à variação de deformação, as constantes de sensibilidades médias medidas para os dois cordões ópticos foram de  $0,739 \mu\epsilon^{-1}$  e  $0,748 \mu\epsilon^{-1}$ .

Para todos os ensaios experimentais realizados foram gerados os gráficos do perfil de curvatura medido e interpolado, como também os perfis de deslocamento. Os valores máximos de curvatura medidos para cada ensaio variaram entre  $0,018 \text{ m}^{-1}$  e  $0,547 \text{ m}^{-1}$ . Uma análise de erros foi apresentada: o máximo erro absoluto encontrado entre todos os ensaios foi de 14,01 mm; o erro máximo relativo ao comprimento do tubo variou entre 0,16 % e 0,80 %; e o máximo valor da raiz quadrada do EMQ foi de 7,86 mm.

A metodologia proposta pode ser aplicada utilizando uma estrutura semelhante à estrutura utilizada atualmente para a instrumentação geotécnica por torpedos com inclinômetros. Todavia, a principal virtude é que esse sistema, potencialmente, necessitaria apenas de uma intervenção em campo para o comissionamento do sistema de monitoramento. Além disso, como o sistema baseia-se por sensores ópticos, as fibras ópticas poderiam ser lançadas no campo para transmitir os sinais do monitoramento de diversas regiões de interesse, ou seja, que receberiam um sistema para o monitoramento do deslocamento de solo. Uma sala de controle, contendo os equipamentos de aquisição óptica, poderia ser definida em uma região distante das áreas instrumentadas. Um sistema automático de alerta poderia ser implementado para continuamente monitorar, por exemplo, uma área de risco, como uma encosta próxima à uma comunidade ou uma barragem, e assim emitir alertas para as entidades pertinentes.

## 6.2 Trabalhos futuros

Cada um dos seguintes pontos abaixo poderia ser desenvolvido como parte de uma extensão do presente trabalho:

- Desenvolver o algoritmo proposto neste trabalho para o caso tridimensional;
- Projetar e construir um tubo, ou método similar, para ser instrumentado com 4 cordões ópticos ortogonais entre si e executar deflexões ao tubo considerando as três dimensões espaciais, aplicando o algoritmo desenvolvido, veja Figura 6.1;

- Realizar um projeto mecânico e implementar um tubo instrumentado em campo para o sistema de monitoramento proposto, ou seja, para uma situação real de monitoramento de deslocamento de solo;
- Realizar ensaios com variação de temperatura para definir a faixa de temperatura de operação do sistema de monitoramento, para definir os valores máximos e mínimos da temperatura ambiente no qual o sistema continua imune a variação de temperatura;
- Desenvolver um sistema de alerta automatizado baseando-se nos dados do sistema de monitoramento em campo, o qual enviaria um alerta ao serem atingidas condições extremas para o deslocamento de solo.

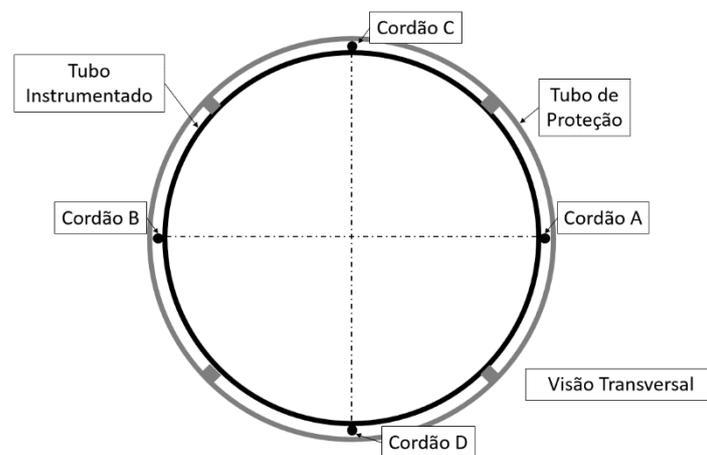


Figura 6.1 – Visão transversal para tubo instrumentado por 4 cabos ópticos e protegido por um tubo de proteção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PORTAL G1, **Barragem se Rompe, e Enxurrada de Lama Destrói Distrito de Mariana**, Disponível em: < <http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/barragem-de-rejeitos-se-rompe-em-distrito-de-mariana.html> > Acesso em: 08 Jan. 2018.
- [2] PORTAL G1, **Tragédia do Bumba completa 5 anos e ainda há famílias em risco no Rj**, Disponível em: < <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2015/04/tragedia-do-bumba-completa-5-anos-e-ainda-ha-familias-em-risco-no-rj.html> > Acesso em: 10 Jan. 2018.
- [3] BURAS, M., *Aplicação de Sensores Distribuídos de Fibras Óptica em um Modelo Experimental para Monitoramento de Movimentos de Massa*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Construção Civil/ Setor de Tecnologia/ UFPR, Curitiba, 2013.
- [4] MACHADO, W. G. F., *Monitoramento de Barragem de Contenção de Rejeitos da Mineração*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica/ USP, São Paulo, 2007.
- [5] FORMOSO, M. T., *Desenvolvimento de um Inclinômetro para Monitorar o Comportamento de Taludes Instáveis de Solos*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/ Escola de Engenharia/ UFRGS, Porto Alegre, 1999.
- [6] SCHULER, A. R., *Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduo Sólidos Urbanos Instrumentado*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/ Instituto Alberto Luiz Coimbra/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- [7] WERNECK, M. M., ALLIL, R. C. S. B., RIBEIRO, B. A., NAZARÉ, F. V. B., “**A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors**”, In: Intech Open, Capítulo 1, pp. 1-24, 2013.
- [8] DUNNICLIFF, J., **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. 1 ed., New York, Wiley-Interscience Publication, 1988.
- [9] WERNECK, M. M., Allil, R. C., Nazaré, F. V. B., **Fiber Bragg Gratings Theory, Fabrication, and Applications**. 1<sup>st</sup> ed., Bellingham, Washington, USA, SPIE Press, 2017.
- [10] MORIKAWA, S. R. K., *Acelerômetro Triaxial a Redes de Bragg*. Tese de D.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica/PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

- [11] HILL, K. O., MELTZ, G. "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview." **Journal of Lightwave Technology**, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, 1997.
- [12] OTHONOS, A., KALLI, K., "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", **Artech House Publishers**, Boston, 1999.
- [13] KASHYAP, R., **Fiber Bragg Gratings**. 1 ed., San Diego, Academic Press, 1999.
- [14] LINDNER, E., HARTUNG, A., HOH, D., *et al.*, "Trends and future of fiber Bragg grating sensing technologies: tailored draw tower gratings (DTGs)." In *SPIE Photonics Europe*, pp. 91410X-91410X, Brussels, 2014.
- [15] CHILDERS, B. A., FROGGATT, M. E., ALLISON, S. G., *et al.*, "Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure", In *SPIE 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, 2001.
- [16] MOREY, W. W., J. R. DUNPHY, AND G. MELTZ. "Multiplexing fiber Bragg grating sensors." **Fiber & Integrated Optics**, vol 10, no 4, pp 351-360, 1991.
- [17] VALENTE, L. G. V., SILVA, N. C. L., RIBEIRO, A. S., *et al.* "Técnicas de leitura para sensores a fibra óptica baseados em redes de Bragg." *Anais da 6<sup>a</sup> Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, Salvador, 2002.
- [18] TOSI, D., "Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors." **Sensors**, pp. 2368, 2017.
- [19] HARAMONI, N., *Sistema para interrogação de redes de Bragg utilizando laser EDF sintonizado mecanicamente*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em engenharia Elétrica e Informática Industrial, UTFPR, Curitiba, 2007.
- [20] OLIVEIRA, V., *Leitura de redes de Bragg por modulação ótica*. Tese de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em engenharia Elétrica e Informática Industrial, UTFPR, Curitiba, 2005.
- [21] BARROS, R. E. B. A., *Sistema de interrogação de redes de Bragg: primeiros passos na criação de um protótipo*. Tese de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

- [22] GONÇALVES, M. N., *Transformador de potencial óptico com divisor capacitivo para linhas de distribuição de 13,8 kV*. Tese de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [23] RIBEIRO, B. A., *Compensação de temperatura em um sensor óptico-elétrico para medidas de tensão em linhas de transmissão*. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [24] APOSTOL, T. M., **One-Variable Calculus with an Introduction to Linear Algebra**. 2 ed., Vol 1, John Wiley and Sons, 1967.
- [25] GRAY, A., **Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica®**. 3 ed., CRC Press, 2006.
- [26] DIEGUEZ, J. P. P., **Métodos de Cálculo Numérico**, 1 ed., Fundação Ricardo Franco, Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Militar de Engenharia, Coleção Disseminar, 2005.
- [27] BALDWIN, C. S., *Distributed sensing for flexible structures using a fiber optic sensor system*. Tese de D.Sc., Graduate School, University of Maryland, Maryland, USA, 2003.
- [28] MOORE, J.P., ROGGE, M. D., “Shape Sensing Using Multi-Core Fiber Optic Cable and Parametric Curve Solutions,” **Optics Express**, vol. 20, no. 3, 2012.
- [29] GLASER, R., CACCESE, V., SHAHINPOOR, M., “Shape Monitoring of a Beam Structure from Measured Strain or Curvature”, **Experimental Mechanics**, vol. 52, pp. 591-606, 2012.
- [30] XIAO, H., ZHANG, Y., SHEN, L., *et al.*, “Three dimensional curve reconstruction based on fiber Bragg grating sensors”, In *International Conference on Estimation, Detection and Information Fusion (ICEDIF)*, IEEE, 2015.
- [31] LIU, H., FARVARDIN, A., GRUPP, R., *et al.*, “Shape Tracking of a Dexterous Continuum Manipulator Utilizing Two Large Deflection Shape Sensors”, **IEEE Sensor Journal**, vol. 15, no. 10, pp. 5494-5503, 2015.
- [32] WANG, Z. F., WANG, J., SUI, Q. M., *et al.*, “In-Situ Calibrated Deformation Reconstruction Method for Fiber Bragg Grating Embedded Smart Geogrid”, **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 250, pp. 145-158, 2016.

- [33] ZHU, H. H., SHI, B., ZHANG, C. C., “FBG-Based Monitoring of Geohazards: Current Status and Trends”, **Sensors**, vol. 17, no. 3, 452, 2017.
- [34] WANG, Y. L., SHI, B., ZHANG, T. L., *et al.*, “Introduction to an FBG-based Inclinometer and its Application to Landslide Monitoring”, **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, vol. 5, no. 5, pp. 645-653, 2015.
- [35] 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**, vol. 35, no. 4, pp. 348-356, 2015.
- [36] MATHWORKS, “**Math. Graphics. Programming.**” Disponível em: < <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> > Acesso em: 10 Jan. 2018.
- [37] GEOPROJETOS, “**Geoprojetos Engenharia Ltda**”, Disponível em: < <http://www.geoprojetos.com> > Acesso em: 12 Jan. 2018.
- [38] DGSI, “**Duham Geo Slope Indicator**”, Disponível em: < <http://www.slopeindicator.com> > Acesso em: 12 Jan. 2018.
- [39] DGSI, “**Digitilt Classic Inclinometer System**”, Disponível em: < <http://www.slopeindicator.com/instruments/inclin-digitilt-classic.php> > Acesso em: 12 Jan. 2018.
- [40] MICRO OPTICS, “**Static Optical Sensing Interrogator sm125**”, Disponível em: < <http://www.micronoptics.com/product/static-optical-sensing-interrogator-sm125/> > Acesso em: 14 Jan. 2018.
- [41] FLUKE, “**Fluke 419 Laser Distance Meter**”, Disponível em: < <http://en-us.fluke.com/products/laser-distance-meters/fluke-419d-laser-distance-meter.html> > Acesso em: 14 Jan. 2018.
- [42] MITUTOYO, “**Paquímetro Analógico**”, Disponível em: < <http://www.mitutoyo.com.br/novosite/produtos/produtos/01small/paquimetroanalogico.html> > Acesso em: 16 Jan. 2018.
- [43] LOCTITE, “**Loctite 496**”, Disponível em: < <http://www.loctite.pt/loctite-5779.htm?nodeid=8802626371585> > Acesso em: 16 Jan. 2018.

## ANEXO A

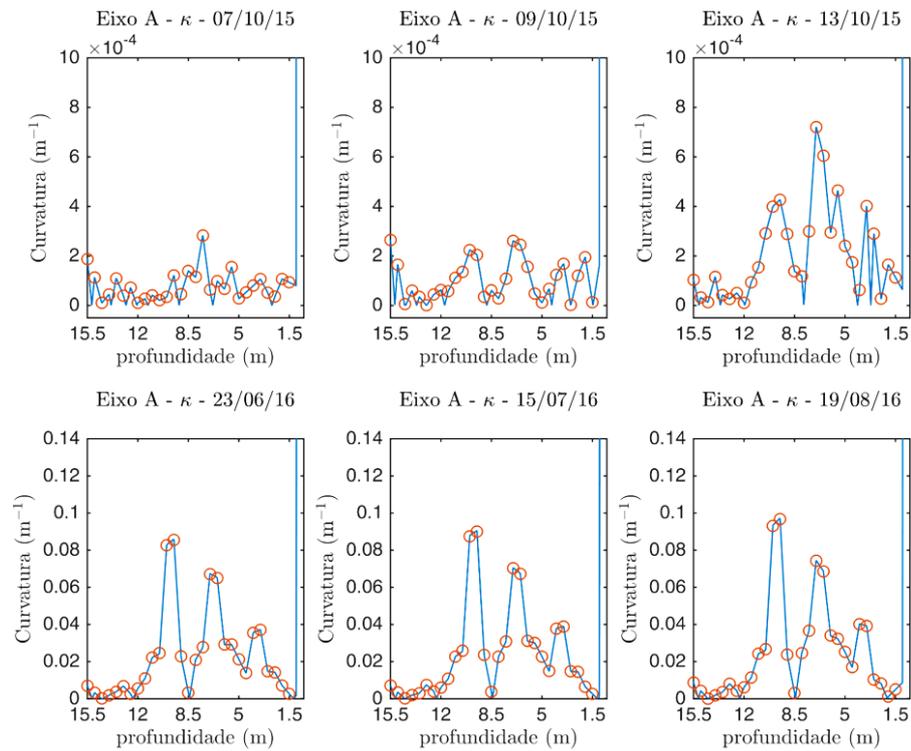


Figura A.1 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo A. Pontos marcadas escolhidos a cada 0,5 m

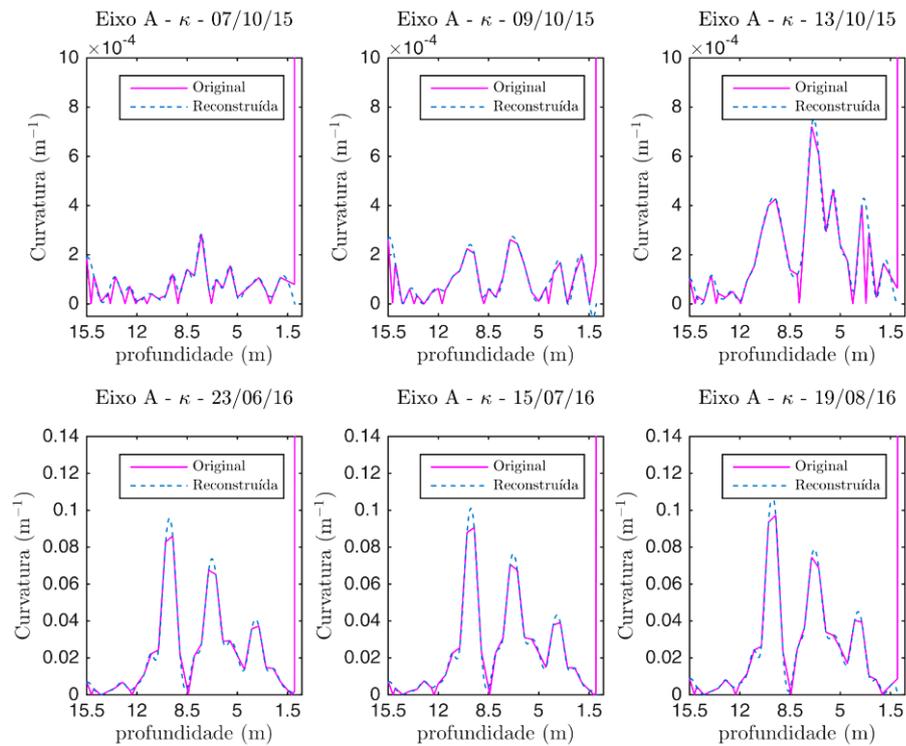


Figura A.2 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo A: comparação entre perfil calculado (Original) e perfil interpolado de curvatura (Reconstruída).

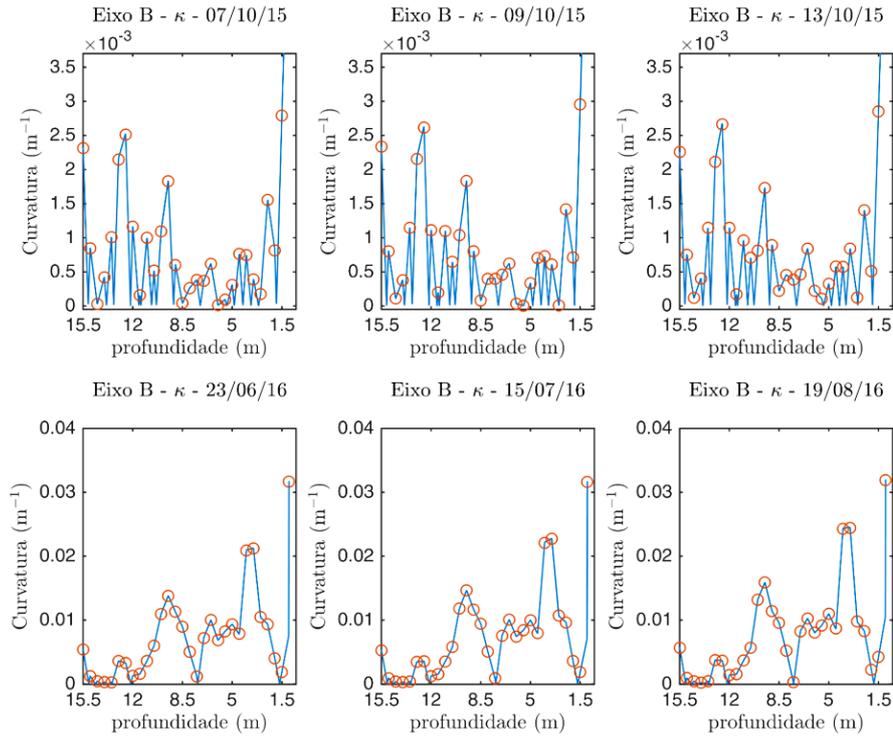


Figura A.3 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo B. Pontos marcadas escolhidos a cada 0,5 m

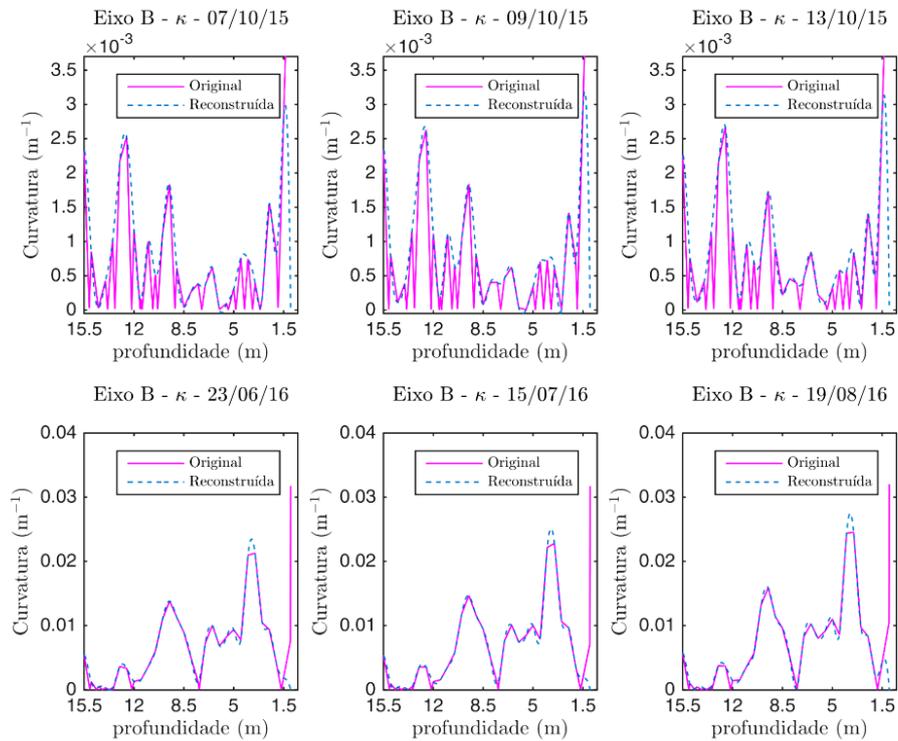


Figura A.4 – Perfis de curvatura relativo ao Eixo B: comparação entre perfil calculado (Original) e perfil interpolado de curvatura (Reconstruída).

Leituras Inclínômetros - Eixo A - Fase Inicial - 07/10/15

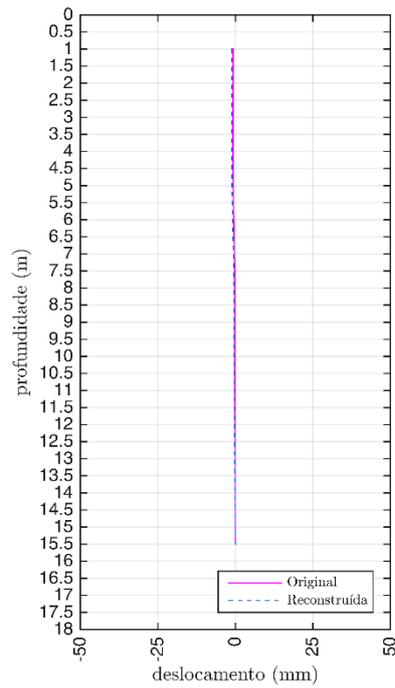


Figura A.5 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetro (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 07/10/2015.

Leituras Inclínômetros - Eixo A - Fase Inicial - 09/10/15

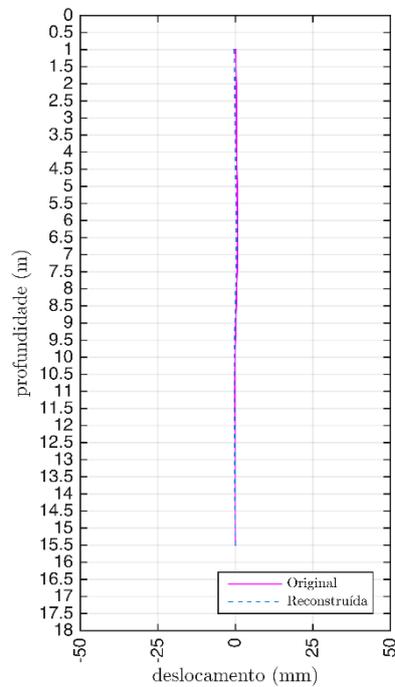


Figura A.6 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetro (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 09/10/2015.

Leituras Inclínômetros - Eixo A - Fase Inicial - 13/10/15

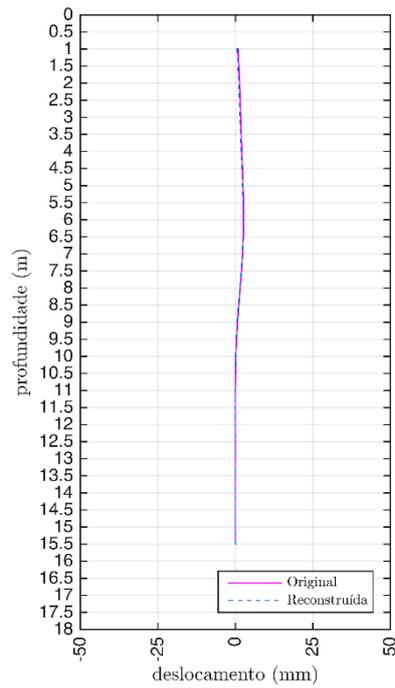


Figura A.7 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetro (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 13/10/2015.

Leituras Inclínômetros - Eixo A - Fase Final - 23/06/16

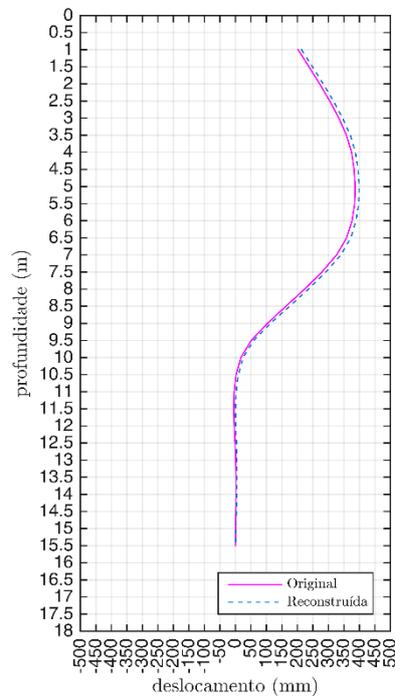


Figura A.8 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetro (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 23/06/2016.

Leituras Inclínômetros - Eixo A - Fase Final - 15/07/16

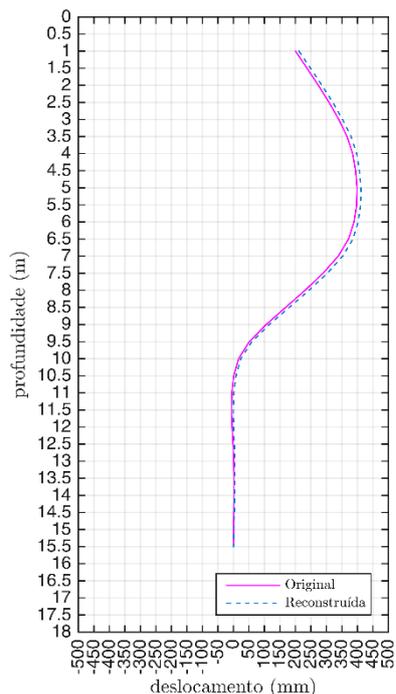


Figura A.9 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 15/07/2016.

Leituras Inclínômetros - Eixo A - Fase Final - 19/08/16

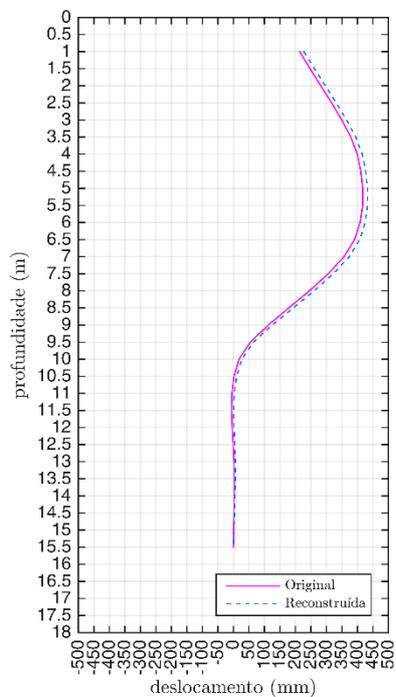


Figura A.10 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo A da campanha de medição do dia 19/08/2016.

Leituras Inclínômetros - Eixo B - Fase Inicial - 07/10/15

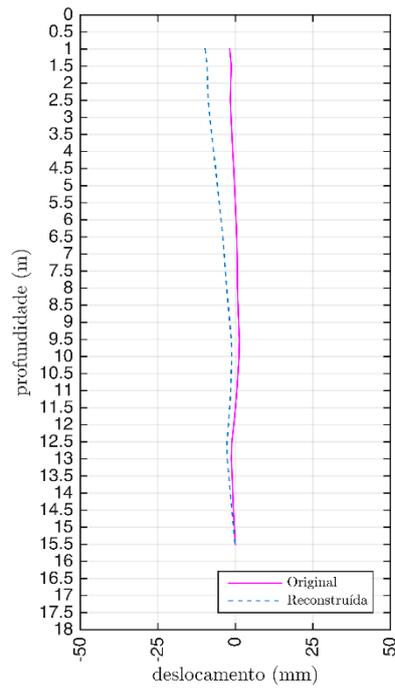


Figura A.11 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 07/10/2015.

Leituras Inclínômetros - Eixo B - Fase Inicial - 09/10/15

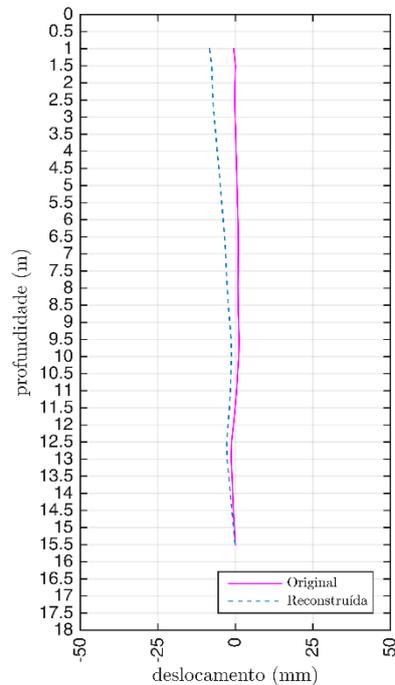


Figura A.12 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 09/10/2015.

Leituras Inclínômetros - Eixo B - Fase Inicial - 13/10/15

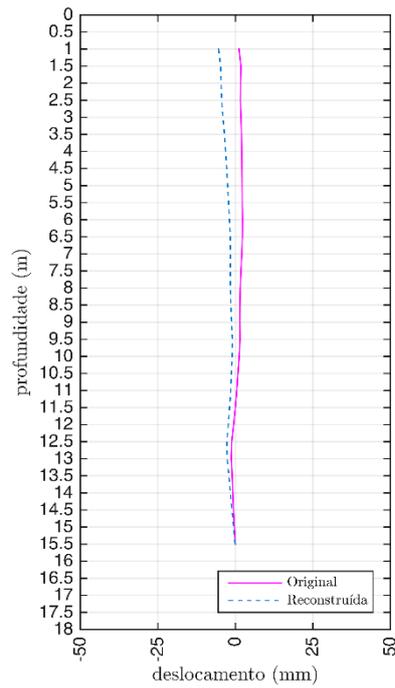


Figura A.13 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 13/10/2015.

Leituras Inclínômetros - Eixo B - Fase Final - 23/06/16

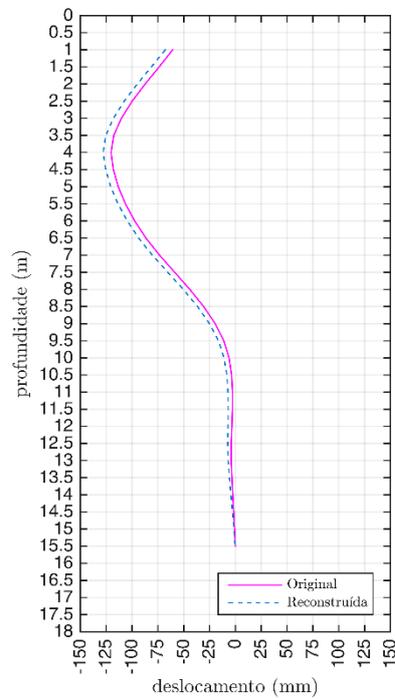


Figura A.14 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 23/06/2016.

Leituras Inclínômetros - Eixo B - Fase Final - 15/07/16

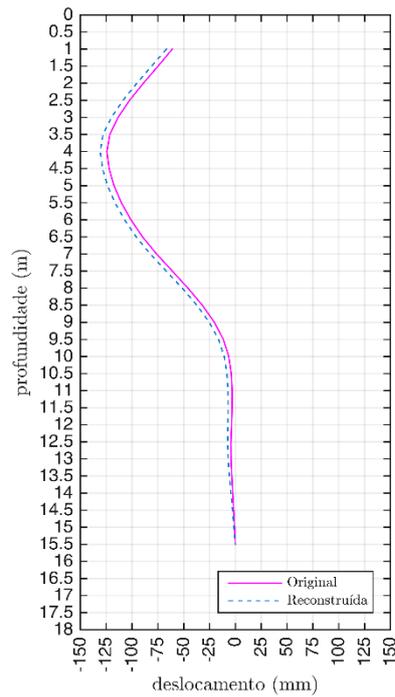


Figura A.15 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 15/07/2016.

Leituras Inclínômetros - Eixo B - Fase Final - 19/08/16

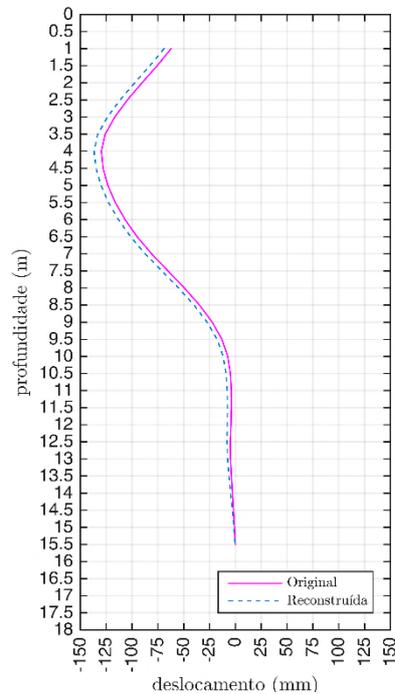


Figura A.16 – Comparação entre curva de deslocamento obtida pelo inclinômetros (Original) e a curva reconstruída pelo algoritmo proposto (Reconstruída) para o Eixo B da campanha de medição do dia 19/08/2016.

## ANEXO B

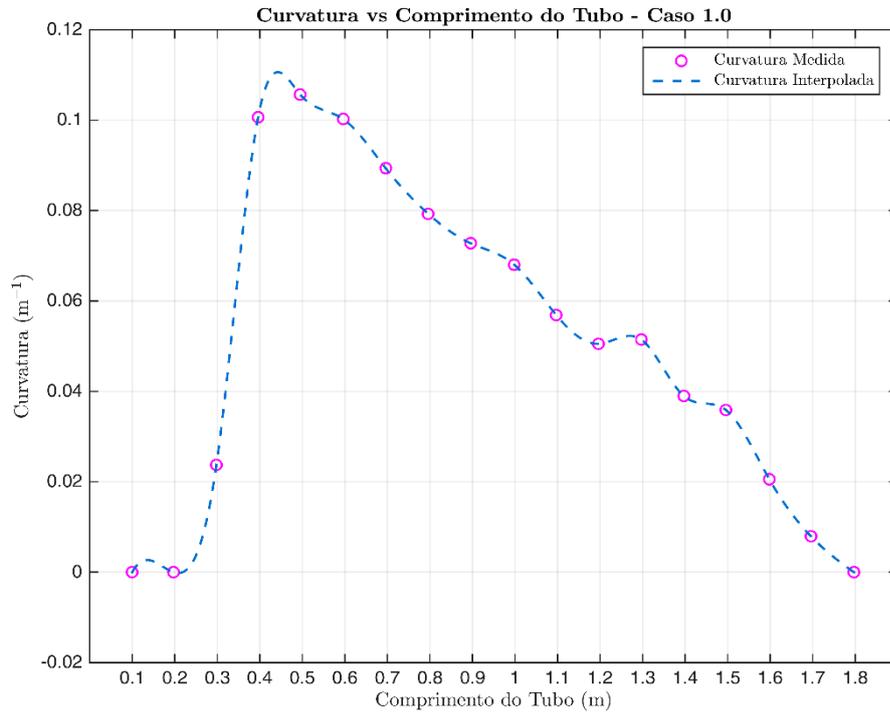


Figura B.1 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.0.

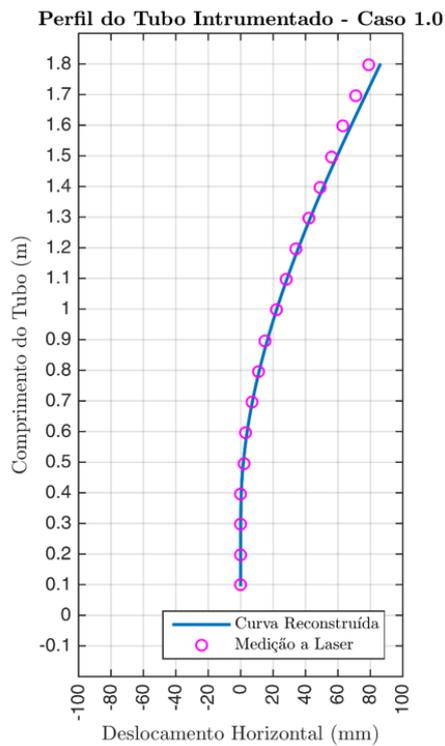


Figura B.2 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.0.

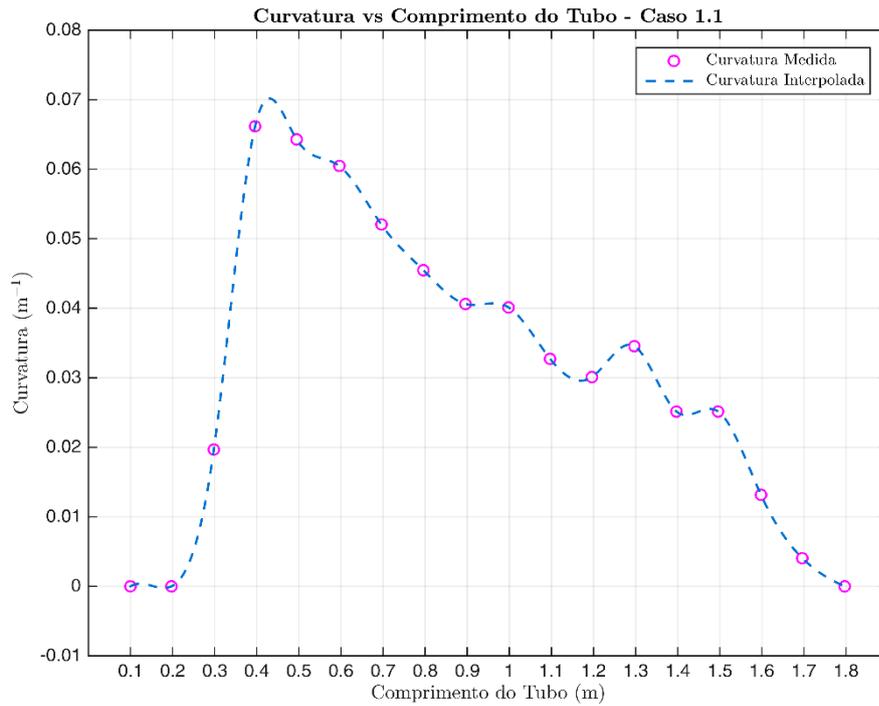


Figura B.3 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.1.

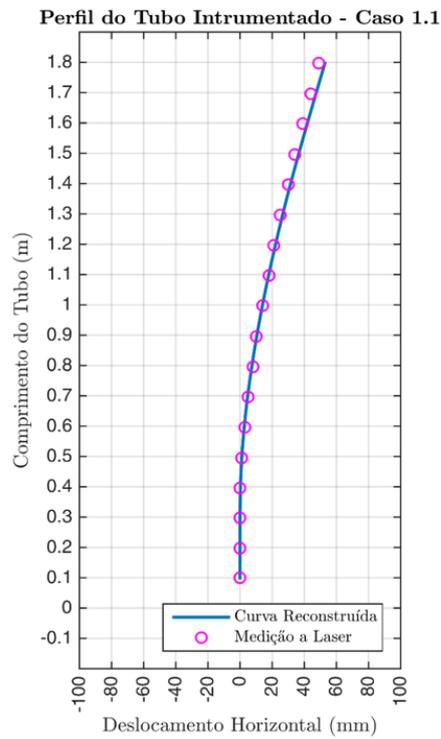


Figura B.4 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.1.

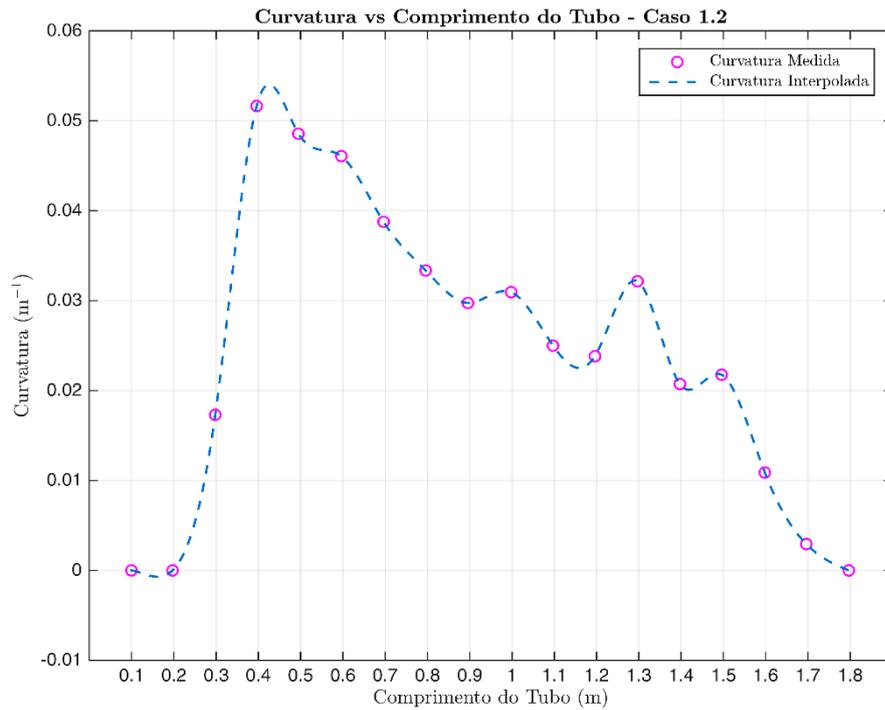


Figura B.5 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.2.

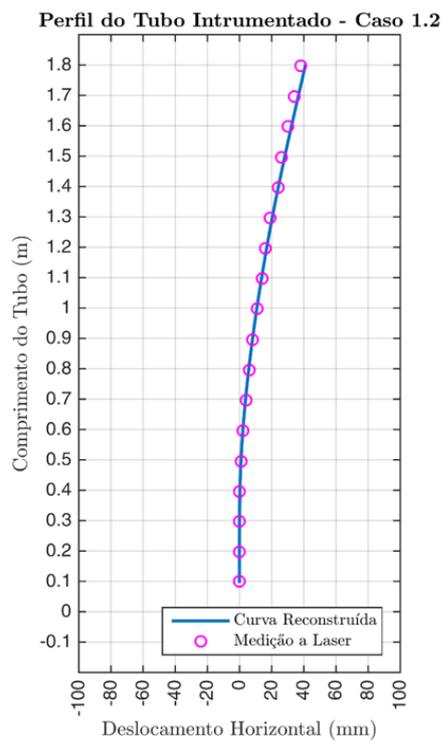


Figura B.6 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.2.

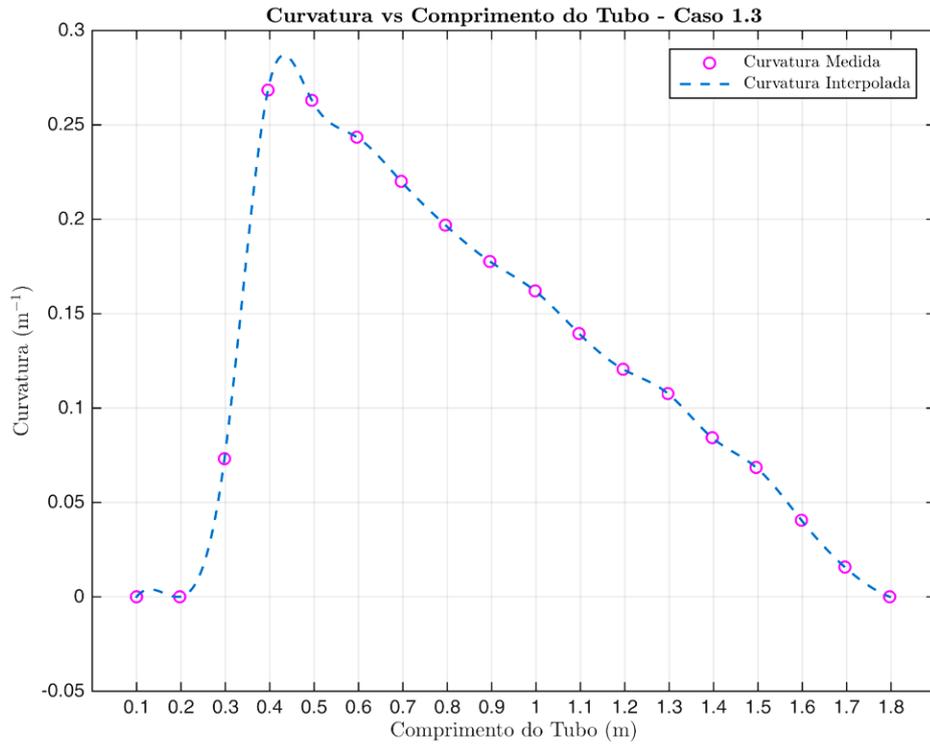


Figura B.7 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 1.3.

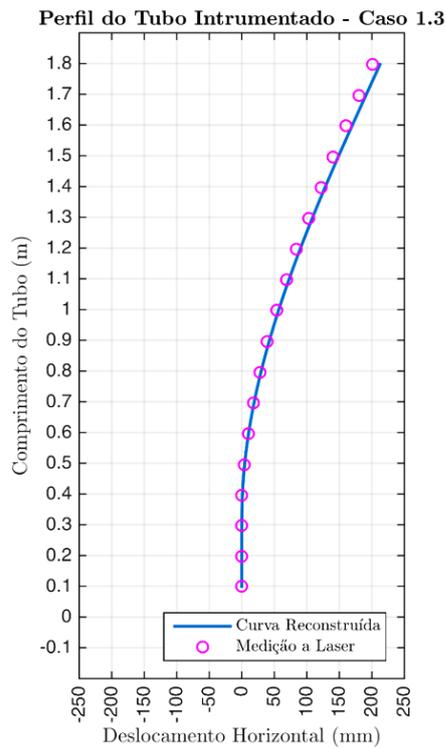


Figura B.8 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 1.3.

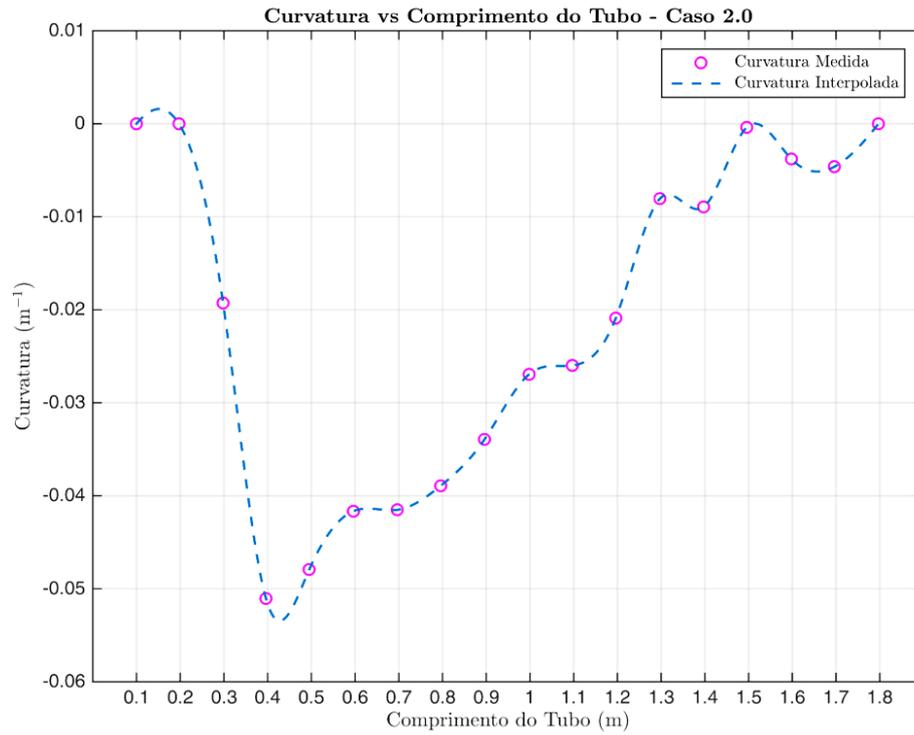


Figura B.9 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.0.

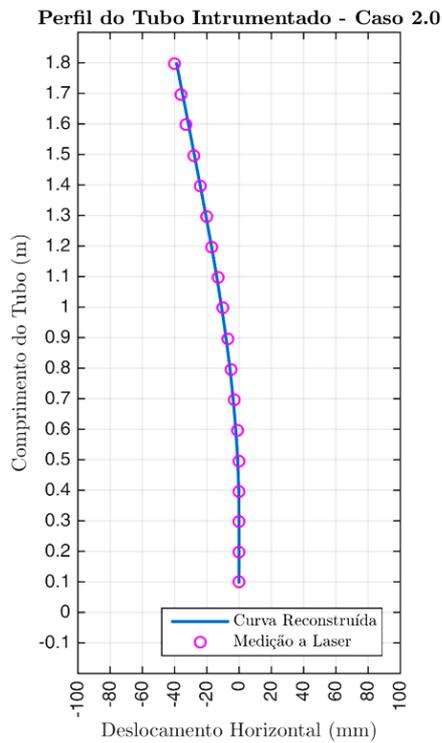


Figura B.10 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.0.

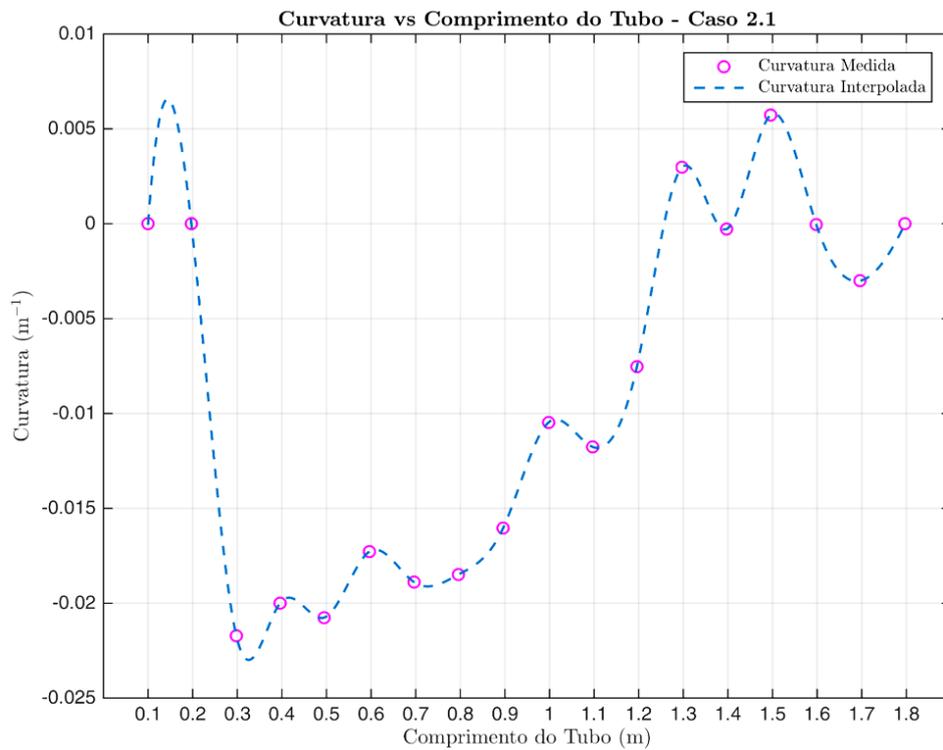


Figura B.11 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.1.

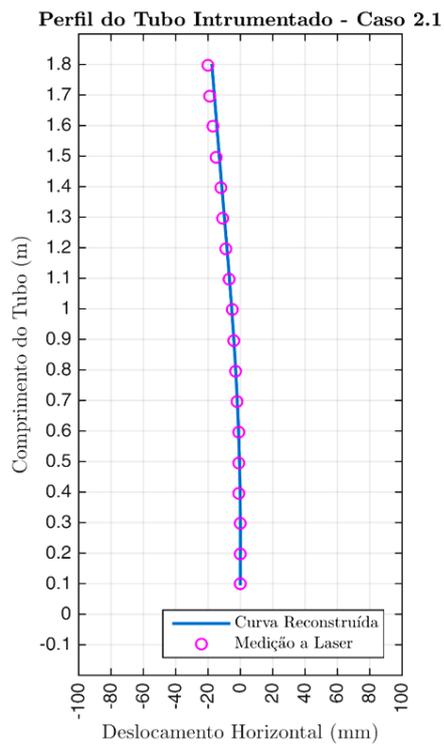


Figura B.12 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.1.

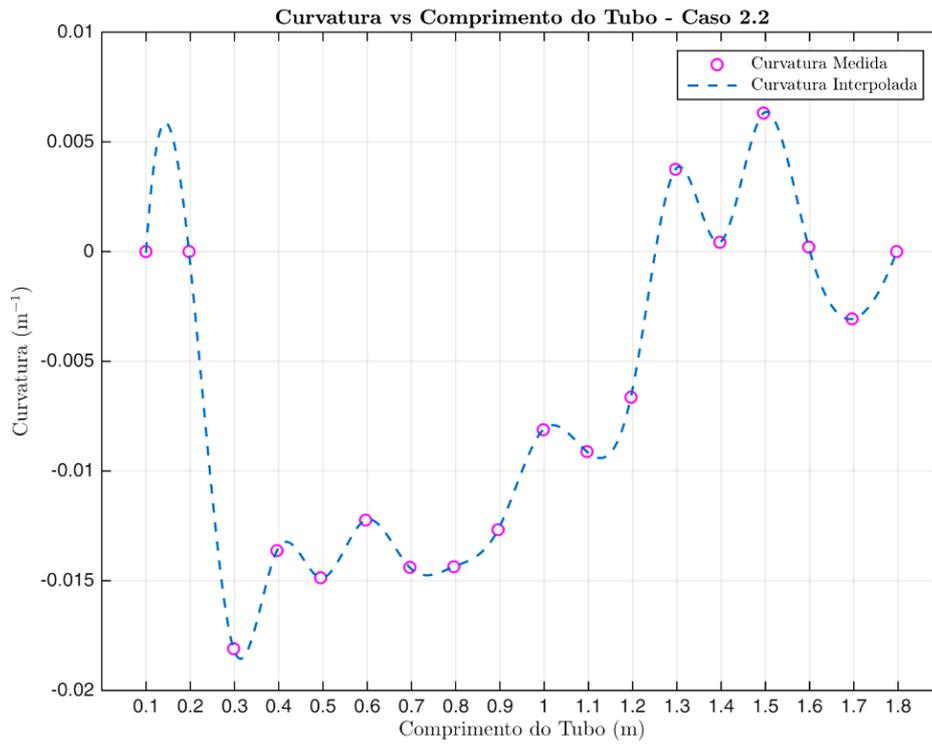


Figura B.13 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 2.2.

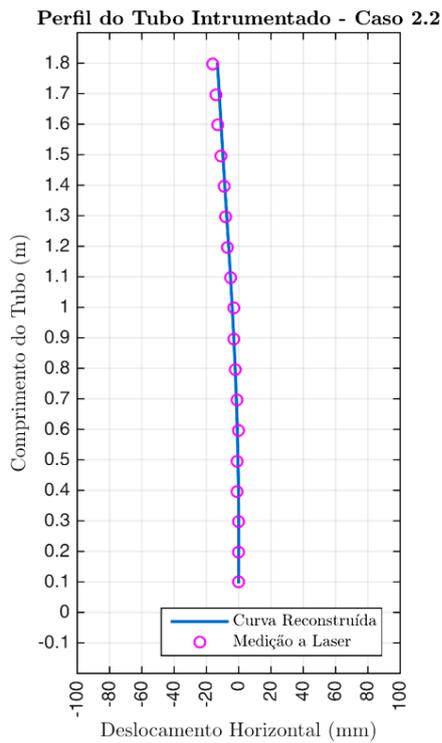


Figura B.14 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 2.2.

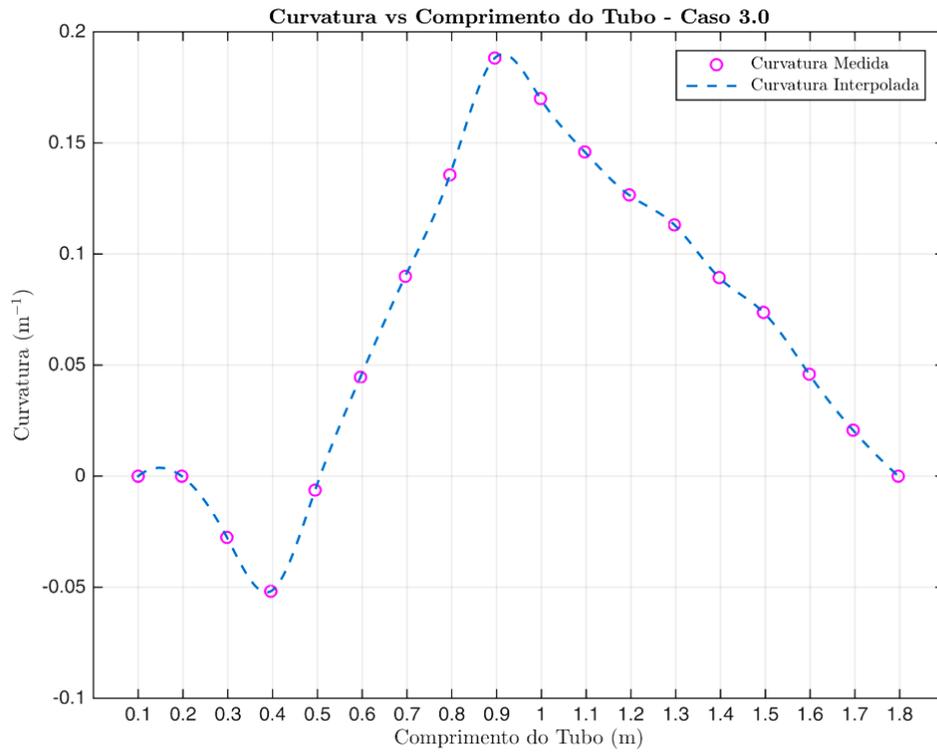


Figura B.15 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 3.0.

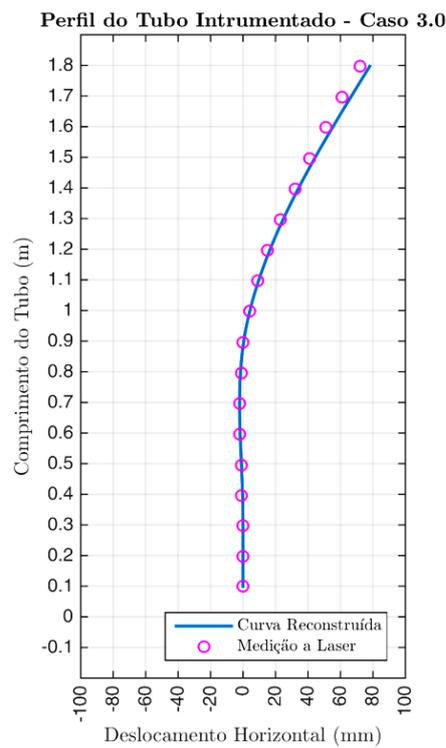


Figura B.16 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.0.

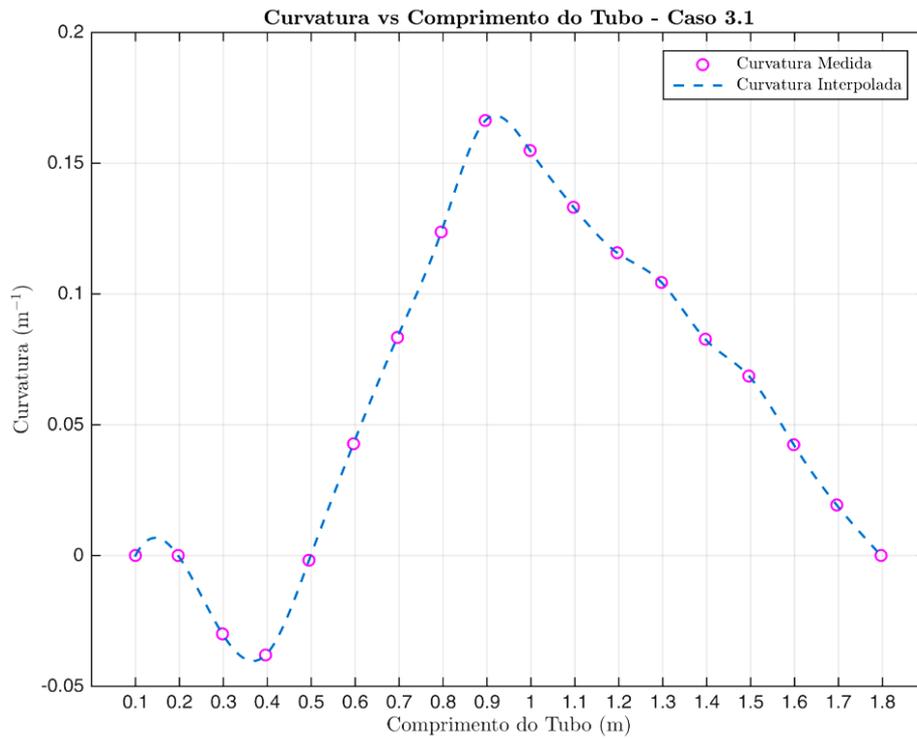


Figura B.17 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 3.1.

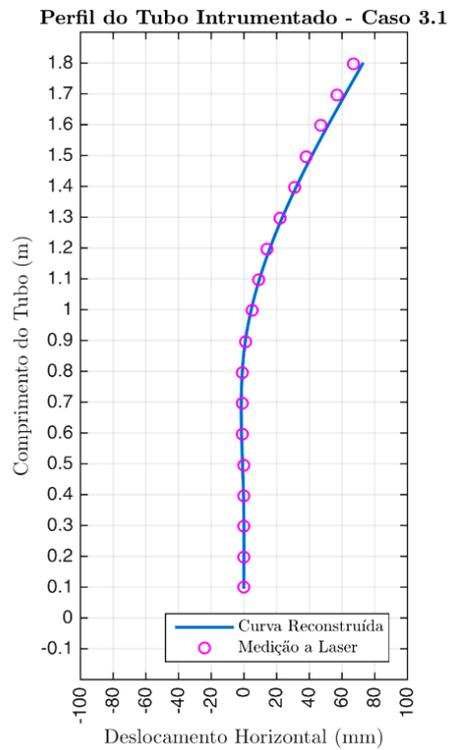


Figura B.18 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.1.

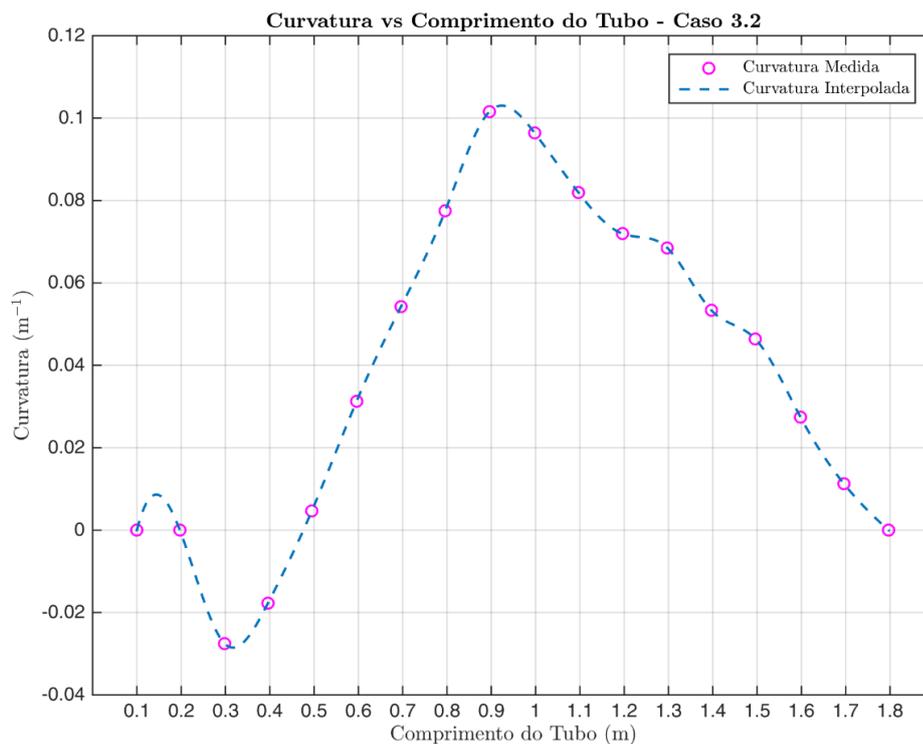


Figura B.19 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 3.2.

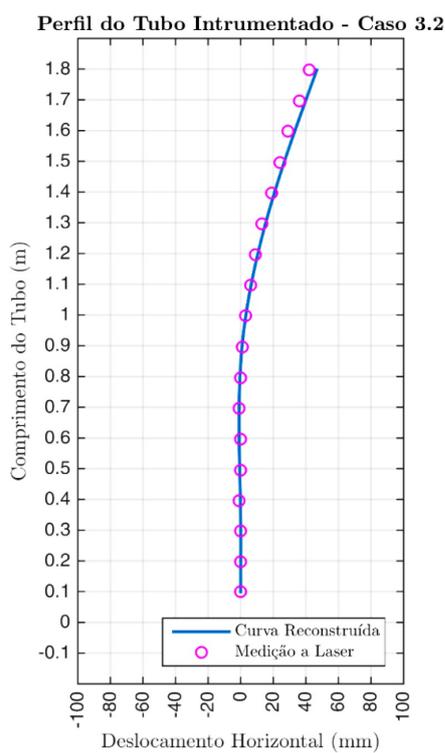


Figura B.20 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 3.2.

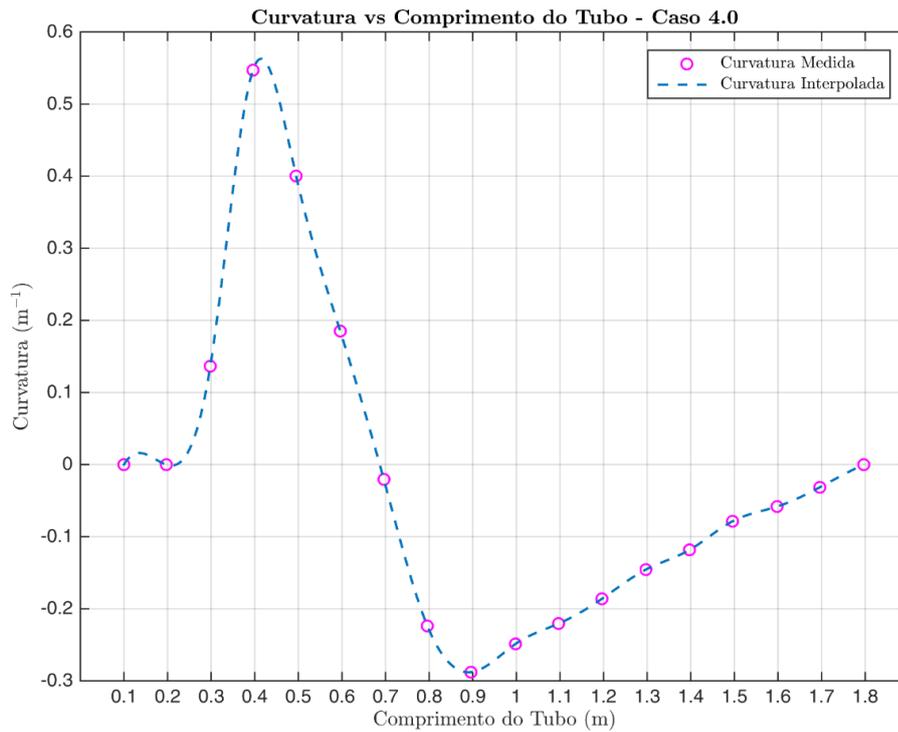


Figura B.21 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.0.

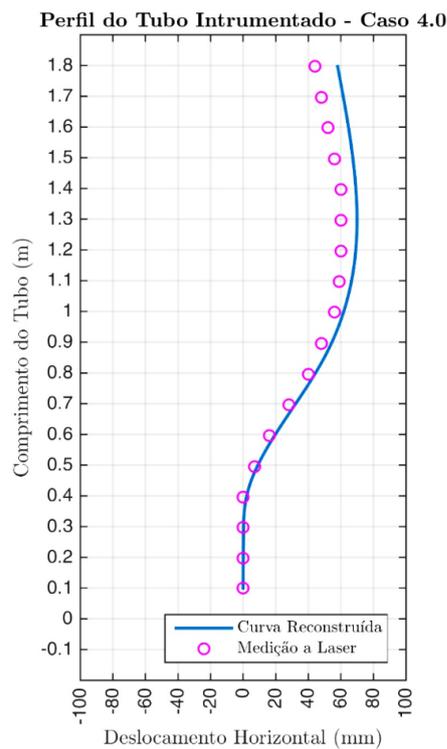


Figura B.22 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.0.

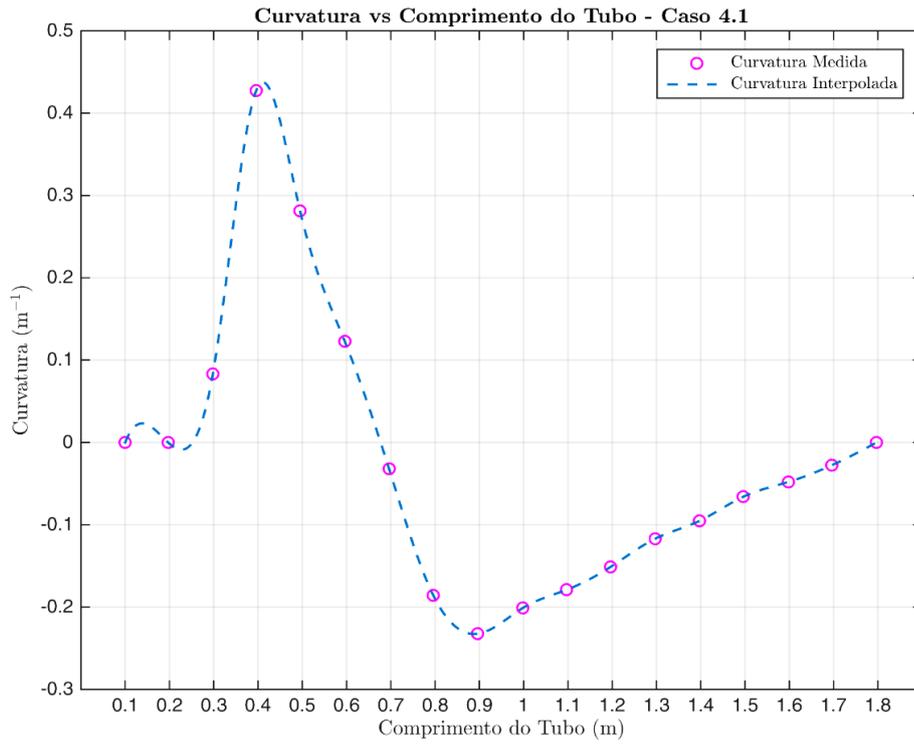


Figura B.23 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.1.

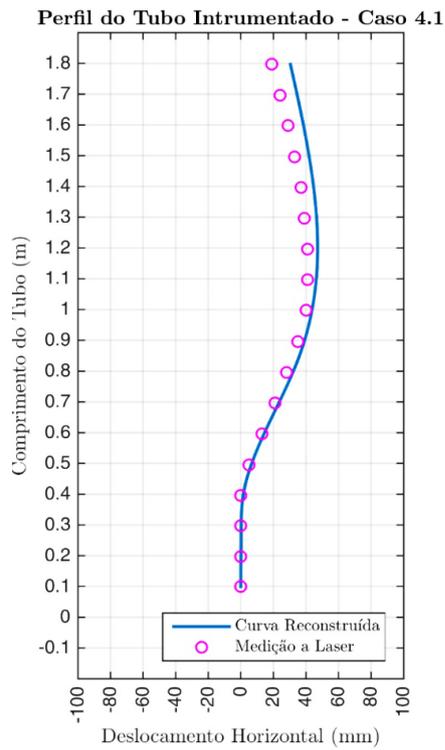


Figura B.24 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.1.

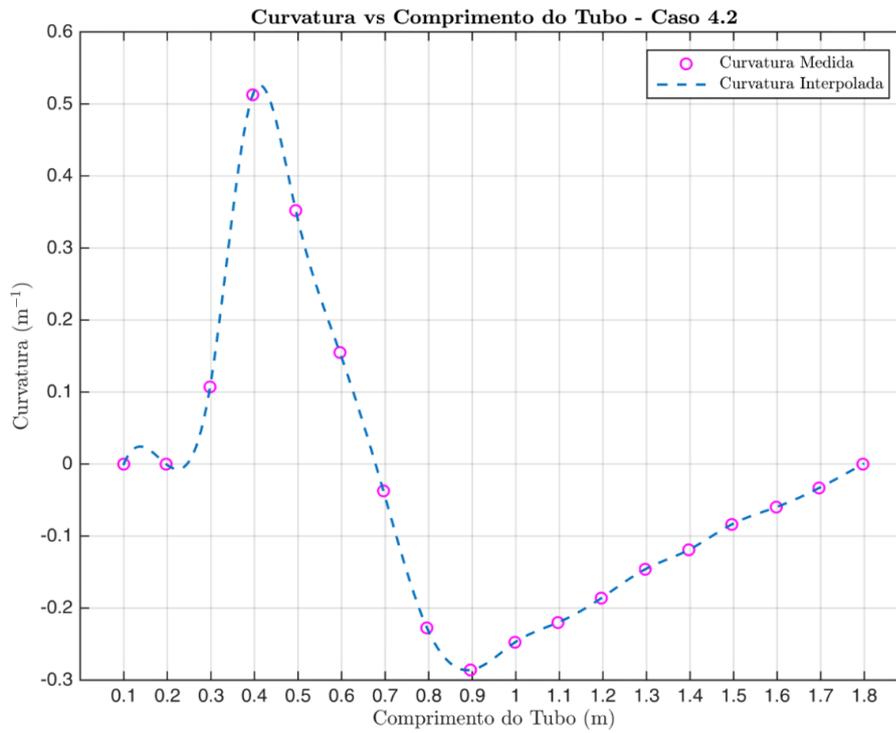


Figura B.25 – Curvatura medida e perfil de curvatura interpolado para o Caso 4.2.

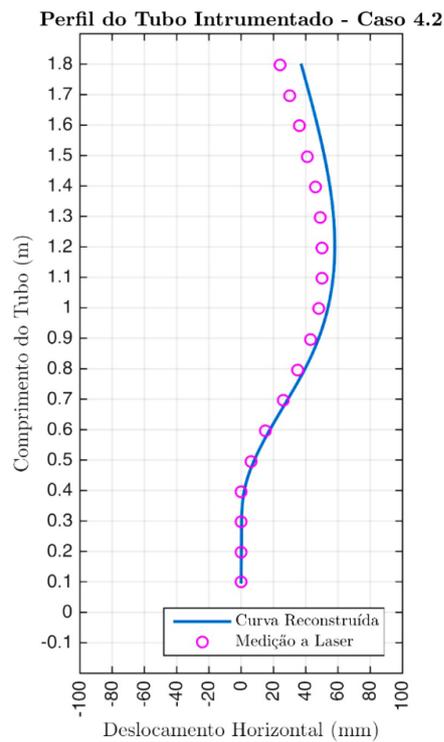


Figura B.26 – Comparação entre o perfil reconstruído do tubo e a medição do deslocamento com laser para o Caso 4.2.