



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

RODRIGO SIQUEIRA PENZ

**Desenvolvimento de um Inclinômetro com
Tecnologia MEMS aplicado ao Monitoramento de
Obras Geotécnicas**

PASSO FUNDO

2013

RODRIGO SIQUEIRA PENZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM INCLINÔMETRO
COM TECNOLOGIA MEMS APLICADO AO
MONITORAMENTO DE OBRAS GEOTÉCNICAS**

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Luís Toazza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia.

Passo Fundo

2013

RODRIGO SIQUEIRA PENZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM INCLINÔMETRO
COM TECNOLOGIA MEMS APLICADO AO
MONITORAMENTO DE OBRAS GEOTÉCNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de aprovação: 07 de janeiro de 2014.

Professor Doutor Francisco Dalla Rosa
Orientador

Professor Doutor Adriano Luís Toazza
Coorientador

Professor Doutor Fernando Schnaid
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Professor Doutor Pedro Domingos Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Márcio Felipe Floss
Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2013

AGRADECIMENTOS

Ao orientador professor Dr. Francisco Dalla Rosa, pela oportunidade de trabalho e convívio, além de sua paciência, apoio e conhecimentos repassados durante o desenvolvimento da dissertação;

Ao amigo e coorientador professor Dr. Adriano Luís Toazza, pela dedicação do seu tempo e a contribuição de conhecimento ao trabalho;

A minha esposa Viviane e minhas filhas Carolina e Rafaela, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo amor, carinho e incentivo recebido;

A meu pai Erci e minha mãe Maria de Lourdes, pela educação, formação e apoio que sempre recebi;

Aos meus alunos William Corso e Gabriel Balbinot, pela contribuição dada ao trabalho;

Aos meus amigos que sempre foram uma fonte de incentivo para a conclusão deste trabalho;

Ao corpo de professores do Departamento de Engenharia Elétrica, ao Núcleo de Eletrônica e ao Núcleo de Tecnologia Mecânica, pelas trocas de informações e auxílios prestados;

Ao Doutorando Vitor Faoro, pelo apoio, pelas trocas de informações e pelas disponibilizações de resultados de seu ensaio, que muito contribuíram com o trabalho.

*Dedico este trabalho a minha esposa,
minhas filhas, meus pais, amigos e colegas,
que souberam entender a verdadeira
importância deste trabalho.*

Nós almejamos por novas sensações, mas logo tornamos indiferentes a ela. As maravilhas de ontem são coisas comuns hoje em dia.

Nikola Tesla.

RESUMO

O inclinômetro é um instrumento que realiza as medições das angulações relativas à vertical gravitacional ao longo da coluna montante de um talude, fundações e contenções, a fim de verificar a existência de movimentos transversais, comparando valores de medições em períodos diferentes. Este trabalho realiza estudos e desenvolvimentos que contribuem com a evolução dos inclinômetros utilizados em obras geotécnicas, sendo neste trabalho denominado de SADi (Sistema de Aquisição de Dados de Inclinação). O SADi apresenta inicialmente na sua sonda um circuito elétrico de medição de inclinação baseado em tecnologia MEMS (*Microelectromechanical System* - Sistema Micro Eletromecânico), que efetua medições instantâneas em dois sentidos ortogonais entre si e ortogonais em relação ao corpo da sonda. Ainda, a sonda apresenta uma redução na distância entre os seus rodízios guias comparativamente às sondas atuais, propiciando desta forma um maior número de intervalos de medições, sem perder a característica de operar nos tubos guias padrões. O SADi também apresenta a inovação da medição da profundidade da sonda, de uma forma automática e sincronizada com as medições de inclinação dos dois sentidos de eixo. Como interface de usuário o SADi utiliza um computador pessoal (PC), *notebook, tablet ou Windows phone*, que auxiliado por um programa realiza a indicação da inclinação instantânea na sua tela, bem como o armazenamento dos dados das medições em um arquivo “.CSV”. No SADi os envios dos dados para o PC, que são oriundos da sonda e do sistema de medição de profundidade, ocorrem através de comunicação sem fio. São apresentados neste trabalho os resultados, ensaios, calibrações e validação do SADi.

Palavras-chave: Inclinômetro. Acelerômetro MEMS. Estabilidade de Taludes. Deslizamentos de solo.

ABSTRACT

The inclinometer is a device that makes the measurements of angulations regarding the gravitational vertical along the amount column of a slope, in order to check the existence of transversal movements, comparing values of measurements in different periods. This work performs studies and developments which contribute to the evolution of the inclinometers used in geotechnical tasks, and in this work it is denominated SADi (Inclination Data Acquisition System). SADi initially presents in its probe an electric circuit of inclination measurements based on MEMS technology (Microelectromechanical System), which makes instant measurements in two orthogonal directions in relation to each other and in relation to the probe body. Yet, the probe presents a decrease in the distance among its guide casters, providing this way a higher number of measurement intervals, without losing the characteristic of operating in the standard guide tube. SADi also presents the innovation in the measurement of the depth of the probe, in an automatic and synchronized way with the inclination measurements of the two directions of the axis. As user interface SADi uses a personal computer (PC), notebook, tablet or windows phone, which helped by a program makes the indication of the instant inclination on its screen, as well as the storage of the measurements data in the "CSV" file. In SADi the mailing of data which come from the probe and from the depth measurement system to the PC happens through wireless communication. The results, testing, calibration and validation of SADi are presented in this paper.

Keywords: Inclinometer. MEMS Accelerometer. Slopes Stability. Landslide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caracterização de um talude	22
Figura 2. Escorregamento de um talude	23
Figura 3. Ponto de monitoramento de inclinômetro em ponte rodoviária	28
Figura 4. Resultado gráfico de uma medição com inclinômetro em uma rodovia	29
Figura 5. Projeto original de Da Vinci	31
Figura 6. Inclinômetro de esfera	32
Figura 7. Lei de Hooke	33
Figura 8. Forma esquemática de um transdutor LVDT	35
Figura 9. Extensômetro de lâmina (<i>Strain gage</i>)	37
Figura 10. Disposição esquemática de um Extensômetro de corda vibrante	37
Figura 11. Inclinômetro baseado em acelerômetro de variação resistiva	38
Figura 12. Visualização esquemática dos blocos internos de um microssistema	40
Figura 13. Dispositivo mecânico montado com tecnologia MEMS	42
Figura 14. Vista de um tubo guia instalado em uma obra de aterro	45
Figura 15. Tubo guia de quatro ranhuras com sua parte superior concretada	47
Figura 16. Sonda ou torpedo de um inclinômetro	48
Figura 17. Interface de um inclinômetro	49
Figura 18. Cabo elétrico acondicionado em rolo	50
Figura 19. Visualização esquemática da instalação do sistema de medição de inclinação	51
Figura 20. Componentes formadas para a medição do ângulo pela sonda	54
Figura 21. Medições acumuladas pelo inclinômetro	55
Figura 22. Direções das medições do SCA100T-D02	60
Figura 23. Comparação entre sondas na excursão por curvas de pequenos raios	63
Figura 24. Projeto do rodízio	64
Figura 25. Vista interna da sonda com a instalação do SCA100T-D02	64
Figura 26. Vista esquemática da parte superior do corpo da sonda	65
Figura 27. Peças em aço inox já usinadas que formam a sonda do SADI	67
Figura 28. Aspecto final da sonda do SADI	68

Figura 29. Diagrama de blocos da operação da placa FDC	69
Figura 30. Aspecto da interface de usuário (IHM) para o PC	70
Figura 31. Janela para configurar o arquivo destino dos dados das medições	71
Figura 32. Arquivo das medições do SADi aberto em uma planilha eletrônica	72
Figura 33. Definições para o sentido de medição da sonda do SADi	72
Figura 34. O sistema de medição de profundidade com vista frontal	75
Figura 35. O sistema de medição de profundidade com vista traseira	75
Figura 36. Reconhecimento do sentido de movimento do encoder	76
Figura 37. Diagrama de blocos da operação da placa FCP	77
Figura 38. Rolo suporte do cabo elétrico	78
Figura 39. Placas eletrônicas e bateria do SADi	79
Figura 40. Suporte utilizado para calibração do SADi	81
Figura 41. Mesa tridimensional utilizada para calibração	81
Figura 42. Ajuste de alinhamento entre SAC100T-D02 e corpo da sonda	82
Figura 43. Gráfico do erro de linearidade do eixo direto positivo	83
Figura 44. Ensaio experimental com o SAC100T-D02 na mesa tridimensional	88
Figura 45. Interface gráfica construída para o ensaio experimental	89
Figura 46. Ponto de ensaio em campo	90
Figura 47. Sonda de referência para o ensaio prático	91
Figura 48. Circuito elétrico de um filtro passa-baixa de segunda ordem	93
Figura 49. Resposta do Filtro passa baixa implementado no programa	95
Figura 50. Arquivo gerado pelo SADi	97
Figura 51. O arquivo gerado pelo SADi modificado na planilha eletrônica	98
Figura 52. Gráfico dos ensaios comparativos em eixo direto	100
Figura 53. Gráfico dos ensaios comparativos em eixo transversal	102
Figura 54. Primeiro ensaio de repetição para o SADi em eixo direto	104
Figura 55. Segundo ensaio de repetição para o SADi em eixo direto	104
Figura 56. Primeiro ensaio de repetição para o SADi em eixo transversal	105
Figura 57. Segundo ensaio de repetição para o SADi em eixo transversal	106
Figura 58. Visualização gráfica das respostas dos filtros passa baixa	108
Figura 59. Visualização gráfica das medições com o filtro modificado	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Lista de materiais para construção da sonda do SADi.	67
Tabela 2. Equações para os erros de linearidade dos eixos do SADi.	84
Tabela 3. Ensaio de verificação da calibração do SADi eixo direto positivo.	85
Tabela 4. Ensaio de verificação da calibração do SADi eixo transversal positivo.	86
Tabela 5. Erros percentuais encontrados no SADi após ensaio.	87
Tabela 6. Resultados das medições comparativas obtidas em eixo direto.	99
Tabela 7. Resultados das medições comparativas obtidas em eixo transversal.	101
Tabela 8. Valores das medições do SADi com alteração no filtro passa baixa	109

SIGLAS

MEMS - Microelectromechanical Systems

GPS - Global Positioning System

CI - Circuito Integrado

SADi - Sistema de Aquisição de Dados de Inclinação

IHM - Interface Homem Máquina

GIS – Sistema de informação geográfica

SPI - Serial Peripheral Interface

RSU - Resíduos Sólidos Urbano

PC - Personal Computer

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno

LVDT - Linear Variable Differential Transformer

MOEMS - Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems

MST - Microsystems Technology

A/D - Conversor Analógico/Digital

D/A - Conversor Digital/Analógico

RF - Radio Frequência

LSB - Least Significant Bit

CSB - Chip Select

DIP - Dual-in-line Package

UPF - Universidade de Passo Fundo

UTD - Unidade de Transmissão de Dados

USART - Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

USB - Universal Serial Bus

CMPP - Centro de Mecânica de Precisão do Planalto

RAM - Random Access Memory

SÍMBOLOS

F - força;

K - constante dos materiais elástico lineares;

x - deslocamento linear;

a - aceleração;

C - capacitância;

ϵ - permissividade do meio dielétrico;

S - área das placas do capacitor;

D - distância de isolamento entre as placas do capacitor;

N - número de placas do capacitor;

V_{out} - tensão de saída;

C_b - combinações binárias;

N_b - número de bits;

B_{out} - número de bits LSB;

V_{offset} - tensão para o ângulo zero;

B_{offset} - número de bit para ângulo zero;

T - temperatura;

B_{temp} - contagem das combinações binárias;

D - deslocamento horizontal;

L - distância entre os rodízios;

F_i - ângulo medido pelo inclinômetro;

DT - deslocamento total;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Iniciais	15
1.2 Justificativa	17
1.3 Objetivo	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 Estrutura da Dissertação	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Introdução	20
2.2 Formações e caracterizações dos taludes	21
2.3 Monitoramento de taludes através do inclinômetro	26
2.4 O que é o inclinômetro	31
2.5 Acelerômetros	33
2.6 Acelerômetros MEMS	39
2.7 Componentes e tecnologias de um inclinômetro	44
2.8 Características dos inclinômetros comerciais	52
2.9 Uso do inclinômetro na determinação de movimentos transversais	53
2.10 Revisão de erros	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 Tipo da pesquisa	58
3.2 Método da pesquisa	58
4 DESENVOLVIMENTO DO SADI	59
4.1 Definições construtivas do SADI	59
4.1.1 Sonda	59
4.1.2 Interface homem-máquina (IHM)	68
4.1.3 Cabo elétrico	73
4.1.4 Placas eletrônicas	78
4.1.5 Calibração do SADI	80

4.2 Montagem experimental do SCA100T-D02	87
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	90
5.1 Procedimentos dos ensaios	90
5.2 Introdução	92
5.3 Apresentação dos resultados do SADi	96
5.4 Ensaio comparativo entre o inclinômetro de referência e o SADi	98
5.5 Ensaio de repetição com o SADi em eixo direto da sonda	103
5.6 Ensaio de repetição com o SADi em eixo transversal da sonda	105
5.7 Ensaio do sistema de medição de profundidade	106
5.8 Ensaio com alteração na resposta do filtro passa baixa	107
6 CONCLUSÃO	111
6.1 Conclusões	111
6.2 Sugestões de continuidade	113
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXO 1 - Desenho mecânico da sonda do SADi	119
ANEXO 2 - Primeiro ensaio de repetição no eixo direto do SADi.	120
ANEXO 3 - Segundo ensaio de repetição no eixo direto do SADi.	122
ANEXO 4 - Primeiro ensaio de repetição no eixo transversal do SADi	124
ANEXO 5 - Segundo ensaio de repetição no eixo transversal do SADi	126
ADENDO 1 – Depósito da Patente	128

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A infraestrutura civil é condição básica para o desenvolvimento humano, trazendo consigo emprego, renda, qualidade de vida e de transporte, melhoria na educação, entre outras condições. Por outro lado, a construção de infraestruturas cinzas, que são as obras edificadas, acabam por causar modificações no meio ambiente, que podem recorrer a situações danosas como enchentes, deslizamentos, e outras situações de risco (HERZOG, 2010). Embora existam maneiras para minimizar os efeitos indesejados causados pelas construções das infraestruturas, nenhuma maneira elimina por completo um efeito.

Uma das maneiras de tratar as condições da infraestrutura é o seu gerenciamento. O gerenciamento é baseado em informações de medições, em valores calculados e dados provenientes de informações históricas. O conjunto destas informações, aliado às experiências de profissionais, acabam por definir as características particulares dos sistemas de infraestrutura. Uma das áreas de ocorrência do gerenciamento da infraestrutura são as obras geotécnicas, onde um dos fatores utilizados para o gerenciamento é o monitoramento do comportamento da estabilidade das formações de taludes. Os taludes estão presentes nas mais diversas obras de infraestrutura e devido a seu potencial risco de ocorrência de deslizamentos, os taludes são monitorados de uma forma cíclica temporal, que varia de acordo com a sua característica e com o seu potencial de risco (FONSECA, 2003).

Estudos sobre comportamento e monitoramento de taludes são pontos específicos do gerenciamento da infraestrutura. Os monitoramentos e as medições dos movimentos dos taludes, especificamente nas medições de deslocamentos horizontais, são condições necessárias para acompanhar os movimentos dos taludes, possibilitando avaliar a estabilidade e a segurança do mesmo (PERRETTO, 2011).

A determinação dos deslocamentos horizontais em um talude ocorre através de duas maneiras, sejam elas, a medição interna e a medição externa do talude. As medições internas no talude verificam os deslocamentos das massas de solo do talude de forma relativa entre si. Para realizar estas medições é utilizado o inclinômetro, instrumento que

possui características adequadas para efetuar medições de inclinação ao longo de um tubo guia previamente instalado no talude. O inclinômetro efetua a medição do ângulo de inclinação de sua sonda em relação ao eixo vertical gravitacional em vários segmentos de profundidade, que posteriormente serão convertidos em medidas de deslocamentos horizontais (FONSECA, 2003).

Já as medições externas ao talude, verificam o deslocamento das massas de solo formadoras do talude com relação a outros pontos físicos não pertencentes ao talude, tecnicamente garantidos como pontos fixos. Estas medições são realizadas normalmente utilizando marcos superficiais de referência, onde se efetua a medição da distância em um segmento reto entre dois marcos superficiais, sendo um marco superficial em ponto fixo fora do talude e outro marco superficial sobre o talude. Mais recentemente, este método está sendo substituído por medições georreferenciadas com o auxílio de sistemas como GPS “*Global Positioning System*” (FONSECA, 2003).

A utilização do inclinômetro nas medições e acompanhamentos em formações de taludes são condições necessárias para a manutenção da infraestrutura no que diz respeito ao prolongamento da sua vida útil. Da mesma forma, contribui no monitoramento da segurança desta infraestrutura para com os efeitos diretos e indiretos que sua perda ou seu dano pode vir a produzir (YIN, 2008).

Os inclinômetros podem ser encontrados com as denominações de *slope inclinometer*, *probe inclinometer*, *slope indicator*, *clinometer*, *tiltmeter*, entre outros (DUNNICLIFF, 1988). O termo inclinômetro e *inclinometer* aparece largamente empregado no âmbito da construção de obras civis (KRELLING, 2006). Suas maiores aplicações são: determinação de zonas com risco de desmoronamento, monitoramento de movimentos horizontais de aterros de barragens, de encostas de escavações, de taludes e de túneis, ainda, monitoramento de defleções de anteparos e muros de contenções e medição de deformações das faces de concreto em barragens de enrocamento, entre outros (DUNNICLIFF, 1988).

É neste contexto que este trabalho propõe contribuir evolutivamente nas partes que configuram o inclinômetro, inserindo ao mesmo novas tecnologias. Tomando como base a evolução da eletrônica, com o desenvolvimento de novas tecnologias de construção de circuitos integrados (CI's), ocorreu o surgimento e difusão da tecnologia denominada de *microelectromechanical system* (MEMS), que possibilita o desenvolvimento de CI's que operam com características de dispositivos eletroeletrônicos e mecânicos combinados.

Dentre as oportunidades abertas ao utilizar a tecnologia MEMS, destaca-se a possibilidade de compactação do tamanho físico do corpo da sonda do inclinômetro. Incorporada à redução do corpo da sonda, mas não dependente da tecnologia MEMS está à realização da medição de inclinação do corpo da sonda em conjunto com a medição da profundidade da sonda de forma automática. Ao realizar a medição de profundidade da sonda de forma automática, confere-se um grau de inovação ao estudo e desenvolvimento, visto que no mercado atual nenhum equipamento realiza tal função.

1.2 Justificativa

A proposta de construção do SADi é trazer contribuições ao método de medição de deslocamentos horizontais das massas de solos, onde a agilidade, facilidade, redução de ocorrência de erros e a possibilidade de análise mais rápida dos resultados são os principais avanços.

Através da compactação do corpo da sonda, o SADi aumenta o número de medições realizadas ao longo do trecho medido, efetivando uma reprodução mais fiel do comportamento da massa, contribuindo assim, para uma melhor reprodução do trecho medido.

A medição conjunta da profundidade e da inclinação da sonda de forma automática, traz agilidade, facilidade e redução de ocorrências de erros, principalmente os erros grosseiros.

A utilização de um PC como interface de usuário para o SADi, efetiva um ganho em agilidade na análise de resultados, visto que não há necessidade de ocorrer a transferência de dados de uma interface de usuário específica para o PC.

Embora as inovações proporcionadas para o SADi tragam alterações nos procedimentos de utilização do instrumento, o SADi não modificou o processo de medição de inclinação utilizando inclinômetros.

Domínio tecnológico, pois atualmente o Brasil importa toda a tecnologia de medições com inclinômetros.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um inclinômetro que apresente o corpo de sua sonda com dimensões reduzidas em relação as atuais sondas, que permita realizar a medição de profundidade automática e possua um sistema de aquisição de dados capaz de operar como interface de usuário, quando auxiliado por um PC.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma sonda de um inclinômetro adequada a efetuar medições nos tubos guias padrões, com menor distância entre os eixos dos rodízios guias, que efetue medições em dois sentidos ortogonais entre si e envie os dados das medições em comunicação sem fio.
- Incorporar ao inclinômetro a capacidade de medição da profundidade da sonda em conjunto com as medições de inclinação.
- Possibilitar a utilização de um computador pessoal para realização da função de IHM,
- Calibrar e ensaiar o instrumento.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo encontram as considerações iniciais, justificativa, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo II encontra-se a revisão bibliográfica, que apresenta um resumo geral das teorias envolvidas na aplicação e nos desenvolvimentos dos inclinômetros.

O capítulo III apresenta o procedimento metodológico utilizado para o desenvolvimento do SADi, definindo as metodologias utilizadas para o projeto do SADi, juntamente com o embasamento das melhorias propostas.

No capítulo IV é apresentado o desenvolvimento do SADi, no qual são destacadas as ações necessárias para a elaboração dos componentes, passando desde o projeto, às montagens até o procedimento de calibração.

No capítulo V é descrito o ensaio de validação do SADi, apresentando seus valores medidos e comparados a um inclinômetro de referência.

No capítulo VI encontra-se a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Os inclinômetros atualmente utilizados para medir inclinações e deslocamentos em estruturas geotécnicas são derivados do protótipo construído em 1952 por Stanley D. Wilson (STARK, 2006). Desde seu desenvolvimento por Stanley até os dias atuais, o inclinômetro já sofreu várias melhorias e atualizações. Atualmente, os estudos e propostas para incrementos tecnológicos nos inclinômetros estão direcionados fortemente às questões de configuração de um sistema automático para medições de inclinação em tempo real e às condições de envio dos dados das medições por comunicação sem fio. Neste sentido são evidenciados alguns trabalhos no aprimoramento dos sistemas de monitoramento utilizando técnicas de medição de inclinação.

Um estudo foi realizado a fim de desenvolver um inclinômetro com tecnologia MEMS, usando o acelerômetro ADXL330. A proposta principal do equipamento era o envio dos valores das medições em tempo real a uma central de monitoramento, que por sua vez identifica a existência de movimentos, prevendo possíveis deslizamentos. Inicialmente o estudo aponta para a instalação de um ponto de monitoramento (HANTO, 2011).

Outro estudo e aplicação ocorreu com a mescla de um sistema que monitora a base de um talude através de sistema de Redes de Bragg, utilizando no corpo do talude sensores de deformação com fibras ópticas e na parte externa do talude apresenta referenciamento pelo sistema de posicionamento global (GPS). Ainda, o estudo apresenta a condição de monitoramento em tempo real (YIN, 2008).

Outra proposta para efetuar o envio dos dados das medições por um sistema de comunicação sem fio, agora utilizando um transmissor de dados sem fio Zigbee e um receptor Zigbee, foi testado com o intuito de monitorar obras a distância e em tempo real, efetivando uma ação de implementação de baixo custo e confiável (MISHRA, 2011).

De forma laboratorial, estudos e ensaios foram realizados através da utilização de um sistema de monitoramento preventivo à ocorrência de deslizamentos baseado em um sistema de redes sem fio. Através de uma central computacional, ocorre o recebimento e o

gerenciamento dos dados dos sensores, o sistema monitora, realiza o diagnóstico e informa em tempo real as condições sobre o local monitorado (GEORGIEVA, 2012).

Uma aplicação de um sistema de monitoramento em tempo real foi realizada utilizando informações provindas de piezômetros, inclinômetros e GPS. O sistema foi instalado na região de Modena, no norte da Itália, região das Montanhas Apeninas, a fim de monitorar situações de risco de deslizamentos. O sistema foi desenvolvido para operar em tempo real junto a um sistema de informação geográfica (GIS), responsável pela gestão de riscos de deslizamentos. Foram acompanhados movimentos ocorridos no solo, desde poucos milímetros até deslocamentos de alguns metros (BERTACCHINI, 2011).

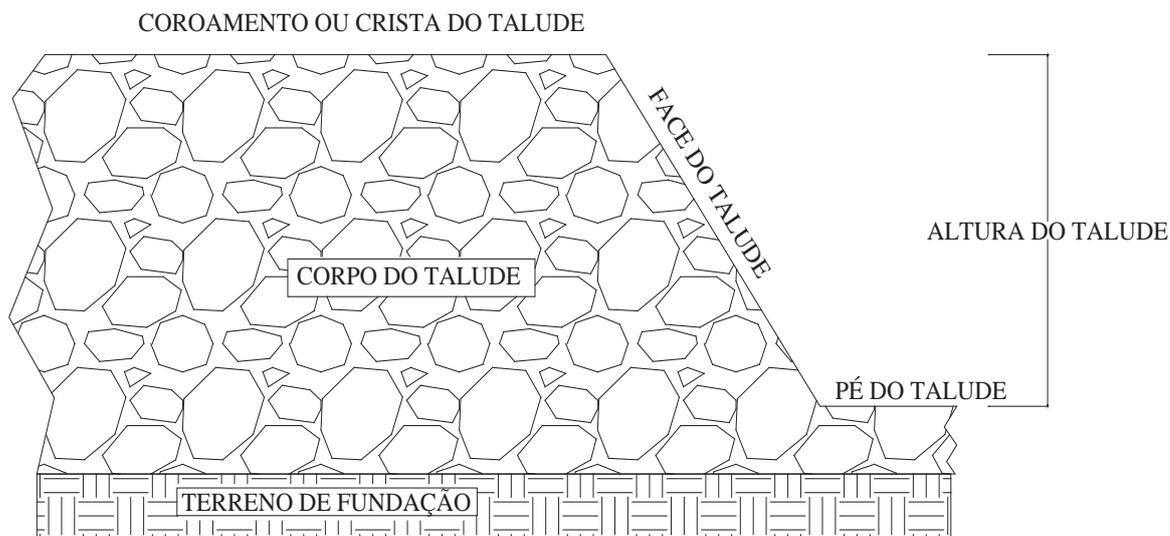
Embora existam outros trabalhos desenvolvidos com respeito aos monitoramentos dos movimentos de solo, muitos destes apresentam similaridades com os trabalhos enunciados. Em todos estes trabalhos, fica clara a preocupação com a prevenção da ocorrência de deslizamentos de solo, que por inúmeras vezes acarretam desastres com perdas humanas.

As situações mais susceptíveis às ocorrências de deslizamentos e movimentos de solo são as formações de taludes, que podem existir de forma natural ou pela ação do homem. Neste sentido é que se faz necessário, inicialmente, uma caracterização do processo de movimentos dos solos nas formações em taludes.

2.2 Formações e caracterizações dos taludes

Os taludes são caracterizados por apresentarem na sua geometria uma face inclinada, onde esta separa duas cotas de um maciço de terra, rocha ou ainda rocha e terra. Ele pode ser natural, como encostas de morros, ou artificial, como taludes de barragens, depósitos de resíduos sólidos urbanos (RSU), cortes em terrenos, contenções de escavações, entre outra (MENEZES, 2003). A Figura 1 ilustra a formação de um talude, onde é possível visualizar as duas cotas, sejam elas a crista e o pé do talude, a face inclinada e o corpo do talude.

Figura 1. Caracterização de um talude



Fonte: Própria

Os taludes podem ser divididos em naturais, os de escavações e os de aterro. Os taludes naturais são formações construídas pela ação de chuvas, ventos, geologia da região, entre outros fatores, durante o passar de milhões de anos. Os taludes originados de escavações são evidenciados por situações construídas mecanicamente pela ação do homem na retirada de materiais produzindo um rebaixo do solo natural. Já os taludes de aterro são deposições de solo, rochas e outros elementos construtores acumulados em condição vertical, mantendo um ângulo de levante que assegure sua estabilidade (PERRETO, 2011).

Dentro das caracterizações dos taludes, é importante destacar o tipo e as diferenças dos movimentos que ocorrem nas massas formadoras dos taludes. Classificam-se em três os tipos de movimentos em taludes, sejam eles, desprendimentos de solo ou rocha, escorregamentos e rastejos (CAPUTO, 1988) (PIMENTA, 2005). Ainda alguns autores incluem o movimento de corrida em taludes nesta classificação (PIMENTA, 2005).

O desprendimento é quando uma porção de solo ou rocha se solta do maciço com condições de queda livre e rápida, permanecendo acumulada na superfície mais favorável. A ruptura desta porção de solo ou rocha é caracterizada pela ocorrência de uma separação ou cisalhamento de uma superfície na porção em questão, onde seus movimentos são repentinos e bruscos (CARDOSO, 2011).

O escorregamento é um movimento repentino e rápido de uma massa de solo ou de rocha que se solta do maciço deslizando na condição mais favorável, para frente ou para os lados ao longo de uma superfície inclinada, podendo apresentar grandes volumes de massa, ao passo que a velocidade de seu movimento não é necessariamente constante (CAPUTO, 1988). A Figura 2 ilustra um escorregamento de um talude artificial.

Figura 2. Escorregamento de um talude



Fonte: http://tianguaemfoco.blogspot.com.br/2011_04_03_archive.html

O terceiro tipo de movimento é o rastejo, o qual caracteriza-se por movimentos lentos, contínuos e relativos das camadas mais superficiais sobre as camadas mais profundas, com ou sem limites definidos para seus movimentos. Comparativamente, a velocidade média de um escorregamento é de 30 cm por hora, já para um rastejo é de 30 cm por decênio (TERZAGHI, 1967).

Nas caracterizações mais modernas de movimentos em talude, é encontrado o movimento de corrida. A corrida apresenta combinações de velocidade, direção, natureza do material, textura, geometria das massas, modalidade de deformação e ainda recorrência dos deslocamentos. Contudo, ainda o movimento de corrida é sempre caracterizado por

possuir água junto à massa sólida, apresentar velocidades de média a alta e atingir grande raio de alcance (PIMENTA, 2005).

Uma condição dos movimentos dos taludes é que os desprendimentos e os escorregamentos são sempre antecedidos por rastejos (CAPUTO, 1988). Logo, o acompanhamento dos movimentos de rastejo de um talude contribui para a antecipação da ocorrência de situações de risco, que são evidenciadas nos desprendimentos e nos escorregamentos. A verificação dos movimentos de rastejo em taludes é avaliada satisfatoriamente através da utilização de inclinômetros, sempre que estas medições apresentem repetições temporais adequadas ao tipo característico do talude.

Com relação à análise da estabilidade do talude, a mesma é definida por fatores instabilizantes, que podem possuir comportamento cíclico como períodos de chuvas e estarem relacionados com as características de formação da rocha, devido a ação geológica e morfológica ao longo da sua vida, como erosão, chuvas, ventos, alteração de pressões, e esforços externos devidos normalmente ao uso e ocupação (PIMENTA, 2005 apud AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 1998).

Os movimentos de massas em taludes estão relacionados principalmente pela ação da força da gravidade, mas existem fatores que podem acelerar este processo, como a ação humana ou a ação da natureza, como em escavações, levantes de solo, chuvas, erosões, ventos, terremotos, entre outros (HANTO, 2011).

Assim, a heterogeneidade dos solos presentes nos taludes, bem como as condições climáticas e do modo de ocupação de locais com este tipo de topografia, propiciam diferentes condições de instabilidades dos mesmos, tornando complexa a condição de cálculos e de previsões do comportamento do talude (HANTO, 2011).

As formações de taludes estão presentes em uma variada gama de situações que podem ser naturais ou artificiais, contendo diferentes tipos de solos formadores. Em uma visão mais aplicativa de locais com monitoramento do comportamento do talude através de medições, podem ser citadas as formações de talude em aterro sanitário de RSU, barragens de enrocamento, construções de estradas em encosta e em áreas alagadiças, em solos naturais escavados, entre outros.

Nas formações de taludes provindos de aterros sanitários de RSU, estes ocorrem devido à deposição de materiais em camadas sobrepostas. O fator mais agravante desta formação de talude para com a sua estabilidade é a característica extremamente heterogênea dos materiais depositados, apresentando condições de baixa massa específica,

alta porosidade, baixa compactação e sobretudo, podem haver alterações da sua estrutura com o passar dos anos (SIMÕES, 2003). Utilizando as técnicas corretas para a construção do aterro sanitário de RSU, muitos problemas de instabilidade do talude são minimizados, embora estas técnicas não eximam totalmente os riscos de ocorrerem rupturas (SIMÕES, 2003).

Nas construções de barragens ocorrem as formações de taludes através do levante do solo com posterior compactação. Este levante apresenta cuidados desde a escolha do solo apropriado, seguindo com uma adequada compactação, junto a um ângulo de levante adequado. Todos estes cuidados e técnicas recorrem da necessidade de suportar as pressões provindas da coluna d'água, atingindo desta forma, um elevado nível de segurança para com a estabilidade do talude e ao mesmo tempo atribuindo a este uma expectativa de vida prolongada (PERRETO, 2011).

Para as construções de estradas em áreas alagadiças e em terrenos íngremes, os taludes podem apresentar grandes variabilidades das características de suporte aos esforços de carregamento, muito devido ao tipo de solo utilizado na construção da base da estrada (CUSATIS, 2001).

Nas áreas de encostas de morros que são ocupadas por moradias, normalmente ocorre a retirada da vegetação superficial, que por muitas vezes realiza a fixação da camada de solo mais externa através de suas raízes. A supressão desta vegetação superficial expõe a camada superficial do solo, comumente composta por material orgânico, que é impróprio para utilização como base de sustentação e que deve ser removida. Embora para alguns casos a remoção da camada superficial exponha uma base mais adequada para o levante da obra, as encostas apresentam probabilidade elevada da ocorrência dos movimentos de rastejos, escorregamentos, desprendimentos e corridas, tornando-se uma área de elevado risco (CUSATIS, 2001).

Devido às estruturas dos taludes apresentarem propensões à ocorrência de movimentos horizontais, e esses apresentarem comportamentos diferenciados pelas camadas estratificadas do solo, é necessário que ocorra um acompanhamento na evolução destes movimentos. Estudos e acompanhamentos verificaram que os movimentos dos solos são acelerados gradativamente até atingir a ruptura, o que evidencia uma boa solução a aplicação de instrumentação para efetivar o monitoramento em solos propícios a rupturas (EINSENBARGER, 2003 apud GUIDICINI, 1984).

2.3 Monitoramento de taludes através do inclinômetro

Para monitorar um talude que apresente pequenos níveis de deformação ou de movimentos no solo como rastejos, os inclinômetros são os instrumentos mais utilizados. Uma abordagem inicial de monitoramentos de locais inclinados é verificada atualmente nas medições de inclinação em taludes formados pelas disposições de resíduos sólidos urbanos (RSU). A forma de disposição dos RSU em aterros sanitários com formação de taludes é um método muito utilizado em locais de grandes volumes de RSU, reduzindo desta forma a área coberta pelos resíduos, passando a apresentar disposições elevadas de massa de RSU. A massa de RSU do aterro é então disposta em camadas verticais, onde em suas extremidades laterais apresentam formações de taludes. Durante o passar dos anos a matéria orgânica sofre modificações devido a sua decomposição, produzindo dentro do maciço de RSU, ocos, falhas e fendas que acabam por produzir forças que tendem a romper, fissurar, provocar modificações estruturais, rastejo e escorregamentos em sua estrutura, necessitando de um acompanhamento permanente do aterro até a total estabilização do mesmo (SIMÕES, 2003 ; JORGE, 2004).

Uma aplicação prática do monitoramento de um aterro sanitário ocorreu em Belo Horizonte, junto a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040. Para o monitoramento de movimentos horizontais foram instalados inclinômetros em um dos diques de contenção, a fim de verificar possíveis movimentações. Conforme os autores, este procedimento de monitorar os aterros de RSU não é uma prática comum, e o trabalho aproveitou também para apresentar as dificuldades encontradas neste tipo de ação. As dificuldades indicadas pelo trabalho na realização do monitoramento foram a realização de perfurações na massa de RSU, a agressividade do meio no interior da massa de RSU, as necessidades de adaptações dos instrumentos às condições requeridas e a interpretação dos resultados, visto do comportamento complexo e da heterogeneidade dos materiais (SIMÕES, 2003). Não foram encontrados resultados demonstrados pelos autores.

Uma segunda concentração de estudo é a aplicação do inclinômetro no monitoramento de encostas, principalmente quando se encontram em áreas habitadas ou próximas das mesmas. Para tais casos, os instrumentos mais utilizados são pluviômetros locais e medidores de poro-pressão, visto a grande probabilidade de escorregamentos repentinos, principalmente em dias de fortes chuvas. Contudo, o incremento de

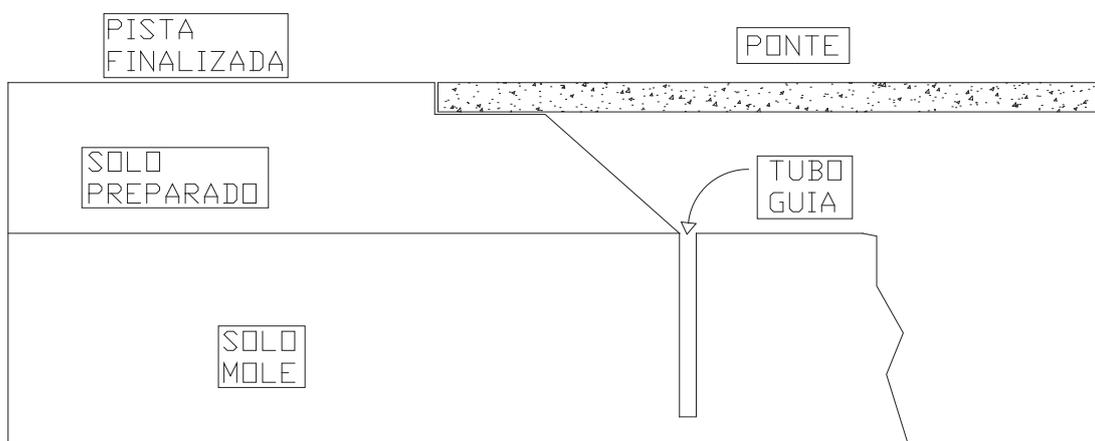
informações providas de inclinômetros, que possibilitem medições em tempo real, e que se encontrem dispostos em pontos estratégicos, resulta em um sistema de monitoramento mais adequado, podendo fornecer informações importantes sobre os movimentos de rastejos verificado nas encostas, podendo antecipar uma possível ocorrência de um escorregamento (EISENBERGER, 2003). Em situação recente com relação à segurança da população, o Governo Federal instituiu a Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que trata da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Nesta Lei, fica clara a preocupação do Governo Federal para com a ocupação de moradias em áreas de risco, sendo observada para isto uma série de requisitos, diretrizes, ações, mitigações, competências, dentre outras políticas, onde o monitoramento é um dos requisitos que devem ser efetuados, a fim de minimizar os riscos destas ocupações.

Já, para o monitoramento de encostas que são cortadas por rodovias e servem de base para esta, um acompanhamento dos movimentos lentos que ocorrem devido ao peso dos veículos que trafegam nesta rodovia são passíveis de serem verificados com a utilização de medições oriundas do inclinômetro. Conforme definido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT), dentre os equipamentos que devem ser utilizados para monitoramentos durante e após a conclusão das obras de uma rodovia está o inclinômetro, que é definido como equipamento para verificação de deslocamentos horizontais, onde também define que o tipo de transdutor de inclinação que deverá estar internamente na sonda é do tipo servo acelerômetro. As aplicações dos inclinômetros em obras rodoviárias são definidas para três tipos de classes. Em aterros classe I, que são aterros junto a estruturas rígidas tal como os encontros com pontes e viadutos. Em aterros classe II, que são aterros que não se encontram próximos a estruturas rígidas, mas apresentam características de serem altos, acima de 3 m. E em aterros classe III, que ocorrem também afastados das estruturas rígidas, porém são baixos, menores que 3 m (DNIT, 1998).

As condições exigidas pelo DNIT na execução de rodovias também evidenciam o número mínimo de pontos a serem medidos por inclinômetros. No aterro classe I todas as seções deverão apresentar pelo menos um ponto de monitoramento com inclinômetro. Para os aterros classe II e classe III, pelo menos uma seção deverá ser instrumentada num trecho maior que 500 m, tendo no mínimo uma seção instrumentada a cada 2 km. O uso do inclinômetro é obrigatório em pelo menos um ponto nos casos de presença de seção de aterro com reforço de geosintéticos ou aterro estaqueado. A frequência mínima de leitura

durante a execução deve ser diária e sempre que concluída uma camada do aterro. Já após a execução e durante a permanência de sobrecarga temporária devido aos equipamentos da construção, as medições deverão ser semanais. Após a retirada da sobrecarga as leituras serão quinzenais por um período mínimo de 4 meses (DNIT, 1998). A Figura 3 ilustra um ponto de instalação de um tubo guia, onde será efetivada a medição de inclinação do solo em uma seção de aterramento classe I, que ocorre junto a uma estrutura rígida de uma ponte.

Figura 3. Ponto de monitoramento de inclinômetro em ponte rodoviária



Fonte: Própria

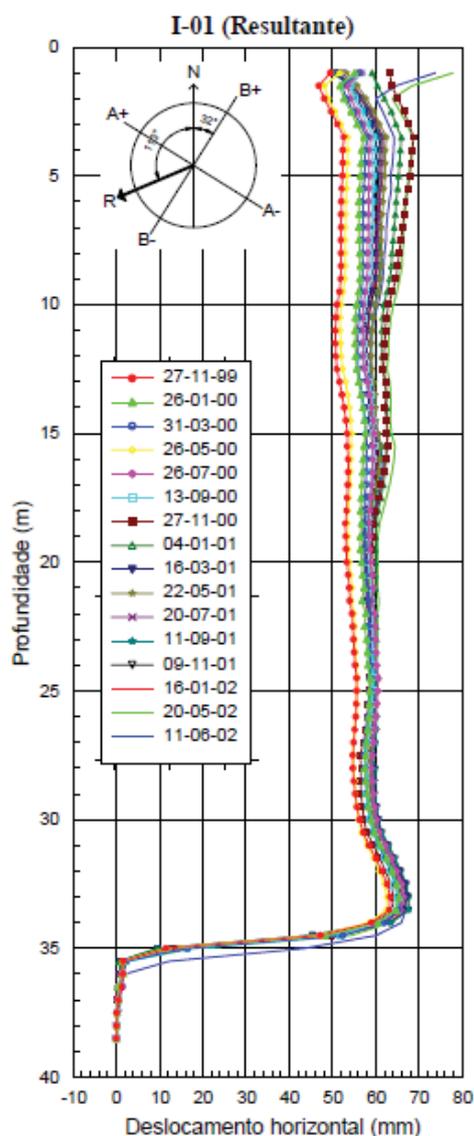
Um exemplo de aplicações de inclinômetros em estradas ocorre na Rodovia Imigrantes no Estado de São Paulo. O resultado da medição em um dos pontos de monitoramento é apresentado na Figura 4, que apresenta de forma gráfica várias medições realizadas em datas diferentes, como é possível verificar no quadro junto à figura. O método em que são apresentados os resultados possibilita uma verificação visual da evolução dos valores das medições, que por consequência representa o movimento comportamental do solo para o entorno do ponto (BASTOS, 2006).

Outra aplicação para o inclinômetro ocorre no monitoramento de barragens de terra e de enrocamento. Já nas barragens de concreto é comum o uso de inclinômetros fixos, que em inglês são denominados *in place inclinometer*, onde este é uma variação de um inclinômetro, apresentando características e limitações em suas medições, mas atendendo adequadamente à aplicação. Já nas barragens de enrocamento ou de solo, com ou sem faces de concreto, e nas demais formações de taludes de terra é utilizado o inclinômetro móvel

que é o objeto de estudo deste trabalho, onde este apresenta melhores condições no fornecimento de informações quando comparado ao inclinômetro fixo (SILVEIRA, 2003).

No caso de barragens, além de medições com inclinômetros aparecem às medições com piezômetros, células de pressão total, marcos superficiais, medidores de vazão e outros, que convergem em um conjunto de medições comportamentais de características da barragem, que visa verificar possíveis anomalias, fadigas e falhas que possam ocorrer na estrutura da mesma, provendo, desta forma, um melhor sistema de segurança, além de planos de manutenção e recuperação para a mesma (SILVEIRA, 2003 ; SILVEIRA, 2006 ; MACHADO, 2007).

Figura 4. Resultado gráfico de uma medição com inclinômetro em uma rodovia



Fonte: BASTOS, 2006

A primeira aplicação de um inclinômetro em uma barragem foi descrita como ocorrida no ano de 1958 na barragem de Mammoth Pool, nos Estados Unidos. No Brasil, são evidenciadas as primeiras medições em barragem a partir da década dos anos 60 (SILVEIRA, 2003). Nesta década as várias obras, incluindo as de geração de energia elétrica ficaram conhecidas como o Milagre Econômico Brasileiro, ocorrido no Regime militar. Como exemplo destas obras, pode ser citada a entrada em operação da Usina Hidrelétrica de Furnas, instalada no Rio Grande em Minas Gerais, sendo a maior usina da época e a primeira a possuir barragem de enrocamento de grande porte, contendo 127 m de altura máxima e 550 m de comprimento. Ainda, nesta época são inauguradas as usinas do Salto do Jacuí (1962), Jurumirim (1962), Salto Grande (1960), ainda tiveram inícios às obras das usinas de Jaguará (1966), Ilha Solteira (1965), Jupia (1965), Chavantes (1959) e também as primeiras tratativas com o Governo Paraguaio para a construção de Itaipu (1970), além de outras usinas que iniciaram sua operação ou sua obra dentro da década dos anos 60.

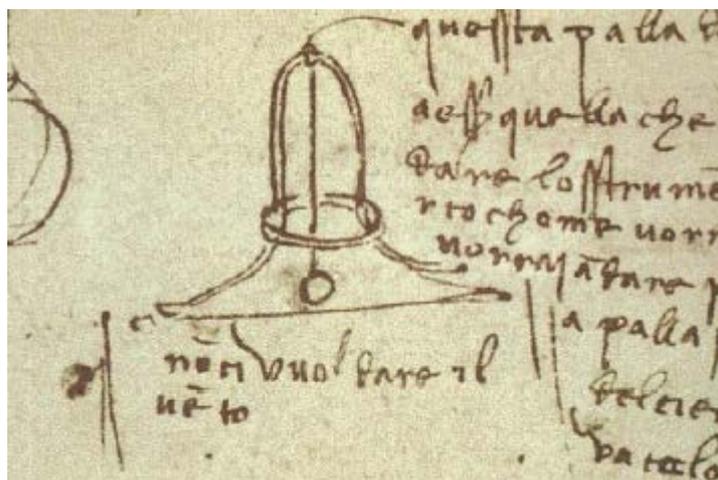
Para todos os casos em que são aplicados inclinômetros, os dados das medições providas deste, devem ser usados como mais uma informação auxiliadora na verificação da estabilidade do talude, contribuindo com informações sobre a existência de movimentos horizontais, mas não pode ser o único elemento a caracterizar tal movimento. É necessário sempre um conjunto de medições que evidenciam por vários focos diferentes a existência de uma situação indesejável, embora para cada tipo de situação que se deseja monitorar exista um equipamento de medição adequado e para um destes casos é que se define pela utilização do inclinômetro. É importante, também, que o usuário do inclinômetro conheça o uso correto do mesmo junto com uma metodologia adequada para efetuar estas medições (CELESTE, 2002). Além disto, é necessário para formar uma boa base de dados de medidas de inclinação, estudos para definir o local de instalação dos tubos guias, bem como realizar repetições das medições ao longo do tempo, possibilitando formar uma base de dados histórica (CELESTE, 2002) (DUNNICLIFF, 1988).

2.4 O que é o inclinômetro?

O inclinômetro é todo instrumento que devido a suas características construtivas propicia efetuar a medição de inclinação local ou apenas verificar a existência de uma variação angular, podendo realizar seu processo de forma diferencial ou absoluta.

Os inclinômetros são instrumentos que existem há centenas de anos. Os relatos mais antigos conhecidos são do inclinômetro de Leonardo Da Vinci, com data provável de construção entre 1483 e 1486, conforme seu projeto original mostrado na Figura 5. Anos mais tarde, o inclinômetro de Da Vinci foi reconstruído a partir de seu projeto original. Embora sem possibilidade de efetuar medições, a visualização do pendulo era imaginado por Da Vinci como um método de auxílio às aeronaves imaginadas por ele (KRELLING, 2006).

Figura 5. Projeto original de Da Vinci



Fonte: KRELLING, 2006

Os inclinômetro podem operar a partir de vários princípios, onde os mais conhecidos e difundidos são os pêndulos, as esferas, os líquidos e medição angular direta. A Figura 6 mostra um inclinômetro de esfera, muito utilizado em embarcações, no qual é possível efetuar a leitura da inclinação pela visualização da posição da esfera interna ao tubo (KRELLING, 2006).

Figura 6. Inclínômetro de esfera



Fonte: KRELLING, 2006

Outro modelo de construção de inclinômetro é baseado em líquidos, como ocorrem com os níveis utilizados na construção civil, onde neste caso a possibilidade de efetuar leitura de medições é inexistente.

Atualmente, devido ao avanço da eletrônica, os inclinômetros mais difundidos são construídos através de técnicas utilizando a microeletrônica. A maioria dos inclinômetros apresenta sua construção baseada em acelerômetros, que se destacam por suas características técnicas de exatidão, compactação e precisão. Os acelerômetros apresentam seu funcionamento baseado na ação da aceleração da gravidade sobre os corpos, assim, sua ação é evidenciada pela força de equilíbrio que um corpo realiza tendendo a buscar seu estado de repouso. Esta posição do corpo pode ser utilizada de forma direta, onde a inclinação estará deslocada relativamente à outra, mantida na vertical pela ação da aceleração da gravidade. Também, pode ser utilizada de forma indireta, quando não é evidenciado o deslocamento relativo e sim a força necessária para manter o corpo deslocado de seu estado de repouso (FIGUEIREDO, 2007).

As aplicações que utilizam inclinômetros estão difundidas nas mais variadas áreas, desde equipamentos pessoais, onde seu funcionamento pode passar despercebido, como ocorre nos equipamentos eletrônicos como celulares e *tablets* e em automóveis. Porém, em outras aplicações o uso do inclinômetro apresenta um objetivo específico, que para a maioria dos casos deve resultar em um valor de medida necessário para um estudo e ou avaliação de risco. Alguns casos conhecidos de aplicações com inclinômetros têm por objetivo devolver a informação exata da inclinação instantânea do objeto com relação a um ponto de referência, que normalmente é a vertical gravitacional. As aplicações mais conhecidas são na aviação, navegação, em agricultura de precisão, nas telecomunicações, na construção civil, entre outros (FIGUEIREDO, 2007).

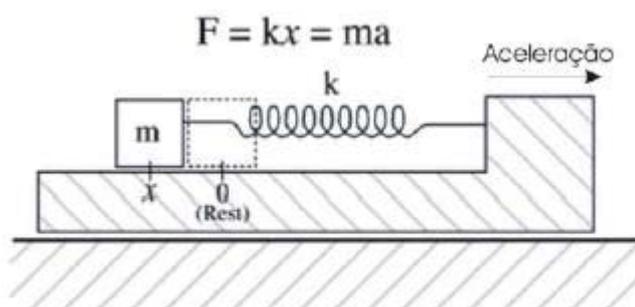
No caso específico da construção civil, o inclinômetro é aplicado para verificar o comportamento de colunas e vigas em grandes estruturas, mas também é bastante difundido no monitoramento do comportamento de solos, principalmente nos locais que apresentam propensão à alteração de sua estrutura física, como ocorre no monitoramento da estabilidade de taludes, contenções, e outras obras geotécnicas (KRELLING, 2006).

2.5 Acelerômetros

Existem vários tipos de transdutores desenvolvidos para realizar a medição de inclinação, como já definido anteriormente. Entre eles os mais difundidos são os baseados em acelerômetros.

O princípio básico de funcionamento de um acelerômetro é o de um sistema massa-mola, o qual obedece aos princípios conhecidos da Lei de Hooke. De uma forma esquemática, a Figura 7 apresenta a relação de uma deformação em função da aceleração imposta a uma massa.

Figura 7. Lei de Hooke.



Fonte: KRELLING, 2006

O princípio da Lei de Hooke afirma que a deformação sofrida por um material é linearmente relacionada à força que causou a deformação. Esta condição aproximável pela Lei de Hooke aplica-se aos materiais elástico lineares, que então obedecem as condições da Equação 1, que afirma " k " como uma constante proporcional entre a força " F " e o deslocamento " x ".

$$F = k \cdot x \quad (1)$$

Ainda, outro princípio básico da ação da força sobre os corpos é a Segunda Lei de Newton, onde esta afirma que a força de um corpo é dada pelo produto de sua massa “ m ” e da sua aceleração “ a ”, conforme definido na Equação 2.

$$F = m \cdot a \quad (2)$$

Assim, ao igualar a Lei de Newton e a Lei de Hooke, resultará a Equação 3.

$$F = m \cdot a = k \cdot x \quad (3)$$

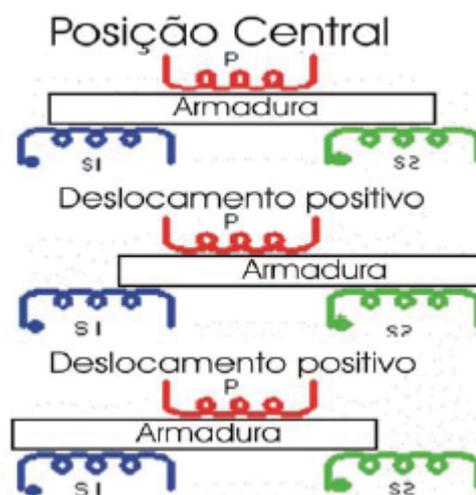
Logo, para um determinado corpo os elementos “ k ” e “ m ” na Equação 4 não são variáveis e serão isolados em um lado da equação.

$$\frac{k}{m} = \frac{a}{x} \quad (4)$$

Verifica-se, que a variação da aceleração “ a ” de um corpo apresentará uma variação proporcional de deslocamento “ x ”, conforme mostra a Equação 4, visto que a relação “ (k/m) ” resulta em um valor constante. Logo, a aceleração do corpo está relacionada diretamente ao deslocamento do material elástico linear. A análise ora realizada efetiva uma condição indireta de medição de inclinação, pois a aceleração será primeiramente transformada em um deslocamento. Vários transdutores operam sobre esta condição como é o caso dos LVDT, dos extensômetros de lâmina e extensômetros de corda vibrante.

Os acelerômetros denominados de LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), ou transdutor linear de deslocamentos variáveis em tradução livre, são transdutores baseados em deslocamento. São construídos por três bobinas enroladas de forma isolada e alinhadas, para que ocorra a possibilidade de excursão de um embolo denominado de armadura por entre as bobinas. A Figura 8 mostra a condição de montagem do LVDT, onde a bobina primária indicada pela letra “P” aparece ao centro, e as bobinas secundárias “S1 e S2”, aparecem lateralmente (KRELLING, 2006).

Figura 8. Forma esquemática de um transdutor LVDT.



Fonte: KRELLING, 2006

A Figura 8 apresenta a posição da armadura em três situações diferentes de forma que a sua posição advém de uma força externa, no caso a aceleração do LVDT e que por sua vez resultará em um sinal elétrico de saída diferenciado para cada uma das situações. A Equação 5 determina o comportamento do sinal de saída do LVDT, onde a tensão elétrica de saída do LVDT “ S_{LVDT} ” é a subtração das tensões de saída S1 e S2.

$$S_{LVDT} = S1 - S2 \quad (5)$$

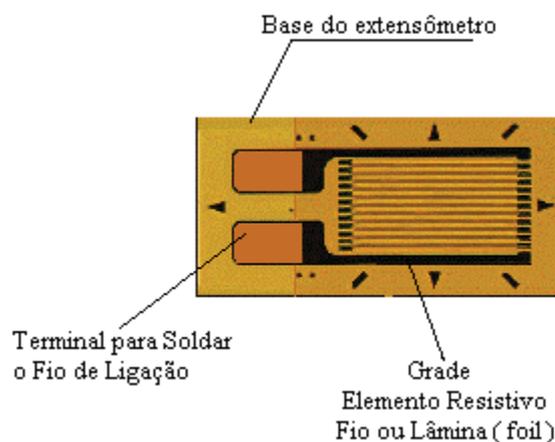
Para analisar o funcionamento do LVDT, toma-se inicialmente a partir da Figura 8 a posição da armadura ao centro do LVDT, distribuindo o fluxo magnético produzido pela bobina primária de igual forma às bobinas secundárias, assim, de acordo com a Equação 5, o seu resultado será zero. No segundo instante, a armadura está mais favorável à bobina secundária S2, logo, a tensão gerada por esta bobina será maior que a tensão de saída da bobina S1, resultando em uma saída diferente de zero e negativa. No terceiro instante, a armadura encontra-se mais favorável à bobina S1, que então terá uma maior tensão que a bobina S2. Novamente, o resultando da saída será diferente de zero, mas agora positivo. O LVDT apresenta funcionamento similar a um circuito magnético acoplado, como o caso de um transformador. Assim, para que ocorra a conversão de energia, isto é, as bobinas S1 e S2 apresentarem tensões em seus terminais secundários é necessário que exista uma indução magnética sobre as mesmas, e esta indução ainda, provenha de um fluxo magnético variável no tempo. Esta condição é definida através da Lei de Faraday,

quantificada conforme a Equação 6, que define a amplitude da tensão em uma bobina quando esta é atravessada por uma indução magnética. Interpreta-se a Equação 6 definindo-se o valor da tensão induzida em uma bobina "E", pelo produto entre a quantidade de espiras que são enroladas na bobina "N" e a derivada do fluxo no tempo " $d\phi/dt$ ". A derivada do fluxo no tempo " $d\phi/dt$ " é entendida pela obrigatoriedade da bobina primária S1 ser excitada através de uma corrente alternada, pois, se o fluxo resultante de S1 for constante no tempo, a sua derivada no tempo resultará em um valor zero, conseqüentemente resultando em uma tensão induzida também zero (KOSOW, 2005).

$$E = N \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

Outro modo de construção de acelerômetros ocorre quando é utilizado extensômetros de lâmina (Strain gage). Os extensômetros são transdutores elétricos que variam sua resistência elétrica quando submetidos a deformações mecânicas oriundas de forças externas. Normalmente apresentam boa linearidade entre a variação de sua resistência elétrica e a força externa imprimida sobre o mesmo. Para as aplicações em inclinômetros, os extensômetros são montados e fixados a um pêndulo e ao mesmo tempo fixados na superfície que irá ser o corpo do inclinômetro. A inclinação do corpo provoca deflexão no extensômetro, alterando o valor da sua resistência elétrica. Quando for realizada a medição desta resistência do extensômetro, normalmente por intermédio de uma ponte de Wheatstone, será reconhecido o valor da inclinação do corpo. De uma forma geral, os inclinômetros construídos com extensômetros, apresentam seu funcionamento baseado na medição da força necessária para vencer a força da gravidade em um sistema que pode ser semelhante ao da Figura 11. A exemplificação encontra-se no caso da Figura 11(a), onde o pêndulo estando em repouso, não necessita de força externa para manter-se no centro geométrico. Já na Figura 11(b) há a necessidade de uma força externa para manter o pêndulo no centro geométrico. Assim, a força externa sobre o pêndulo é convertida em um valor proporcional a inclinação ocorrida (SILVEIRA, 2006). Os extensômetros são montados normalmente no sentido dos esforços a que são submetidos, de forma que é possível ter montagens de um eixo, dois eixos e três eixos (KRELLING, 2006). A Figura 9 ilustra um extensômetro de lâmina unidirecional.

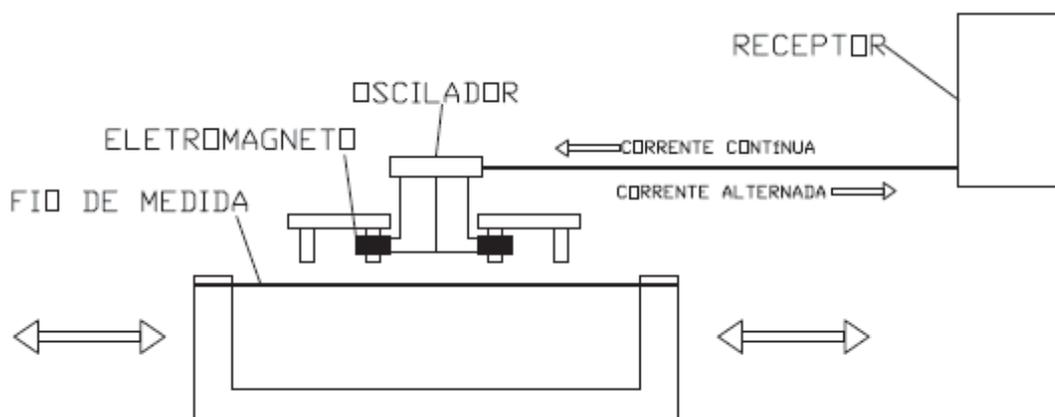
Figura 9. Extensômetro de lâmina (*Strain gage*).



Fonte: Adaptado de [http://cerulean.dk/words/?page id=42](http://cerulean.dk/words/?page%20id=42)

Ainda, com relação à utilização de extensômetros, aparecem na confecção de acelerômetros os extensômetros de corda vibrante. Sua operação está baseada na construção de um invólucro fechado contendo um fio de aço, que é mantido sob tensão mecânica, além de duas bobinas eletromagnéticas. A primeira bobina tem a função de causar a vibração do fio e a outra bobina capta a vibração desta frequência. As alterações de aceleração modificam o local da corda vibrante em relação ao eletromagneto interferindo desta forma na frequência da vibração recebida pela bobina captora, alterando o resultado da frequência medida, efetivando um método que converte aceleração em frequência. A Figura 10 mostra uma disposição da montagem de um extensômetros de corda vibrante.

Figura 10. Disposição esquemática de um Extensômetro de corda vibrante.

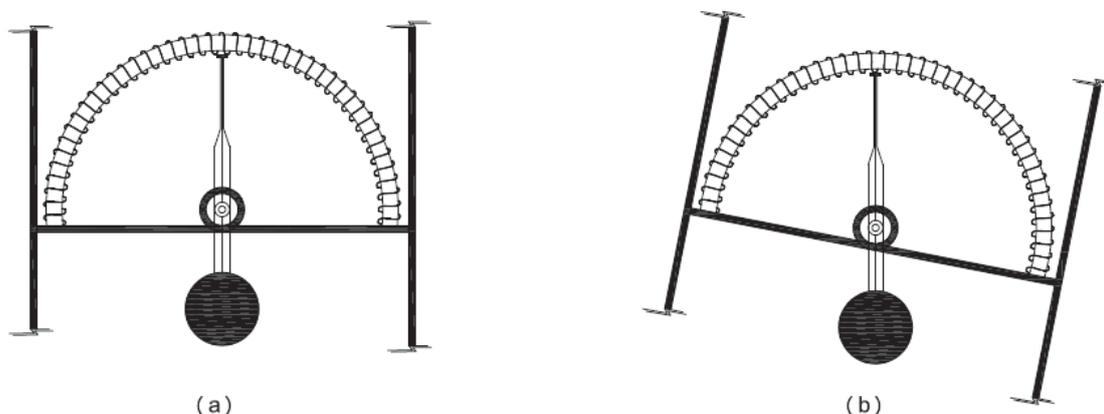


Fonte: Própria

Outro modelo simples de um acelerômetro é o sistema que opera por ação direta do movimento de equilíbrio, onde seus principais componentes são um pêndulo livre e uma bobina resistiva em forma de arco, montada sob uma base onde o centro do arco contém a articulação para a fixação central do pêndulo. Com a base em estado de repouso, isto é, na posição horizontal, o pêndulo manterá a ponta de contato elétrico sob o centro da bobina resistiva, conforme mostra a Figura 11(a). Com a inclinação da base, a ação do pêndulo é permanecer na mesma posição, levando a ponta de contato elétrico à aproximação de uma das extremidades, efetivando uma alteração do valor a ser medido na bobina resistiva, conforme mostra a Figura 11(b). Assim, é possível utilizar o valor da medição da resistência ôhmica como referência ao valor da aceleração.

Mais recentemente, devido aos avanços na eletrônica principalmente na microeletrônica e na nanoeletrônica, estão sendo desenvolvidos dispositivos com finalidades específicas que incorporam várias funções dentro de um único circuito integrado (CI). As vantagens destas tecnologias são a compactação, maior velocidade de respostas, redução em seu consumo, além da contribuição na redução do custo final de construção de equipamentos. Nesta linha, aparece a tecnologia MEMS, uma das mais recentes tecnologias da eletrônica, apresentando capacidade de redução física de dispositivos, compreendendo sistemas eletroeletrônicos e sistemas mecânicos, incorporados dentro de um único CI, operando de forma conjunta (CELESTE, 2002).

Figura 11. Inclínômetro baseado em acelerômetro de variação resistiva.



O uso de acelerômetros em medições obedece a uma condição básica, ou seja, eles somente podem efetuar medições em uma direção, sendo esta, perpendicular a seu eixo longitudinal. Entretanto, a montagem de dois acelerômetros perpendiculares entre si no mesmo inclinômetro, proporciona a medição de inclinação em dois sentidos, de igual forma, perpendiculares entre si e também perpendiculares ao eixo longitudinal de referência, comum a ambos (DUNNICLIFF, 1988).

2.6 Acelerômetros MEMS

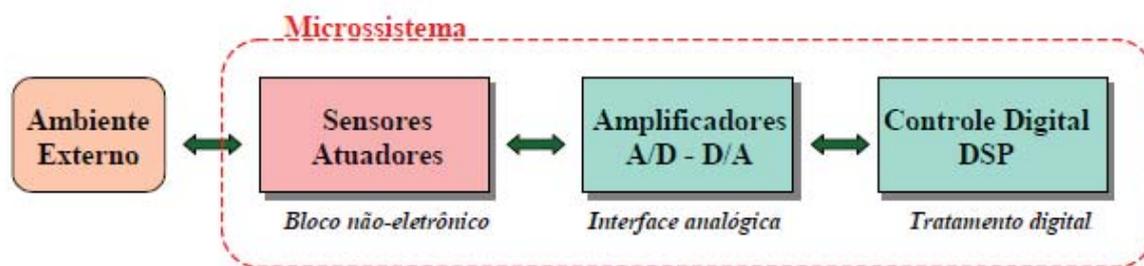
Os últimos anos foram marcados pelo advento da indústria eletrônica, com algumas décadas marcadas por alguns saltos tecnológicos como ocorreu nos anos 70, o grande marco da industrialização em série de transistores que vieram a substituir as válvulas. Já nos anos 80 o sucesso dos circuitos integrados digitais, com sua excelente confiabilidade e desempenho, além da grande capacidade de integração e redução de custo. Nos anos 90 o interesse maior ficou concentrado no desenvolvimento de microssistemas e nas micro máquinas, onde começou a utilização da micro usinagem de superfície (RIBAS, 2011).

O sistema de micro usinagem de superfície permite que sejam realizadas estruturas independentes móveis ou não, que podem ter características elétricas e ou mecânicas, possibilitando uma grande quantidade de sistemas atuadores, sensores, conversores, interfaces entre outros, tudo dentro de um único CI (RIBAS, 2011).

Embora a tecnologia de fabricação de microssistemas direcionados a sensores de pressão datam da década de 60, ainda não ocorreu uma padronização da sua nomenclatura. O termo micromáquinas (*micromachines*) apresenta sua utilização na Ásia, mas corretamente este termo se refere ao processo de micro usinagem. O termo microssistemas (*microsystems*) é utilizado preferencialmente na Europa, já nos EUA a denominação MEMS é predominante tanto para referenciar os dispositivos eletromecânicos quanto às micro usinagens. Ainda, aparece o termo MOEMS (*micro-opto-electro-mechanical systems*), onde existem componentes óticos envolvidos. Contudo, o termo MST (*microsystems technology*) é mais abrangente, mas ainda pouco difundido comercialmente (RIBAS, 2011).

Nos microssistemas, podem ser evidenciados três blocos fundamentais que são o bloco de comunicação com o meio externo que atua como o interventor, podendo ser um atuador ou um sensor dependendo da função do microssistema. O bloco do sistema de interface analógica com a função de aquisição, transmissão e amplificação dos sinais que são recebidos do sensor externo ou dos sinais que são enviados ao atuador externo e o bloco de controle, onde é realizado o processamento e tratamento numérico das variáveis envolvidas (RIBAS, 2011). A Figura 12 apresenta os blocos dos sistemas individuais e as interligações de um Microssistema.

Figura 12. Visualização esquemática dos blocos internos de um microssistema



Fonte: RIBAS, 2011

Utilizando a Figura 12 para explicar o funcionamento de um microssistema, que a partir de agora será apenas definido como MEMS, salienta-se inicialmente que se deve ter o entendimento que um CI MEMS apresenta operação bilateral, ou seja, opera tanto como transdutor quanto atuador, como é possível verificar na ligação bilateral entre o ambiente externo e o bloco dos sensores/atuadores. A ligação bilateral assegura que informações poderão ser enviadas do ambiente externo para o bloco sensor ou o bloco atuador poderá enviar ações para o ambiente externo. De mesma forma, há uma ligação bilateral entre os blocos de sensores/atuadores e o bloco de amplificadores, onde neste trecho somente ocorrem sinais analógicos. Assim, o bloco amplificador poderá através de um conversor analógico/digital (A/D) receber informações do bloco sensor e enviar para o bloco de controle digital, ou através de um conversor digital/analógico (D/A) receber as informações do bloco de controle digital e enviar ao bloco atuador. Já na ligação bilateral entre o bloco amplificador e o bloco controle digital, as informações trafegam em sinais digitais, de tal forma que se as informações partem do bloco de controle digital para o bloco amplificador, o MEMS irá operar como um atuador, mas se as informações digitais

são recebidas pelo bloco de controle digital oriundas do bloco amplificador, então o MEMS irá operar como um sensor.

É evidente que a tecnologia de fabricação dos CI's está bastante avançada, entretanto, ainda há possibilidades de avanços, e estes acontecem atualmente direcionados à miniaturização e na integração dos sensores e atuadores. A integração dos CI's é desenvolvida sob duas formas principais, a híbrida e a monolítica. A forma híbrida retrata um sistema que compreende vários chips dentro de um único CI. O chip é uma estrutura monolítica, ou seja, de substrato único. Assim, a forma híbrida contém vários substratos, que neste caso possuem a função de separar os circuitos eletrônicos das estruturas micro usinadas (mecânicas). Já a estrutura monolítica apresenta toda a integração compreendida pelos sensores/atuadores e circuitos eletrônicos dentro de um único chip. Normalmente ocorre a preferência por CI's monolíticos, pois se consegue melhor integração, além das reduções com problemas de ligações entre os chip's e o aumento do rendimento para fabricações em grande escala (RIBAS, 2011).

Nas principais aplicações da tecnologia MEMS encontram-se os dispositivos térmicos, como termo elementos ou termopares e termo resistências, os dispositivos óticos, como sensores de luz e dispositivos para condicionamento de sinais óticos, os dispositivos mecânicos com construções de micromáquinas e dispositivos para microondas e rádio frequência (RF), como filtros e amplificadores, além da possibilidade de fabricação de sensores acústicos, sensores magnéticos de efeito Hall, entre outros (RIBAS, 2011).

A tecnologia MEMS está presente nas mais diversas aplicações, como em automóveis, celulares, GPS, entre outros. Construída sobre um substrato de silício ou de outro material semicondutor, apresenta além das camadas de deposições e dopagens onde se formam os componentes eletrônicos como transistores, resistores, capacitores, tiristores, portas lógicas entre outros, a confecção de micro mecanismos, como motores, engrenagens, rotores magnéticos e vários outros sistemas articulados mecanicamente. Uma aplicação de um sistema mecânico com engrenagens é mostrada na Figura 13, onde o sistema MEMS foi ampliado várias vezes (CELESTE, 2002).

Figura 13. Dispositivo mecânico montado com tecnologia MEMS



Fonte: Disponível em: <http://www.memx.com/images/ratchet.gif>

Uma das aplicações da tecnologia MEMS é o desenvolvimento de acelerômetros. Os acelerômetros apresentam seu funcionamento definido pelo movimento de uma massa, que quanto maior a massa, maior a sua sensibilidade. Atualmente são conhecidas quatro formas de construção de acelerômetros, onde tais apresentam um método capaz de converter as deformações mecânicas em sinais elétricos, são elas: utilizando capacitores variáveis, efeito piezo-resistivo, efeito piezo-elétrico e por interferência em sinais óticos (RIBAS, 2011).

Na construção de acelerômetros para detecção de deslocamentos é mais usual a utilização do método com capacitor variável. O efeito da força da aceleração ou o deslocamento angular sobre o MEMS acaba por providenciar a variação da distância entre duas placas metálicas que forma o capacitor. Estas placas apresentam construções sob faces paralelas, sendo uma placa fixa e outra placa móvel, assim, a variação da distância entre as placas evidenciará uma variação da capacitância do capacitor, o que é facilmente detectado por um circuito eletrônico. A única desvantagem da construção de acelerômetros capacitivos é o consumo de energia associado aos mesmos, pois sempre há necessidade de alimentar o capacitor repondo a energia perdida pelas perdas dielétricas (RIBAS, 2011). Com relação ao valor da capacitância de capacitores de placas paralelas, determina-se o seu valor através da Equação 7, onde fica evidenciada a dependência da capacitância com

relação a distância entre as placas paralelas do capacitor. A equação 7 determina o valor da capacitância "C" em picofarad "pF", através do conhecimento da permissividade dielétrica do meio que isola as duas placas paralelas " ϵ " tendo este valor encontrado em tabela, também pelo conhecimento da área das duas placas em presença do campo elétrico "S" dada em cm², pela distância entre as placas do capacitor "d" dada em cm e pelo número de placas paralelas que formam o capacitor "N" (SARAIVA, 1988).

$$C = \epsilon \frac{S}{d} (N - 1) \quad (7)$$

Na construção de acelerômetros baseados nos efeitos piezo-resistivo e piezo-elétrico, ocorre uma conversão de um esforço mecânico em um sinal elétrico. Nos sistemas com efeito piezo-resistivo haverá a alteração da resistência elétrica de um elemento quando este for submetida a um esforço mecânico. Já para o efeito piezo-elétrico, haverá uma alteração na geração de tensão de um elemento quando este for submetido a um esforço mecânico. Para o caso do efeito piezo-resistivo ocorre o inconveniente do consumo de energia permanente, caracterizado pela circulação de corrente sob a resistência. O efeito piezo-elétrico apresenta a sua grande vantagem no baixo consumo de energia, tendo em vista que o sensor é um gerador de tensão elétrica (RIBAS, 2011).

Ainda, existem os acelerômetros que operam por interferências em sinais óticos. Estes acelerômetros apresentam como característica de funcionamento a alteração da sua aceleração ou da sua angulação de referência variando a inclinação de um micro espelho que reflete uma luz emitida de uma fonte luminosa interna a um sensor fotossensível. Com a variação do ângulo do espelho, a intensidade luminosa chega ao sensor fotossensível com amplitude diferente, produzindo um sinal elétrico variável conforme a inclinação do micro espelho (RIBAS, 2011).

Efetuada uma análise sobre os tipos de construção de transdutores MEMS para função de acelerômetro, é possível afirmar inicialmente que, na configuração com transdutores piezo-elétrico, o consumo elétrico do sistema será reduzido em relação aos demais, apresentando vantagem sobre os demais. Entretanto, é necessário uma análise mais aprofundada com relação a complexidade de construção, evidenciando também a compactação, precisão, exatidão, entre outros.

2.7 Componentes e tecnologias de um inclinômetro

Como já definido no item 2.4, o inclinômetro é um dispositivo que possibilita verificações e medições de inclinações. Mas, para alguns instrumentos denominados de inclinômetros a sua condição operacional apresenta outras características incorporadas além de puramente medir inclinação. Este é o caso dos inclinômetros utilizados na verificação de movimentos de massas em locais com formações de taludes. Para este caso, o inclinômetro deve apresentar características específicas ao seu uso, além de conter elementos construtivos específicos.

O primeiro componente a ser definido é o tubo guia, que também é denominado de invólucro guia e serve como superfície base para a medição quando da passagem da sonda, visto que, é o elemento a sofrer deformação com o movimento das massas em sua periferia externa. O tubo guia é instalado de maneira definitiva no solo, apresentando como principais características a presença de ranhuras guias em sua parte interna, as quais tem a função de manter uma orientação definida para a passagem da sonda ao longo de seu comprimento. Podem ser encontrados tubos guias com apenas duas ranhuras deslocadas de 180° entre si, e tubos guias com quatro ranhuras deslocadas de 90° entre si. A razão para o diferente número de ranhuras é a possibilidade de efetuar medições em diferentes direções, assim, tubos de duas ranhuras normalmente estão direcionados a efetuar medições no sentido direto aos esforços suportados pelo talude. Já os tubos de quatro ranhuras possibilitam efetuar medições na direção direta e transversal aos esforços suportados pelo talude (DUNNICLIFF, 1988). Os tubos guias devem possuir também resistência mecânica adequada ao tipo de solo e ao mesmo tempo flexibilidade para acompanhar os movimentos dos solos circunvizinhos. Os tubos guias são normalmente confeccionados de material plástico, comumente ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), fibra de vidro, liga de alumínio ou aço. Atualmente, a maior parte dos casos os tubos guias são de ABS, pois apresentam boa maleabilidade, suportam variação de temperatura, apresentam baixo envelhecimento com o tempo, construção fácil dos canais guias e fácil manipulação. Suas dimensões padrões encontram-se entre as medidas de 40 mm a 90 mm de diâmetro interno (STARK, 2006 apud AMBRAMSON et. al. 2002).

A instalação dos tubos guias pode ocorrer durante o levante da obra, como por exemplo, durante a construção de uma represa com barragem de enrocamento, onde o

tubo guia é emendado conforme o talude é levantado, ou ainda, a sua instalação poderá ocorrer após a conclusão da obra, fazendo a perfuração do solo para a inserção do tubo guia com posterior reaterro entre o solo natural que foi perfurado e o tubo guia. Este caso é típico de monitoramentos de taludes de estradas e de encostas de morros, onde ocorrem apenas cortes no terreno. Este reaterro deve ser realizado com solo natural ausente de pedras e partículas sólidas, que em conjunto com a água farão uma sedimentação uniforme e a eliminação de possíveis vazios. Após a sedimentação do reaterro é necessário aguardar a água utilizada dispersar-se e o solo adquirir uma resistência uniforme, só então é possível realizar a primeira medição no local (DUNNICLIFF, 1988).

Idealmente, durante a instalação do tubo guia, deve ocorrer a ancoragem da extremidade inferior do mesmo na rocha, definindo este como um ponto fixo, assim como, a extremidade superior deve receber uma estrutura em concreto, aumentando assim a área de contato com o solo superior, condicionando este a um movimento sincronizado ao solo da superfície (DUNNICLIFF, 1988). A Figura 14 mostra um ponto de um tubo guia instalado durante a obra do aterro para a construção da Autoestrada A10, em Portugal, onde é possível verificar a estrutura de concreto que cerca a extremidade superior de um tubo guia.

Figura 14. Vista de um tubo guia instalado em uma obra de aterro



Fonte: CARDOSO, 2011

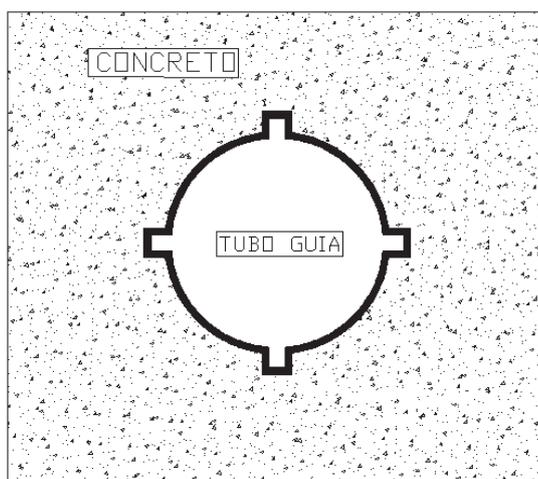
Nas características aplicativas dos inclinômetros a escolha do tubo guia depende de uma pré-análise dos movimentos e esforços que estão sujeitos a agirem sobre o mesmo.

Algumas condições são descritas e justificam a escolha do tipo de tubo guia (DUNNICLIFF, 1988 ; STARK, 2006):

1. A possibilidade de aparecimento de esforços axiais que podem ser de compressão ou extensão, onde justifica para estes casos a escolha de tubos telescópicos.
2. Para solos muito macios os tubos deverão possuir grande maleabilidade, mas também devem apresentar grandes diâmetros originais, impedindo que nestas regiões de cisalhamentos do solo ocorra a redução do diâmetro do tubo, o que poderá impedir a passagem da sonda, a perda do local de medição e do histórico das movimentações transversais deste local.
3. No caso de longevidade das medições, os tubos de ABS representam a escolha preferencial, pois os mesmos são menos susceptíveis a alcalinidade e mudança de pH.
4. Mesmo nas aplicações de grande profundidade os tubos de ABS podem ser utilizados, pois os mesmos suportam grandes pressões axiais.
5. O reaterro ou enchimento entre o poço perfurado e o tubo guia pode ser efetuado por argamassa, solo, areia, ou material granular de espessura maior que grãos de areia.
6. Qual o custo avaliado entre as melhores alternativas de tubos guias.

Em situações onde é necessária a perfuração do solo para inserção do tubo guia e, se durante a inserção do invólucro guia ocorreram dificuldades de instalação, bem como, onde o tubo supera os 60 m de profundidade, é recomendada a realização da vistoria de rotação do tubo guia. A rotação do tubo guia pode ocorrer devido a baixa resistência mecânica das paredes do mesmo, agravados pelo longo comprimento, e necessidade de auto sustentação em alguns casos, tende a rotacionar. Para isto, deve ser utilizada uma sonda específica capaz de determinar se houve ou não rotação, onde devem ser definidos os locais onde ocorram as rotações, o ângulo que foi rotacionado, bem como o sentido da rotação. Como a especificação e técnicas dos métodos de instalação não são foco específico nesta dissertação, recomenda-se uma leitura dos detalhamentos de uma instalação de tubos guias, que é normalmente encontrada nos manuais de instrução de vários fabricantes (SILVEIRA, 2003). Uma vista superior de um tubo guia de quatro ranhuras guias é apresentada na Figura 15.

Figura 15. Tubo guia de quatro ranhuras com sua parte superior concretada



O segundo componente a ser definido é a sonda, que também é identificado por *probe* ou torpedo e que neste trabalho é denominada de sonda. Sua estrutura, construída em aço inox possui internamente um dispositivo ou transdutor responsável pela conversão do ângulo de inclinação do corpo da sonda em relação a vertical gravitacional em uma grandeza normalmente elétrica que pode ser tensão, corrente ou resistência. Este sinal elétrico é enviado à interface de leitura para ser convertido em ângulo ou deslocamento. A sonda excursiona sobre a parede interna do tubo guia através de seus rodízios guias, que são adequados a encaixar nas ranhuras do tubo guia. Os rodízios possuem molas tensionadoras que mantêm uma força sobre a parede interna do tubo guia, assim, a sonda poderá se deslocar livremente dentro do tubo guia, mantendo-se orientada sob a ranhura guia, proporcionando a realização das medições de inclinação. Todavia, a inserção da sonda em um tubo guia de quatro ranhuras guias, deve coincidir com a medição desejada, ou seja, na direção direta ou transversal ao esforço no talude. É fato que já existam sondas que possuam capacidade de efetuar duas medições de inclinação ao mesmo tempo, sendo estas transversais entre si. Um modelo desta sonda é mostrado na Figura 16, onde é possível verificar a presença dos quatro rodízios guias e o tubo de aço inox que forma o corpo da sonda, embora não seja possível a verificação do transdutor de medição de inclinação que proporciona as medições transversais (DUNNICLIFF, 1988).

Figura 16. Sonda ou torpedo de um inclinômetro



Fonte: GEOKON, 2011

Atualmente as sondas apresentam no seu dimensional externo distâncias entre os rodízios superiores e rodízios inferiores de 0,5 m e 1,0 m, tendo o seu corpo em formato cilíndrico com diâmetro externo de 25 mm. Internamente ao corpo da sonda encontra-se o sensor ou transdutor de inclinação que atualmente utilizam servos acelerômetros, acelerômetros MEMS, extensômetros de corda vibrante e extensômetros de lâmina (STARK, 2006).

O terceiro componente definido é a interface de leitura ou interface homem-máquina (IHM). Esta é responsável pela conversão do sinal elétrico enviado pela sonda através do cabo elétrico em um valor que é normalmente em graus geométricos relativos ao eixo vertical ou até em valor de deslocamento horizontal. É responsável, também, por apresentar este valor de medição ao usuário, fornecer a alimentação elétrica da sonda e possibilitar o armazenamento dos valores das medições em uma memória interna, para posterior utilização destes valores. A Figura 17 apresenta um equipamento de leitura para sondas de inclinômetros da Geokon, modelo GK603. Os equipamentos portáteis de leitura são projetados para serem conectados em sondas específicas, isto é, não é possível utilizar a sonda de um modelo ou fabricante com o equipamento de leitura de outro modelo ou fabricante, principalmente nos casos de tecnologias diferentes.

Figura 17. Interface de um inclinômetro



Fonte: GEOKON, 2011

O quarto elemento é o cabo, embora não seja especificamente um equipamento. O cabo elétrico que interliga a sonda à interface de leitura é uma das principais partes que constitui um inclinômetro. O cabo elétrico é responsável por fornecer o caminho para a alimentação elétrica da sonda, e pela o envio dos dados da medição realizada pela sonda, além de sustentar a sonda suspensa durante o procedimento de medição. Nos atuais modelos, o cabo elétrico possui marcações regulares de comprimento ao longo de sua extensão, onde estas condicionam a efetivação da medição de inclinação nestes específicos pontos, além de proporcionar a realização da medição da profundidade da sonda. Cabe salientar que as marcações regulares ao longo do cabo devem apresentara a mesma distância existente entre os rodízios superiores e rodízios inferiores da sonda. Normalmente, este cabo é acondicionado em um rolo como mostra a Figura 18, onde há um menor risco de dano ao cabo elétrico, bem como facilita o lançamento e o recolhimento do mesmo.

Figura 18. Cabo elétrico acondicionado em rolo



Fonte: GEOKON, 2011

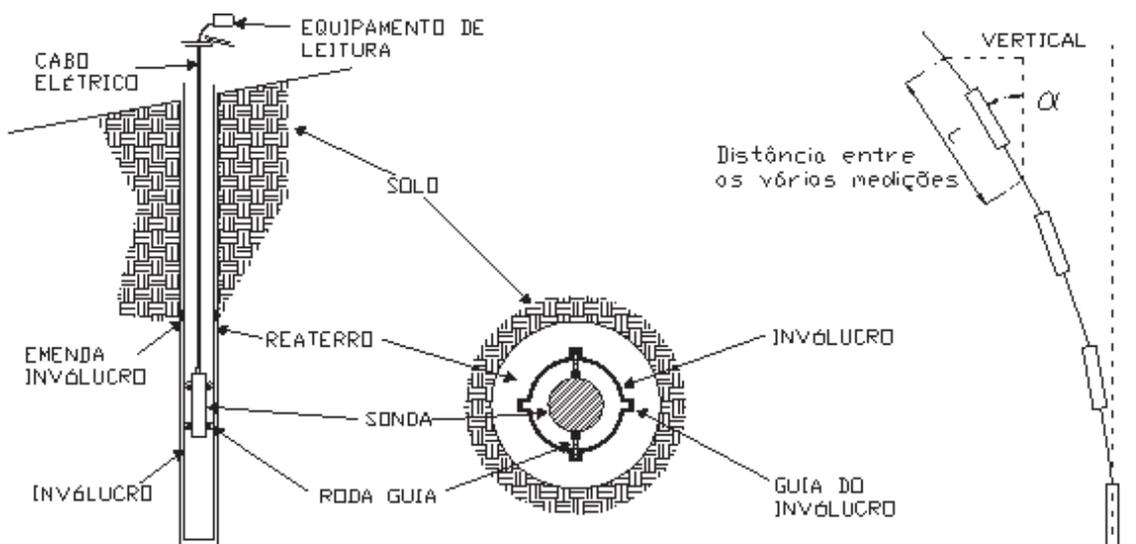
Outro item que constitui os inclinômetros, embora não apresente uma construção física é o programa de uso no PC. O Programa é utilizado para realizar as verificações comportamentais das medições realizadas pelo inclinômetro, através de visualizações gráficas e que pode contemplar comparações com medições realizadas em momentos anteriores. Para isto, é necessário que previamente ocorra o envio dos dados das medições da IHM para o PC através de um sistema de comunicação.

Por fim, podem ser evidenciados ainda com relação às características construtivas dos inclinômetros, os conectores instalados nas extremidades do cabo elétrico, na sonda e na interface de leitura. Os conectores são necessários para que o lançamento e o recolhimento do cabo sejam realizados com o leitor desconectado, pois o lançamento em rolo provoca movimentos rotatórios que produzem a torção do cabo em relação ao leitor portátil, além também de possibilitar desacoplar os elementos que constituem o inclinômetro, facilitando seu transporte.

Uma forma esquemática da instalação de um sistema de medição de inclinação é apresentada na Figura 19. Nesta, é possível visualizar todas as partes envolvidas no sistema de medição, onde na vista em corte é visualizado o tubo guia instalado no solo com a sonda em seu interior, o equipamento de leitura (IHM) na parte externa do tubo guia, o cabo elétrico interligando sonda e a IHM. Junto a Figura 19 ilustra esquematicamente as

condições de medições efetuadas pelo inclinômetro, onde aparece a distância entre as medições “L” e o ângulo “ α ” formado entre o corpo da sonda e a vertical gravitacional.

Figura 19. Visualização esquemática da instalação do sistema de medição de inclinação



Fonte: Adaptação de DUNNICLIFF, 1988

Verifica-se que o funcionamento do inclinômetro é baseado na deformação transversal ao eixo de seu tubo guia, através da medição angular interna das paredes deste tubo guia em relação a vertical gravitacional, quando da passagem da sonda ao longo do mesmo. Esta sonda contém um transdutor de gravidade capaz de efetuar a medição da inclinação com o eixo vertical, produzindo um valor de tensão, corrente ou resistência elétrica proporcional ao valor desta inclinação. Este sinal elétrico é então levado pelo cabo elétrico da sonda até a IHM, onde esta converte, apresenta e armazena os valores medidos (DUNNICLIFF, 1988).

2.8 Características dos inclinômetros comerciais

Atualmente empresas especializadas na construção de equipamentos para medições e ensaios geotécnicos, oferecem os inclinômetros para a comercialização, onde podem ser citadas como exemplo a *GEOKON Incorporated* e a *RST Instruments*. Como visto anteriormente, o inclinômetro é formado por várias partes e cada uma apresenta alguma especificidade. Para uma proposta de melhorias, foi analisado individualmente cada parte formadora do inclinômetro, iniciando pela sonda.

As sondas comerciais diferem entre fabricantes e ainda entre modelos de um mesmo fabricante, mas em média possuem distância entre os rodízios inferiores e rodízios superiores de 0,5 m e 1m, o diâmetro de seu corpo é de 25 mm, com construção toda em aço inox e índice de proteção IP 67, definido para imersão temporária. As sondas também apresentam capacidade para deslocamento dentro de tubos que variam entre 51 mm e 89 mm de diâmetro interno. Em média, seu alcance de medição é entre $\pm 40^\circ$ com relação a vertical gravitacional, apresentam resolução que varia entre 0,025 mm/500 mm e 0,005 mm/500 mm, possuem exatidão variando entre 4 mm/30 m e 6 mm/30 m, alcance térmico entre 0°C e +50°C, repetibilidade de ± 1 mm/30 m, linearidade de 0,02% e sua massa pode variar entre 1,4 Kg e 7,5 Kg.

Atualmente para todos os tipos de sondas de inclinômetros comerciais é obrigatória a utilização de IHM específica, sendo esta responsável pelo fornecimento da alimentação elétrica da sonda, recebimento e conversão do sinal elétrico provindo do transdutor da sonda e ainda, apresentar ao usuário e guardar em memória os dados já convertidos. As mais modernas IHM's apresentam processador de 520 MHz, memória *flash* de 512 Mb, comunicação via RS-232, USB e *Bluetooth*, slot para cartão SD, tela *touchscreen* além de outras características.

Para a alimentação e sustentação da sonda são utilizados cabos elétricos blindados que apresentam ruptura mecânica média de 59 Kg, são construídos com fios de cobre e seu material isolante típico é poliuretano. Para realizar a conexão com a sonda, o cabo elétrico recebe um conector para ligação e sustentação da mesma, tendo este conector índice de proteção IP 67. Para acomodação e transporte do cabo elétrico é fornecido um rolo construído normalmente de material plástico, onde este pode acomodar até 100 m do cabo elétrico.

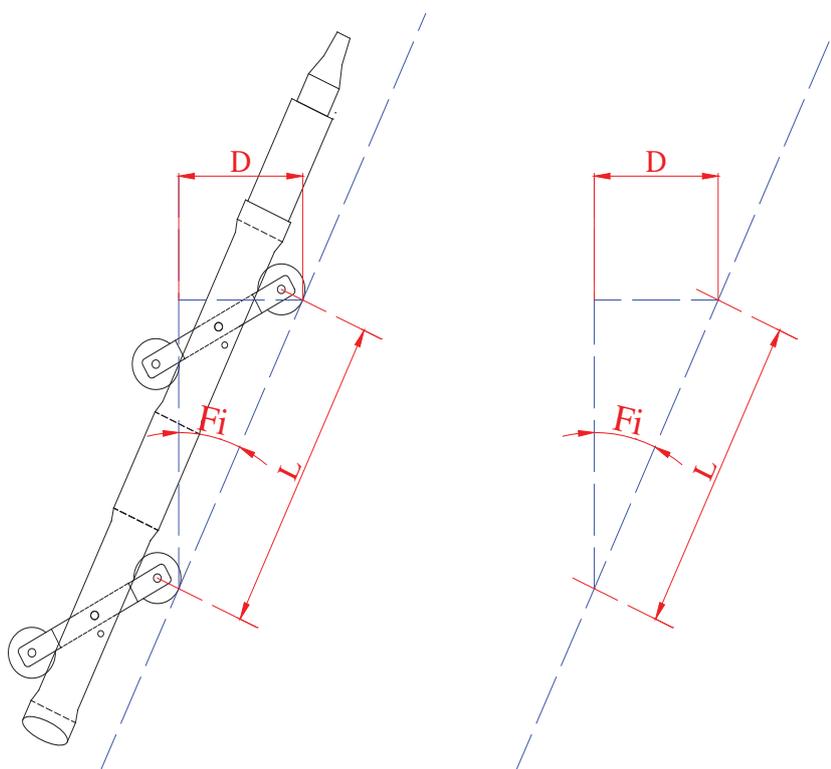
Já o programa que acompanha os inclinômetros tem a função de efetuar o processo de descarga dos dados armazenados na memória da IHM, armazenando estes no PC e liberando assim a memória da IHM para futuras medições. Para IHM's de alguns fabricantes, a descarga dos dados para o PC ainda ocorre através de cabos físicos, porém já existem descargas de dados através de comunicação sem fio. O programa também possibilita a visualização dos dados das medições de uma forma gráfica e comparativa com dados históricos já armazenados no PC.

O funcionamento dos inclinômetros comerciais obedece a um procedimento que se inicia pelo lançamento da sonda até o fundo do tubo guia a ser medido, ou seja, até a cota mais baixa do tubo guia a ser medido. Logo após, são efetuadas as conexões dos cabos do sistema e é efetuada a configuração do sistema através da IHM, a fim de inicializar o processo de medição. O procedimento segue com o deslocamento da sonda até a primeira marcação no cabo elétrico, onde é realizada uma ação em um botão da IHM que habilita a realização da medição de inclinação no ponto. Em seguida, a sonda deve ser movimentada novamente até a próxima marcação no cabo elétrico, dando repetição ao ciclo anterior. Ao final do tubo guia é configurado na IHM o fim da medição e os dados das medições são armazenados na memória interna da IHM.

2.9 Uso do inclinômetro na determinação de movimentos transversais

O inclinômetro na sua essência é um instrumento de medição que devolve o ângulo medido em relação a vertical gravitacional, mas é sabido que o inclinômetro é um instrumento de medições de deslocamentos transversais (horizontais). Assim, é necessário realizar a conversão da medida angular em medida de deslocamento horizontal. Através da teoria básica da trigonometria, é possível encontrar um lado de um triângulo sabendo o valor de outro lado e dos ângulos internos deste triângulo. A Figura 20 apresenta a situação encontrada na efetuação de medições com o inclinômetro.

Figura 20. Componentes formadas para a medição do ângulo pela sonda.



Fonte: Própria

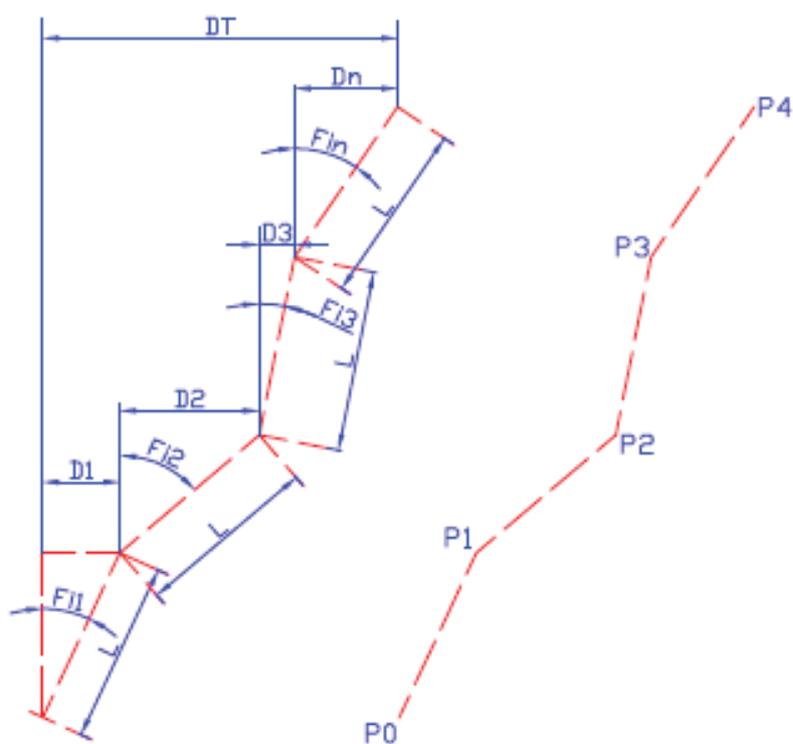
Através da Figura 20 é possível verificar as informações existentes do triângulo retângulo formado pelo corpo da sonda e a vertical gravitacional, que são o comprimento “ L ”, que é a distância entre os rodízios superiores e os rodízios inferiores, aqui definido como hipotenusa do triângulo e o ângulo “ Fi ” que é fornecido através da medição do inclinômetro, aqui definido como ângulo oposto ao deslocamento horizontal “ D ”. Desta forma, define-se pelo uso da Equação 8, proveniente da função seno, a qual devolve o valor de “ D ”, a partir do conhecimento do comprimento “ L ” e do ângulo “ Fi ” (DUNNICLIFF, 1988).

$$D = L \cdot \text{sen}(Fi) \quad (8)$$

Para a obtenção da máxima exatidão, os intervalos de medições decorridos da sonda deverão ocorrer distanciados de mesmo valor das distâncias das rodas guias da sonda (DUNNICLIFF, 1988). Esta afirmativa é verdadeira, haja vista, que as medições sequenciais levam a um acumulado total do deslocamento horizontal que é dado pelo

somatório algébrico de todos os valores de "D" provindos dos "n" triângulos formados durante a medição pelo tubo guia, conforme ilustrado na Figura 21 (DUNNICLIFF, 1988).

Figura 21. Medições acumuladas pelo inclinômetro.



Fonte: Própria

Logo, evidenciando a condição de que o deslocamento total ilustrado na Figura 21 que é dado por "DT" é a soma de todos os deslocamentos "D1,D2,D3,Dn" provindo das medições dos ângulos "F_{i1},F_{i2},F_{i3},F_{in}", é possível escrever a Equação 9.

$$DT = \sum_{i=1}^n (L \cdot \text{sen} F_{i_i}) \quad (9)$$

Verifica-se através da Equação 9, que a exatidão do resultado de "DT" está baseada na condição de quão exato é a medida do ângulo e pela exatidão da medida entre os rodízios da sonda do inclinômetro, já que estes são as variáveis da equação. Entretanto, é evidente que a exatidão está relacionada com o ponto onde ocorrem as medições, já que o local onde é posicionada a sonda do inclinômetro será o local onde se efetivará a medição do ângulo. Assim, conforme a Figura 21, a medição do ângulo "F_{i1}" ocorre quando a sonda do inclinômetro é posicionada com seus rodízios nos pontos "P0 e P1". Para a

medição sequente do ângulo " $Fi2$ ", a sonda do inclinômetro deverá ser posicionada com seus rodízios nos pontos "P1 e P2", fazendo com que o ponto de referência final da medição do ângulo " $Fi1$ ", rodízio superior, seja o ponto de referência inicial da medição do ângulo " $Fi2$ ", rodízio inferior e assim, sucessivamente.

Verifica-se desta forma que o valor de DT calculado através dos valores das medições provindos do inclinômetro, acaba por resultar em um processo de medição por aproximações lineares, visto que, toda a extensão medida é dividida em seções de comprimento igual à distância dos rodízios e os intervalos entre os rodízios são considerados segmentos de reta. Assim, a condição de exatidão máxima evidenciada na Equação 14 ocorrerá quando os segmentos de retas se tornarem pontos, ou seja, quando tender o valor do comprimento "L" tender a zero, conforme a Equação 10.

$$DT = \sum_{i=1}^n \lim_{L \rightarrow 0} (L \cdot \text{sen} Fi_i) \quad (10)$$

A análise que converge a Equação 10 quantifica que quanto menor for o comprimento "L" mais precisa a medição com o inclinômetro. Entretanto, existem outros erros envolvidos nos processos de medições, neste sentido é adequada uma revisão nas suas teorias.

2.10 Revisão de erros

Sempre que se abordam resultados de medições é comum utilizar termos como precisão e exatidão de uma forma indistinta, mas estes termos são distintos, logo é importante ter o conhecimento claro da resolução, precisão e exatidão.

A resolução de um instrumento de medição é a menor parcela que pode ser medida por este instrumento. Assim, se um instrumento possibilitar a medição em fundo de escala de uma tensão igual a 100 V e sua resolução for de 0,02 V/100 V, é afirmativo que o mesmo tenha uma possibilidade de efetuar 5000 leituras diferentes entre seu zero e sua medida máxima que é igual a 100 V. A influência da resolução no erro que pode ocorrer em uma medida é variável, pois para um valor de tensão de 99,01 V a medida mostrada pelo instrumento pode ser 99,00 V ou 99,02 V, efetivando neste caso um erro de 0,01 %.

Agora se o valor da tensão a ser medida é de 1,01 V a medida mostrada pelo instrumento pode ser 1,00 V ou 1,02 V, efetivando neste caso um erro muito próximo de 1 %. É evidente neste caso, que para redução nos erros das medições, os instrumentos devam ser utilizados para leituras próximas a seu fundo de escala (MEDEIROS, 1981).

Precisão é a característica de um instrumento de medição que exprime o distanciamento mútuo de várias medições efetuadas em uma medida de referência com relação à média aritmética de todas as medições realizadas. Basicamente, é a condição que define a possibilidade de repetição da medição em encontrar o mesmo valor (MEDEIROS, 1981).

Exatidão é a característica de um instrumento de medição que exprime o máximo desvio entre a medida real de referência e o valor indicado pelo instrumento de medição. No caso de instrumentos de medição a exatidão é a mais importante e representativa influência na busca correta do valor medido (MEDEIROS, 1981).

Contudo, os erros que incorporam a medida podem ser classificados em erros grosseiros, erros sistemáticos e erros acidentais.

Os erros grosseiros são os erros cometidos pelo operador, onde os mais comuns são a troca na posição dos algarismos, troca da posição da vírgula, enganos em operações elementares. Em sistemas que efetuam o armazenamento dos valores lidos diretamente pelo seu próprio sistema, não ocorrem erros grosseiros (MEDEIROS, 1981).

Os erros sistemáticos ocorrem devido às condições de deficiência do instrumento de medição ou do método utilizado para realizar a medição. Encontram-se nestes erros a falta de aferição do equipamento, a fonte de alimentação (pilhas) estar com baixa capacidade entre outros, são erros que são controláveis se for efetuada uma sistemática de aferição do equipamento e uma verificação na capacidade de seu sistema de bateria (MEDEIROS, 1981).

Os erros acidentais ocorrem quando em um mesmo ensaio não se consegue encontrar os mesmos valores nas medições. Normalmente, relaciona-se esta condição a casos como maus contatos em um circuito elétrico, influências externas como vibração, som, entre outros (MEDEIROS, 1981).

Os erros de certa forma acabam sendo controláveis através de ações do usuário do equipamento e o que acaba por trazer divergência no resultado medido para o resultado real é então a resolução, exatidão e precisão do equipamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Tipo da pesquisa

O tipo da pesquisa é definido como aplicada, tendo como início um estudo de um material referencial direcionado à aplicação e construção de um inclinômetro, no qual é fundamentada a construção de um sistema de medição de inclinação em taludes (SADi).

Os conhecimentos adquiridos no material referencial, também são elementos fonte que contribuem na definição das alterações efetivadas no processo de construção, direcionando estas melhorias e as inovações tecnológicas disponíveis no mercado na construção do novo sistema SADi, buscando desta forma uma maior agilidade na efetuação das medições, uma menor chance de ocorrerem erros grosseiros e ao final possibilitar a redução do custo de construção do sistema como um todo.

3.2 Método da pesquisa

Foi formada primeiramente a base de dados sobre o inclinômetro, passando para a análise dos pontos factíveis de melhorias e a busca das tecnologias atuais passíveis de aplicação, prosseguindo com a construção de forma individualizada de cada uma das partes que são a sonda, a IHM, o cabo e o programa, efetuando os ensaios do sistema inicialmente de forma individualizada para somente após unir as partes e formar o SADi na configuração proposta.

4 DESENVOLVIMENTO DO SADI

4.1 Definições construtivas do SADI

4.1.1 Sonda

Para projetar a sonda, tomou-se como ponto de início a determinação do transdutor de inclinação a ser utilizado. Com o intuito de redução no tamanho da sonda, buscou-se um transdutor pequeno. A opção adequada foi a tecnologia MEMS, pois apresenta características para uma construção compacta da sonda. Ainda, o transdutor deve apresentar alguns requisitos mínimos definidos para o desenvolvimento, como alcance de medição entre -50° e $+50^\circ$, medições em dois eixos ortogonais entre si, possibilitar o envio dos dados das medições por canal serial. Foram analisados três transdutores, sendo eles os inclinômetros MEMS SCA100T-D01 e SCA100T-D02, ambos fabricados pela *VTI Technologies* e o acelerômetro MEMS ADXL330 fabricado pela *Analog Devices*.

Foram realizadas as análises e comparações entre os três transdutores e os fatores determinantes para a escolha do SAC100T-D02 foram o alcance de medição do SAC100T-D01 limitado a -30° e $+30^\circ$ e a não existência de um canal serial para envio das medições no ADXL330. Ressalta-se que ambos os transdutores descartados apresentam características melhores como resolução, linearidade e exatidão quando comparado ao SCA100T-D02.

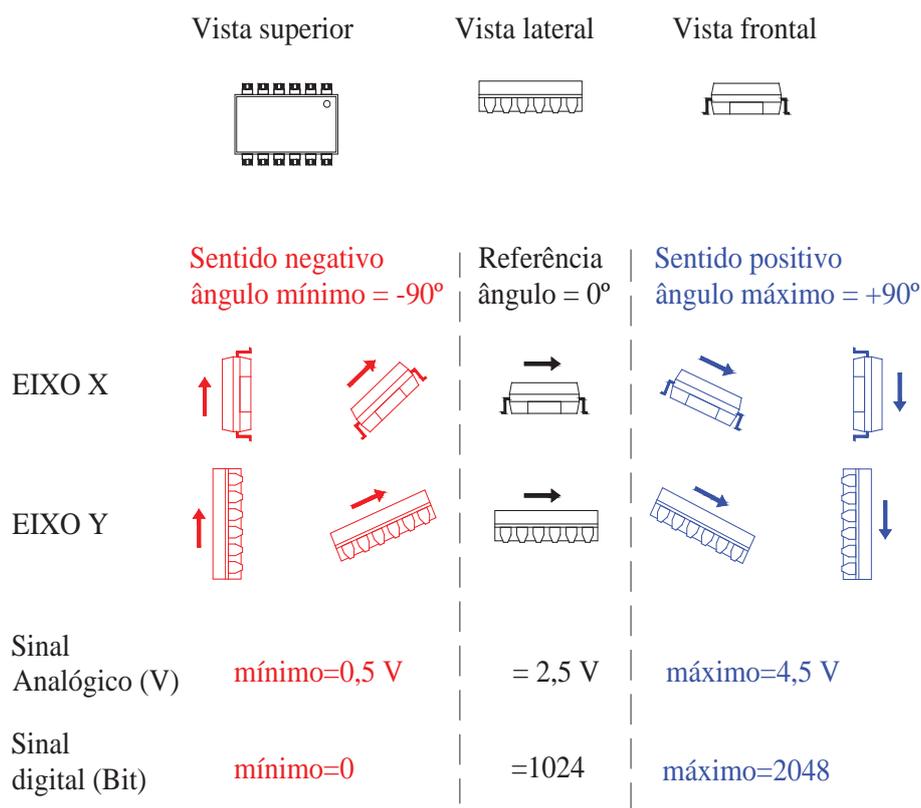
As principais informações sobre o SCA100T-D02 fornecidas pelo fabricante são:

- Alcance de medição: $\pm 90^\circ$, $\pm 1g$;
- sensibilidade analógica gravitacional: 2 V/g
- sensibilidade analógica angular: 35 mV/ $^\circ$
- resolução digital: 0,07 $^\circ$ /LSB (*);
- resolução analógica: 0,0025 $^\circ$;
- típica não linearidade: $\pm 0,57^\circ$;
- temperatura de operação: -25°C a $+85^\circ\text{C}$;
- corrente de consumo típica: 4 mA.

(*) LSB – (Least Significant Bit) É o bit menos significativo de uma palavra digital, ou seja, é a menor divisão possível de um sinal digital.

O SCA100T-D02 é um acelerômetro desenvolvido propriamente para operar como inclinômetro, que possibilita medições de inclinação em dois eixos perpendiculares entre si e de forma independente, denominados de eixo X e eixo Y. Ainda, o SCA100T-D02 apresenta a sua referência de medição angular ao eixo vertical gravitacional, tendo como sua referência física construtiva a base de seu invólucro. Assim, a variação da medida de inclinação ocorre com a inclinação do encapsulamento do mesmo. Com relação ao sinal elétrico de saída fornecido pelo SCA100T-D02, são disponibilizados dois sinais analógicos, onde sua tensão varia de amplitude com relação a variação do ângulo do invólucro para eixo X e eixo Y e também um sinal digital, através de seu canal serial. O SCA100T-D02 apresenta a possibilidade de medições entre -90° e $+90^\circ$ em seus dois eixos, conforme demonstrado através da Figura 22.

Figura 22. Direções das medições do SCA100T-D02.



Conforme a Figura 22, as posições centrais são condições de ângulo zero para os eixos X e Y, situações estas onde os sinais de saída são levados ao valor médio de seu excursionamento máximo.

Uma característica importante do SCA100T é a sua condição de não poder atingir as medições angulares extremas de seu alcance para a mesma aplicação, ou seja, em um mesmo eixo realizar medições desde -90° até $+90^\circ$. O ângulo máximo de medição do SCA100T-D02 pode ser definido através da divisão da tensão máxima de excursão do sinal de saída que é de 4 V pela sensibilidade analógica angular que é de $35 \text{ mV}/^\circ$, resultando em $114,28^\circ$, ou seja, se for necessária a aplicação de um sistema de medição com zero central, o alcance do sistema será de $-57,14^\circ$ até $+57,14^\circ$. Esta situação não desqualifica o SCA100T-D02 da sua aplicação, pois os limites de medições foram estipulados em $\pm 50^\circ$.

Para determinar o ângulo do encapsulamento do CI a partir do conhecimento do sinal elétrico de tensão presente em uma das saídas o fabricante orienta a utilização da Equação 11, onde o ângulo " Fi " é determinado pelo arco seno "*arcseno*" da tensão de saída do canal analógico " $Vout$ ", subtraída da tensão para o ângulo zero " $Voffset$ " e dividindo este resultado pela sua sensibilidade "*sensibilidade*". Para o SCA100T-D02, os valores das constantes são: "*offset*" de 2,5 V e "*sensibilidade*" 2 V/g.

$$Fi = \arcseno\left(\frac{Vout - Voffset}{sensibilidade}\right) \quad (11)$$

Ainda, há a opção em utilizar o resultado das medições do SCA100T-D02 através de seu canal de saída digital, provindo de uma saída de comunicação SPI "*Serial Peripheral Interface*", que é um padrão de comunicação serial onde para o SCA100T-D02 o sinal digital está convertido em uma palavra de 11 bits. As muitas facilidades de utilização do canal serial SPI, somadas as reduções das interferências sofridas pelos sinais enviados, são justificativas para a utilização do mesmo em comparação aos sinais analógicos. Esboçando a condição prática para a aplicação, determina-se o máximo possível de combinações para uma palavra de 11 bits pela Equação 12, onde o número de combinações " Cb " é igual a base da lógica binária "2" elevado ao número de bits da palavra " nb ".

$$Cb = 2^{nb} \quad (12)$$

Substituindo na Equação 12 o valor do número de bits por 11, obtém-se 2048 possibilidades de combinações, sendo 1024 para o sentido positivo e 1024 para o sentido negativo da medição. Ainda, o fabricante informa que a resolução digital é de $0,07^\circ/\text{LSB}$, o

que proporciona um alcance total de medição angular de $143,36^\circ$, determinado pela multiplicação do número de combinações pela resolução. Desta forma é evidenciado um alcance da medição digital superior ao alcance da medição angular analógica. Mas isto não procede desta maneira e a explicação pode ser realizada utilizando a Equação 13, a qual é disponibilizada pelo fabricante para encontrar o ângulo medido a partir do sinal digital.

$$Fi = \arcseno\left(\frac{Bout - Boffset}{sensibilidade}\right) \quad (13)$$

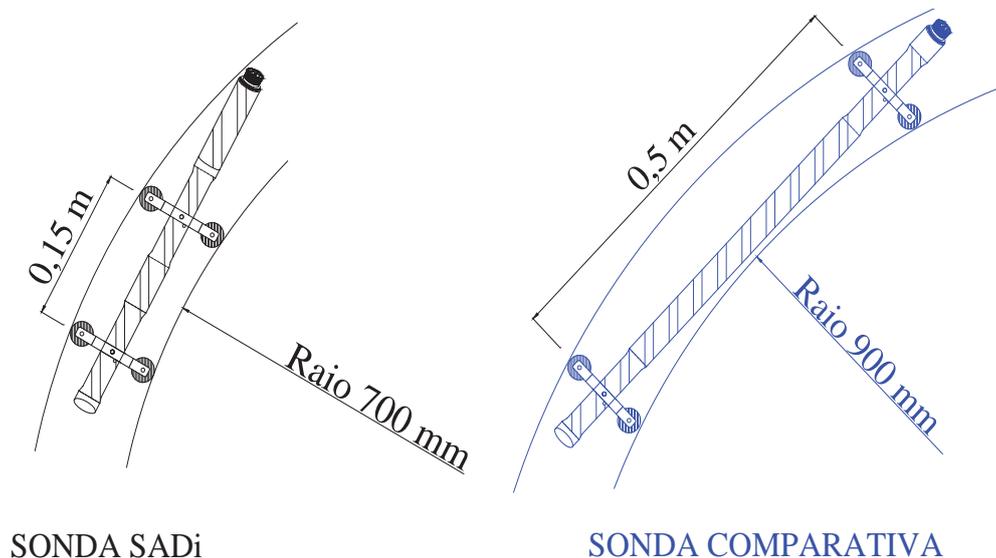
No caso de utilização da Equação 13, tem-se o ângulo " Fi " determinado pelo *arcoseno* do número de bits menos significativos da palavra digital " $Bout$ ", subtraído do número de bit para ângulo zero " $Boffset$ " que é de 1024 e dividindo este resultado pela sua sensibilidade "*sensibilidade*" que é de 819. Para a aplicação de qualquer um dos extremos da palavra digital de 2048 bits na Equação 13 um erro matemático ocorre, já que o valor da divisão dos elementos dentro dos parênteses da equação será maior que um. A Equação 13 somente será válida se o numerador da divisão for menor ou igual a 819. Logo, se 2048 bits totalizam o alcance da medição em $143,36^\circ$, então para 819 bits para cada sentido de medição é totalizado 1638 bits e aplicando um cálculo de regra de três simples o valor do alcance de medição passa a ser de $114,66^\circ$, ou seja, o mesmo valor do alcance definido pelo sinal analógico que é de $114,28^\circ$.

Ainda, sobre o SCA100T-D02, o fabricante não informa em suas especificações qual o método de construção interna que é utilizado para realizar a medição da aceleração.

Após definido o transdutor de inclinação foi realizada uma análise sobre os dimensionais das sondas comerciais. Na análise verificou-se a possibilidade de redução do comprimento de seu corpo, consequentemente com a redução da distância entre os rodízios superiores e rodízios inferiores. A vantagem que haveria com esta redução é o aumento do número de medições para um mesmo segmento quando comparado com uma sonda de comprimento maior, aliada a condição proposta pela análise da Equação 10, onde esta condiciona o ideal da medida do comprimento " L " da sonda tender ao comprimento zero. Ainda, é melhorada a condição de excursão da sonda pelo tubo guia em regiões que sofrem cisalhamentos entre as camadas de solo, evidenciando um local com ocorrência de uma curvatura com pequeno raio no tubo guia, como é demonstrado através da Figura 23. Verifica-se através da Figura 23 que ocorre realmente uma condição de melhor excursão da sonda do SADI em tubos guias que sofreram uma condição de movimento transversal

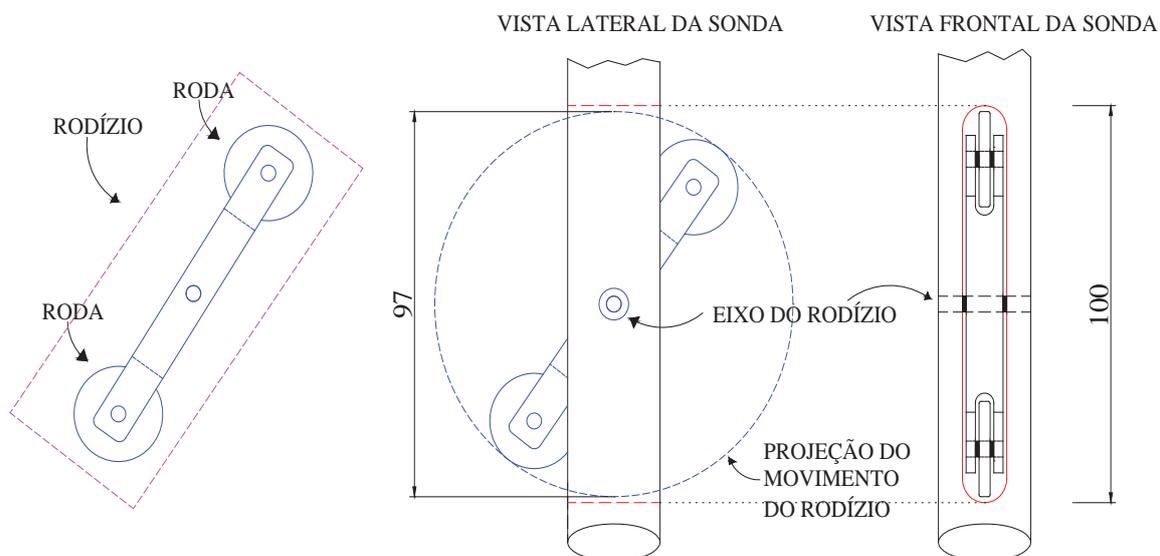
acentuado e localizado, embora nestes casos, quando é analisada a possibilidade de ocorrência de movimentos típicos de regiões de cisalhamento entre as camadas de solo é indicado a utilização de tubos guias de maior diâmetro.

Figura 23. Comparação entre sondas na excursão por curvas de pequenos raios.



Para determinar a distância entre os rodízios inferiores e os rodízios superiores, tomou como base a condição de possibilitar as medições em tubos guia de até 90 mm de diâmetro interno, e para que as molas tensionadoras permaneçam efetuando força sobre a parede interna do tubo guia, é necessário que os rodízios permaneçam inclinados em relação ao corpo da sonda, condição para que o comprimento total dos rodízios deva ser maior que 90 mm. Assumindo por definição um comprimento total do rodízio de 97 mm, como apresentado na Figura 24, é necessário também resguardar um comprimento maior nos rasgos existente no corpo da sonda, locais onde os rodízios ocupam quando a sonda for utilizada em tubos de 40 mm, condição esta onde os rodízios estão praticamente inseridos ao corpo da sonda. Para estes rasgos são definidos os comprimentos de 100 mm, adequados à receber os rodízios de 97 mm. Sendo os comprimentos dos rasgos de 100 mm, as distâncias entre os eixos centrais dos rodízios e uma das extremidades longitudinais do rasgo são de 50 mm, e assegurando uma região maciça no centro do corpo da sonda de 50 mm, a distância total entre os centros dos rodízios será de 150 mm. A distância entre os centros dos rodízios é visualizada através da Figura 28 e também através da figura do Anexo 1, o qual apresenta o projeto dimensional da sonda do SADI.

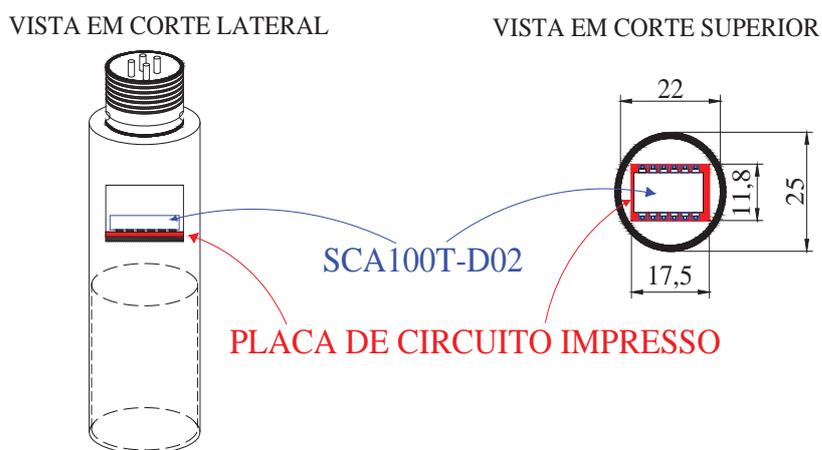
Figura 24. Projeto do rodízio.



Cotas em mm.

Para fins de desoneração na construção da sonda, as rodas dos rodízios foram construídas utilizando o mesmo material do corpo da sonda, de diâmetro 25 mm. Por motivo de ajustes e acabamentos nas rodas, as mesmas resultaram em um diâmetro de 24 mm.

Figura 25: Vista interna da sonda com a instalação do SCA100T-D02.

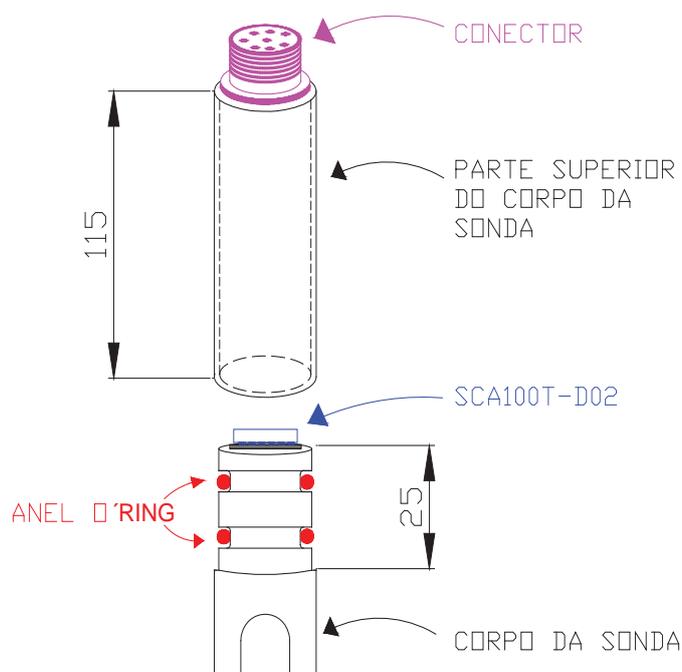


Cotas em mm.

Com relação a definição do diâmetro de 25 mm para o corpo da sonda, esta ocorre pela condição de espaço para alocar o SCA100T-D02. Conforme demonstrado através da Figura 25, é possível visualizar que o SCA100T-D02 exige uma ocupação de diâmetro 17,5 mm, sendo o corpo da sonda de 25 mm e a necessidade de resguardar uma espessura para a parede externa da sonda de 1,5 mm, restando um espaço livre de 22 mm de diâmetro. Assim, haverá um distanciamento entre o SCA100T-D02 e a parede do corpo da sonda de 2,25 mm.

Além da análise de ocupação superficial por parte do SCA100T-D02, é necessário também realizar o dimensionamento do espaço longitudinal de ocupação pelos componentes elétricos no interior do corpo da sonda, bem como projetar o enclausuramento do local de instalação dos mesmos. Para vedação das partes móveis foi projetado utilizar duplos anéis o-ring para o encaixe entre o corpo da sonda e a parte superior do corpo da sonda. Para vedação entre o conector e a parte superior do corpo da sonda foi projetada a instalação de um conector IP-67. A Figura 26 ilustra a construção do local de acondicionamento do SCA100T-D02, e a medida de 115 mm da peça formadora da parte superior da sonda é necessária para possibilitar a instalação de componentes elétricos periféricos e realizar as ligações elétricas entre o SCA100T-D02 e o conector.

Figura 26. Vista esquemática da parte superior do corpo da sonda.



Cotas em mm.

Utilizando as definições de construção da sonda do SADI, principalmente as características do SCA100T-D02, é possível determinar a resolução da sonda para medições em deslocamento transversal. Utilizando a distância entre os rodízios que é de 150 mm e a resolução do canal digital do SCA100T-D02 que é de $0,07^\circ$, determina-se conforme a Equação 14 a resolução de 0,183 mm. Definindo para o SADI o menor intervalo de medida possível.

$$\text{Resolução} = 150 * \text{seno}(0,07^\circ) \quad (14)$$

No mesmo sentido, haverá uma condição de exatidão para a medição com o SADI. Seguindo os inclinômetros comerciais já descritos no item 2.8, a exatidão é definida para um comprimento total de tubo guia de 30 m. Assim, utilizando a Equação 15, a exatidão resultante para o SADI é de 36,652 mm/30 m.

$$\text{Exatidão} = 30000 * \text{seno}(0,07^\circ) \quad (15)$$

Logo, com relação à sonda, a mesma está definida com as seguintes características:

- Material construtivo: Aço inox 304
- Distância entre os rodízios: 150 mm
- Comprimento total da sonda: 390 mm
- Diâmetro do corpo da sonda: 25 mm
- Diâmetro das rodas: 24 mm
- Tubos guias possíveis de medição: 40 mm até 90 mm
- Transdutor de inclinação: SCA100T-D02
- Resolução digital: 0,183 mm/150 mm
- Exatidão digital: 36,65 mm/30 m

Após efetuada a montagem final da sonda do SADI, a mesma totalizou uma massa de 1,15 kg.

Na Figura 27 são visualizados os componentes usinados, necessários para a montagem da sonda do SADI.

Figura 27. Peças em aço inox usinadas que formam a sonda do SADi.



A Tabela 1 contém as informações das quantidades e dos itens necessários para a construção da sonda do SADi.

Tabela 1. Lista de materiais para construção da sonda do SADi.

Quantidade	Unidade	Descrição do produto
0,5	m	Vergalhão redondo de aço inox 304 Ø25,4 mm
0,25	m	Vergalhão quadrado de aço inox 304 10x10 mm
6	pç	Rolamento de esfera de aço inox 693 ZZ-CN
2	pç	Rolamento de agulha de aço inox 8mm x 4 mm
1	pç	Conector macho IP-67 6 pinos
8	pç	Pino elástico de aço inox 3x18 mm
4	pç	Mola helicoidal, diâmetro 7 mm x comprimento 10 mm, arame 18 AWG
2	pç	Anel o´ring 3,53x23,39 mm
1	pç	Parafuso fenda inox M5 x 6
1	pç	Parafuso allen sem cabeça inox M3 x 5
0,15	m	Latão tarugo 6 mm
1	pç	Inclinômetro SCA100T-D02

Na Figura 28 é apresentada a configuração final da sonda com seus principais componentes. As dimensões e detalhes construtivos da sonda do SADi são apresentados no Anexo 1.

Figura 28. Aspecto final da sonda do SADi.



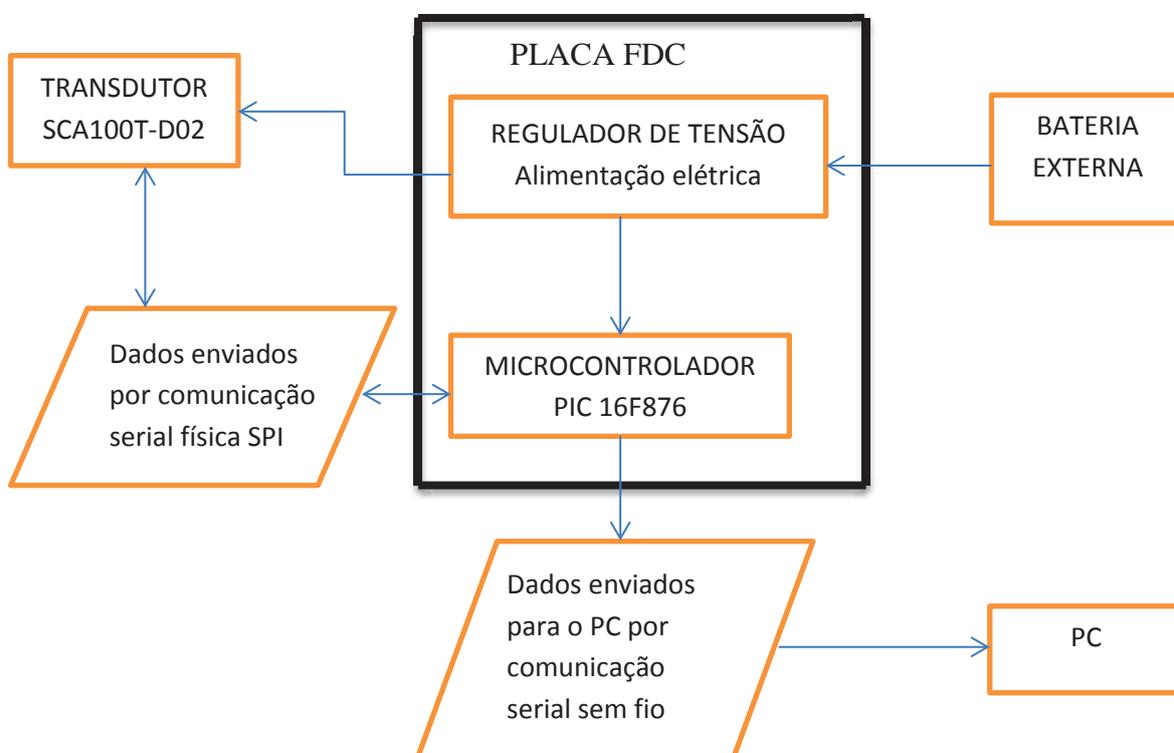
4.1.2 Interface homem-máquina (IHM)

A IHM idealizada para o SADi deve apresentar características específicas como fonte de alimentação por bateria, ergonomia para adequar-se a trabalhos em campo, conter teclado e tela (*display*), proporcionar comunicação sem fio com a sonda e com o PC, além de possuir memória para o armazenamento das medições realizadas. Neste sentido, o SADi apresenta uma característica inovadora que é o uso do PC diretamente como IHM. As vantagens desta condição são a presença no PC de teclado, tela, ergonomia para trabalhos em campo, principalmente se utilizado um *Tablet*, presença de comunicação sem fio e grande espaço em memória, além do armazenamento de dados de modo definitivo.

Para adequar a proposta de utilização do PC como IHM foi necessária a construção de uma placa eletrônica definida como placa FDC (fonte, driver e controle), responsável por realizar a interface entre a sonda e o PC (IHM), bem como fornecer a alimentação elétrica para a sonda. A placa FDC apresenta um microcontrolador PIC 16F876A, junto ao um programa desenvolvido para o mesmo, de forma a possibilitar o condicionamento, o

recebimento e a conversão do sinal serial enviado pelo SCA100T-D02, além de providenciar o envio dos dados das medições para o PC através de uma comunicação sem fio. A comunicação já definida entre a sonda e o microcontrolador é a SPI, visto ser o padrão de saída do SCA100T-D02. Nesta comunicação são necessárias quatro ligações elétricas para proceder à comunicação. Já a comunicação entre o microcontrolador e o PC é efetuada por intermédio de uma comunicação sem fio *Bluetooth*. A Figura 29 ilustra em forma de diagrama de blocos as condições operacionais para a placa FDC.

Figura 29. Diagrama de blocos da operação da placa FDC.

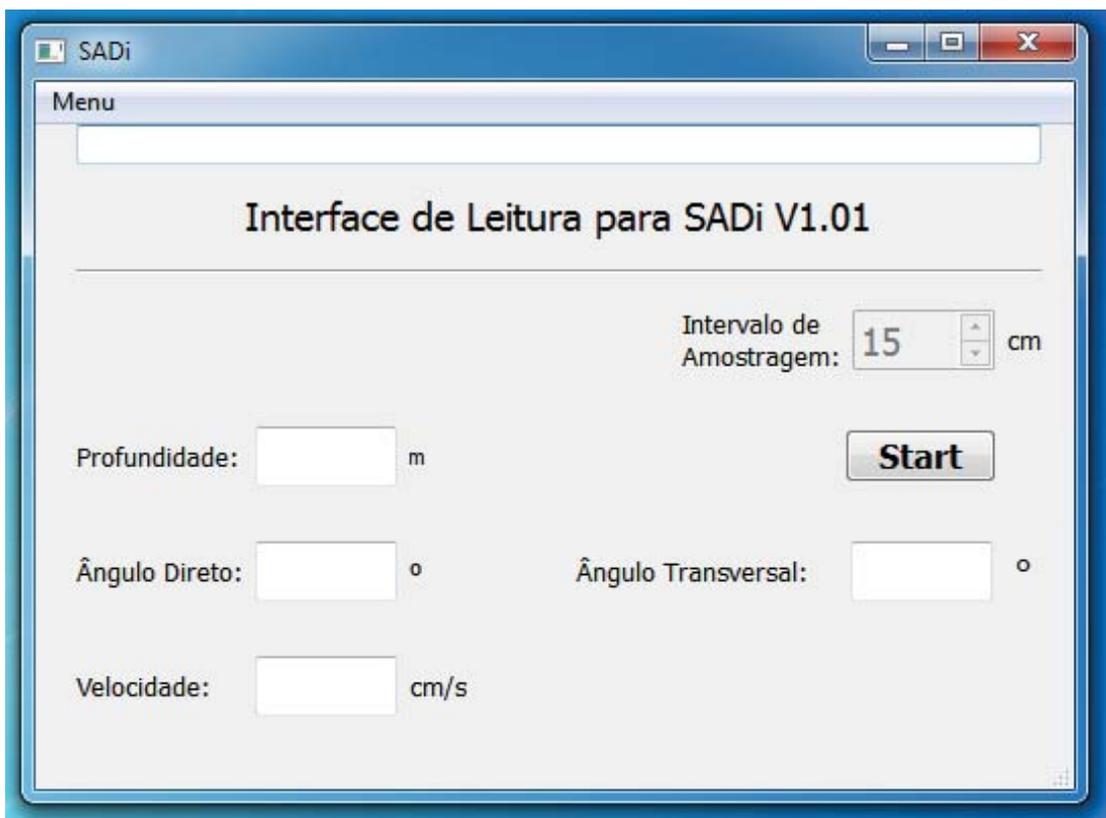


Como já definido, a operação do PC como IHM necessita de um programa de interface com o usuário que apresente capacidade para algumas configurações, demonstre os valores das medições na tela e proceda com o armazenamento em arquivo eletrônico dos valores das medições. Optando por uma plataforma de programação com política de *software* livre, foi definido o uso do Qt 4.8.4 como plataforma para criar o programa de interface.

Algumas predefinições das necessidades envolvendo a interface com o usuário são a configuração da porta de comunicação do PC, o nome do arquivo e a pasta destino para

armazenamento dos dados das medições e a forma visual de apresentação dos valores das medições em tela. No desenvolvimento da interface procurou-se construir um ambiente compacto e de fácil entendimento para o usuário. O formato de apresentação desta janela é ilustrado na Figura 30.

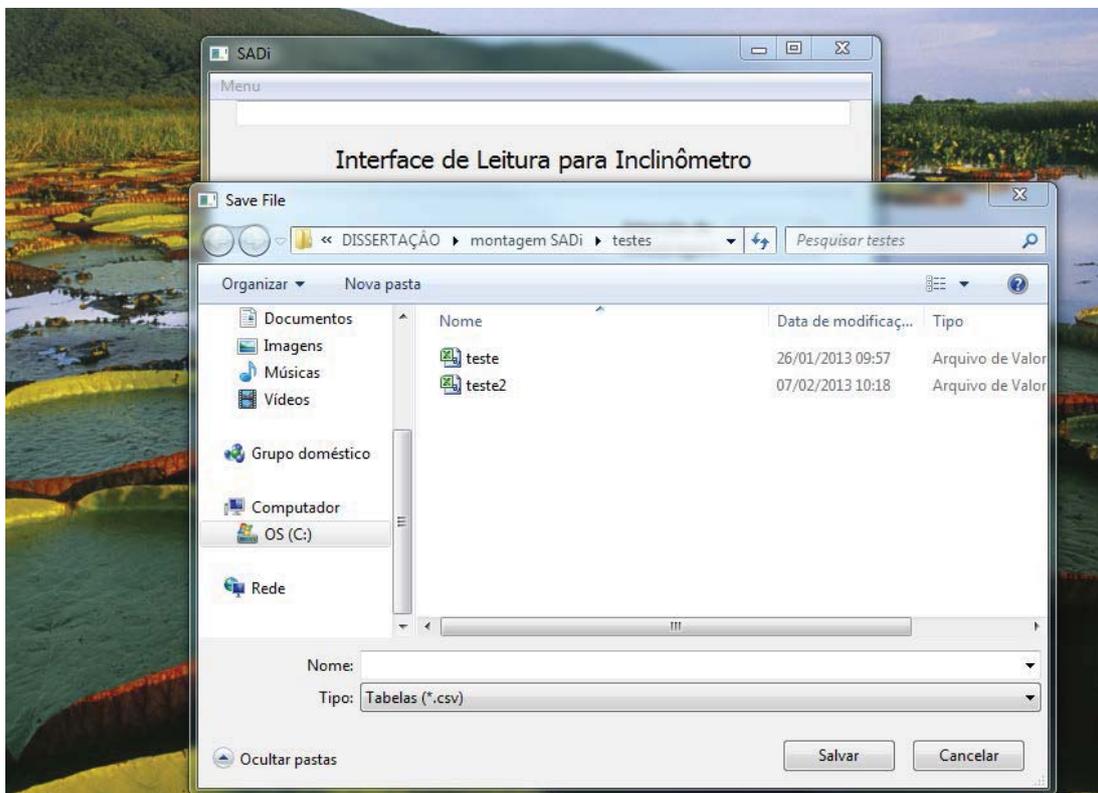
Figura 30. Aspecto da interface de usuário (IHM) para o PC.



Na interface do usuário, a janela “Menu” proporciona a configuração da porta de comunicação do PC com a placa FDC, sendo que esta comunicação ocorrerá por *Bluetooth*. É necessário para alguns PC’s que não possuem a comunicação *Bluetooth* incorporada internamente a colocação de um dispositivo externo e a configuração da porta de instalação do mesmo. Já na janela “intervalo de Amostragem” o SADi apresenta o valor travado de 150 mm (0,15 m) definido pelo distanciamento entre seus rodízios. As janelas “Profundidade, ângulo Direto, Ângulo Transversal e Velocidade” são janelas de leitura no programa de interface, local onde são apresentados os valores das medições. O acionamento do botão “start” inicializa o processo de medição com o SADi, que primeiramente solicita através da abertura de uma nova janela a configuração do nome do

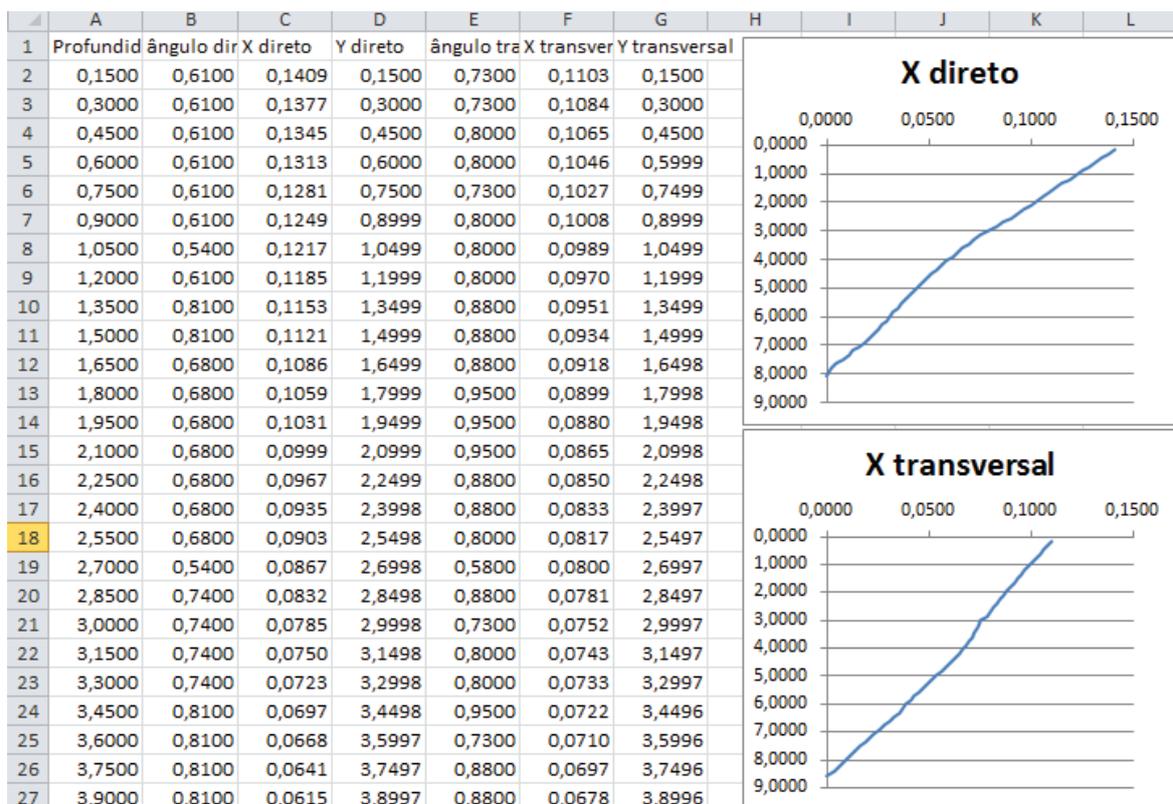
arquivo que será criado e salvo na pasta destino configurada. A janela de configuração da pasta destino e do nome do arquivo é visualizada através da Figura 31.

Figura 31. Janela para configurar o arquivo destino dos dados das medições.



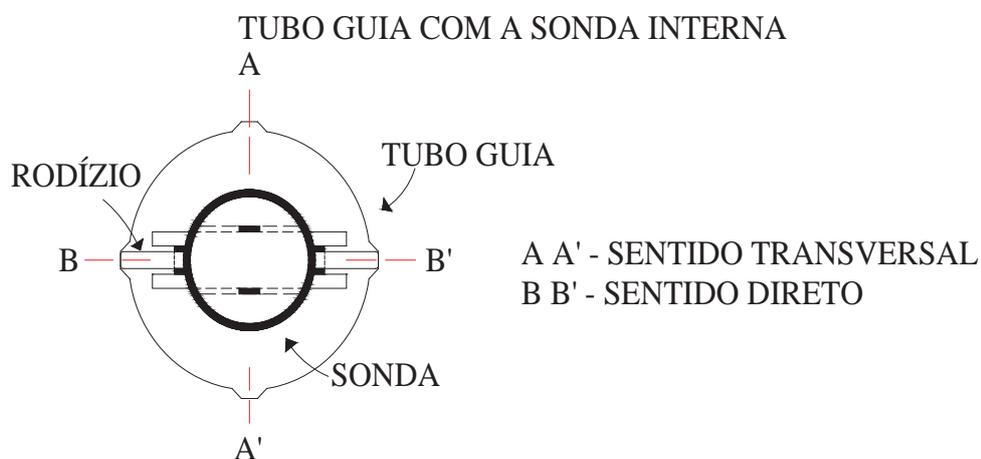
Como é possível visualizar através da Figura 31, o arquivo salvo pelo programa de interface do SADI apresenta extensão .CSV (*comma separated values*), arquivo com valores separados por vírgulas. Este tipo de arquivo é bastante simples e suportado por quase todas as planilhas eletrônicas, como o *Microsoft Excel*. Após o arquivo de extensão .CSV ser inicializado em uma planilha eletrônica, são necessárias algumas configurações para que esta interprete as vírgulas como separadores e aloque de forma individual os valores nas células da planilha eletrônica. Quando este processo for concluído é possível efetuar a construção de gráficos utilizando os valores salvos das medições como demonstrado na Figura 32. Além desta possibilidade de construção de gráficos com os valores e uma medição apenas, as planilhas possibilitam a realização de gráficos de vários comportamentos, condição esta adequada a realização de comparações com medições ocorridas anteriormente para um mesmo local.

Figura 32. Arquivo das medições do SADi aberto em uma planilha eletrônica.



As descrições de X direto e X transversal na Figura 32, se referem ao sentido de medida X, que para o SADi é o sentido do movimento horizontal, ou seja é o resultado de D para a Equação 8. E as condições de direto e transversal se referem às condições de alinhamento com os rodízios da sonda, como é demonstrado na Figura 33.

Figura 33. Definições para o sentido de medição da sonda do SADi



Acredita-se, que através deste método em que são apresentados os valores das medições, o usuário possuirá grande maleabilidade para efetuar análises dos resultados e compara-las a valores de medições anteriores previamente salvas em arquivos, podendo configurar a forma do gráfico, realizar o mesmo para uma região específica, comparar com medições anteriores, entre outras possibilidades.

4.1.3 Cabo elétrico

O cabo elétrico tem a função de interligar eletricamente a sonda e a placa eletrônica FDC. Através do cabo elétrico é fornecida a alimentação elétrica para sonda, é possibilitada a comunicação serial entre a sonda e a placa FDC e é também através do cabo elétrico que é realizada a sustentação mecânica e a movimentação da sonda. Desta forma, o cabo elétrico deve apresentar capacidade mecânica de sustentar a massa da sonda mais a sua própria massa para a máxima excursão definida, bem como possuir o número de condutores elétricos necessários a sua função.

Do número de condutores elétricos que devem existir no cabo elétrico, são necessários quatro condutores para efetuar a comunicação SPI e dois condutores para promover a alimentação elétrica da sonda. Por motivo de interferência devido à frequência de oscilação do sinal serial da SPI o cabo deve possuir uma blindagem eletromagnética externa aos condutores, normalmente realizada por uma malha de cobre ou um filme metálico. Quanto ao dimensionamento da capacidade de condução e de queda de tensão, o fabricante do SCA100T-D02 informa em seu manual que a corrente máxima de consumo é de 5 mA, desta forma o dimensionamento do condutor está mais definido quanto a sua capacidade mecânica de ruptura do que a sua capacidade de corrente. Definiu-se por iniciar os ensaios utilizando condutores de seção condutora igual a 1 mm², por se tratarem de cabos padrões de mercado e por estarem mais adequados a aplicação através de conhecimentos práticos.

Para definir a capacidade máxima de carga do cabo elétrico é necessário conhecer algumas condições, como a máxima excursão da sonda, a massa da sonda, a especificação do cabo e a massa do cabo. Quanto a máxima excursão da sonda, o comprimento do cabo está baseado nos inclinômetros comerciais, onde estes apresentam como medida base 100 m. A massa da sonda definida no item 4.1.1 é igual a 1,15 kg. A especificação do cabo elétrico, derivada de suas necessidades, apresenta a sua formação contendo 6 condutores de

seção condutora 1 mm², isolamento de 500 V em PVC, malha externa com fios de cobre e uma relação massa/comprimento de 0,12 kg/m, definindo assim para uma profundidade 100 m, a massa total acumulada do cabo e sonda igual a 13,15 kg. Como não foram encontrados dados de fabricantes para a capacidade de ruptura a tração no cabo especificado, foi necessário recorrer a um teste prático, a fim de verificar a suportabilidade do cabo. O ensaio utilizou o cabo elétrico especificado para o SADi como cabo de suspensão para o içamento de uma massa de 40 kg em um segmento de cabo de 1,5 m de comprimento, permanecendo nesta condição por um período de 24 horas. A utilização da massa de 40 kg no teste, é necessária para garantir um fator mínimo de segurança de três vezes a capacidade de ruptura do cabo elétrico em relação à máxima massa do conjunto sonda mais cabo do SADi. Ao final do teste não foram encontradas variações no comprimento do cabo elétrico e nem fadigas visíveis no corpo do cabo elétrico, como redução do seu diâmetro ou fissuras no material isolante. Desta forma, mesmo sem definir a capacidade de ruptura do cabo elétrico, é garantida a capacidade de sustentação por parte do cabo elétrico da massa em suspensão totalizada pela sonda mais cabo elétrico.

Com referência ao processo que define os pontos em que ocorrem as medições em um inclinômetro comercial, seus cabos elétricos apresentam marcações regulares ao longo da sua extensão, com distanciamentos iguais a distância que separa os rodízios superiores e rodízios inferiores da sonda. Para o SADi, optou-se realizar a medição automática da profundidade da sonda, juntamente com os locais de ocorrência da medição da inclinação. A medição automática da profundidade da sonda pretende trazer a redução do tempo de medição, uma maior exatidão nos resultados medidos, impedindo o erro de posição da sonda para o ponto medido, além de impedir erros humanos, como realizar duplamente ou mesmo a não medição do ponto.

Para a realização da medição da profundidade da sonda foi projetado e desenvolvido um sistema de roldanas, as quais guiam o cabo elétrico e ao mesmo tempo acabam por tracionar um encoder incremental de pulsos que possui dois canais deslocados de 90° elétricos. A resolução requerida para a medição de profundidade foi definida em 1 mm. O encoder dimensionado é fabricado pela S&E Instrumentos, apresentando um total de 100 pulsos por volta e é tracionado por uma roldana de diâmetro 31,83 mm o que perfaz um comprimento periférico de 99,99 mm, evidenciando uma resolução de 1 pulso/mm. Para um perfeito funcionamento do sistema automático de medição de profundidade assegurou-se que o cabo elétrico não escorregue sobre a roldana tracionadora, através de um sistema de pressão desta roldana sobre o cabo elétrico. O sistema construído para realizar a medição de profundidade é mostrado através da Figura 34 e da Figura 35. Encontra-se no Adendo 1 o depósito da Patente realizado no dia 03.01.2014 no INPI

denominado de “DISPOSIÇÃO CONSTRUTIVA APLICADA EM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE INCLINAÇÃO”, gerando processo nº. BR 10 2014 000068 2.

Figura 34. O sistema de medição de profundidade com vista frontal.

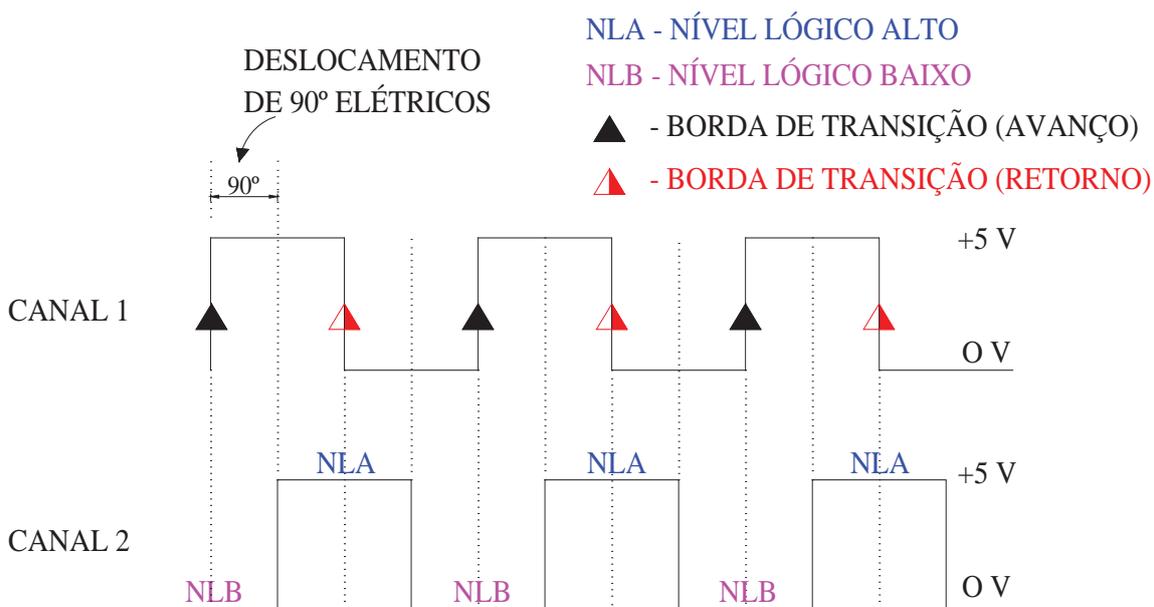


Figura 35. O sistema de medição de profundidade com vista traseira.



Para fornecer a alimentação elétrica ao encoder e realizar a contagem dos pulsos enviados pelo mesmo, foi desenvolvida uma placa eletrônica contendo uma fonte reguladora de 5 volts e um microcontrolador PIC 16F876A denominada de Placa FCP (placa de fonte e contagem de pulsos). Um programa desenvolvido para o microcontrolador tem a função de reconhecer a referência zero para a profundidade através de uma informação originária da IHM e também realizar a contagem dos pulsos do encoder. A contagem dos pulsos do encoder deve reconhecer o movimento da sonda com relação ao avanço e retorno da mesma no tubo guia, a fim de não perder sua referência. Com um encoder de duplo canal, onde os canais estão deslocados de 90°, é possível realizar através do programa o reconhecimento dos sentidos dos movimentos do cabo elétrico e por consequência da sonda, como demonstrado através da Figura 36.

Figura 36. Reconhecimento do sentido de movimento do encoder.

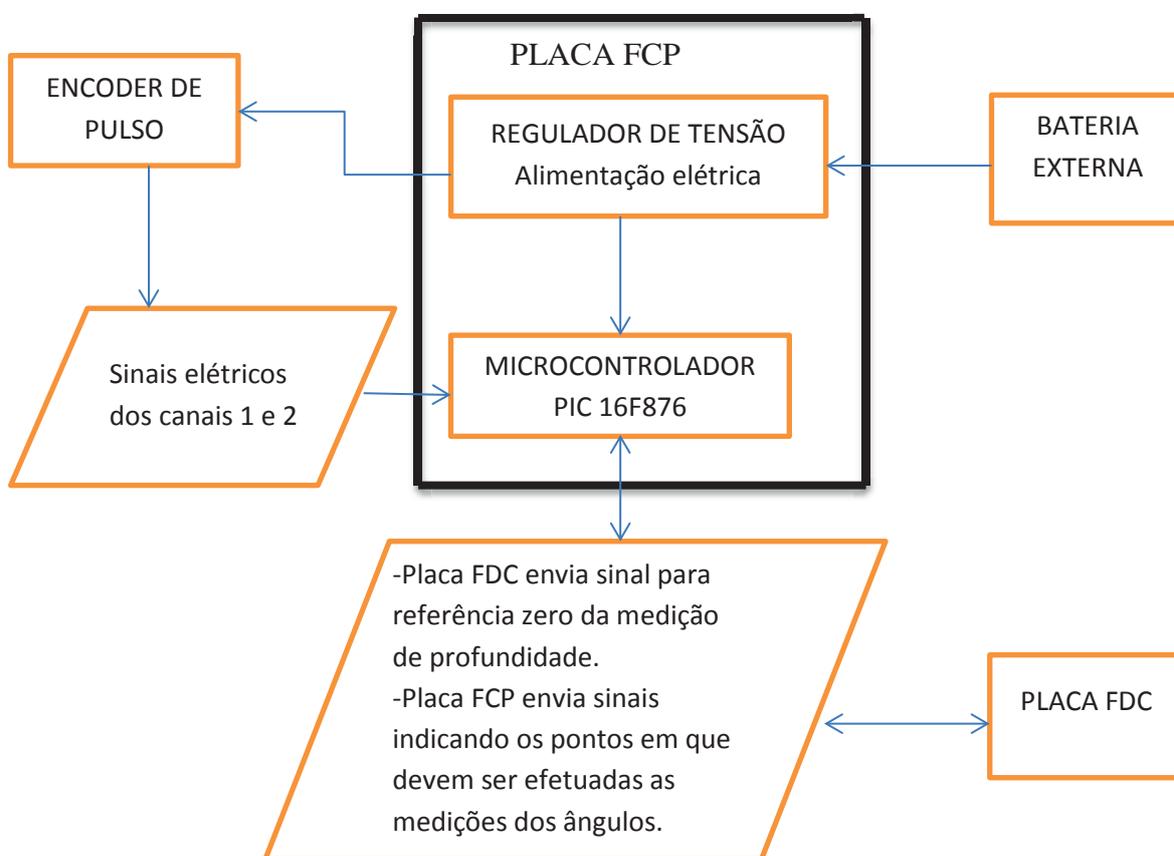


Através da ilustração dos sinais dos dois canais de saída do encoder apresentados na Figura 36, é possível entender o processo de reconhecimento do sentido de avanço ou recuo para o movimento do cabo e sonda. Para a condição de avanço, o controle verifica a ocorrência de bordas de transição positiva do sinal (o sinal alterna de 0 V para +5 V) no canal 1, com o canal 2 estando em nível lógico baixo (0V ou NLB). Já para o reconhecimento do sentido de retorno do movimento do cabo, o mesmo ocorre pela

existência de bordas de transição positiva do sinal (o sinal alterna de 0 V para +5 V) no canal 1, com o canal 2 estando em nível lógico alto (+ 5V ou NLA). Atenta-se que as condições para verificação dos níveis lógicos dos canais do encoder são instantâneas, isto é, ocorrem simultaneamente no tempo, onde as linhas temporais são definidas pelas linhas pontilhadas na Figura 36.

A condição operacional da placa FCP é demonstrada através da Figura 37 utilizando uma representação em diagrama de blocos.

Figura 37. Diagrama de blocos da operação da placa FCP.



Por fim, de igual forma aos inclinômetros comerciais foi projetado e adquirido um rolo para acondicionar o cabo elétrico, onde este é apresentado na Figura 38. O rolo é construído em material plástico, suportado por um apoio com alça construído em tubo metálico e tem a capacidade de acondicionar 60 m do cabo elétrico dimensionado.

Figura 38. Rolo suporte do cabo elétrico.



4.1.4 Placas eletrônicas

Como já definido, são necessárias as construções de duas placas eletrônicas, a placa FDC e a placa FCP. De modo a tornar o sistema mais compacto, definiu-se por unificar as mesmas, mantendo os microcontroladores ainda individuais para as placas, mas unificando a fonte de alimentação. Para determinar a capacidade de corrente de projeto da fonte, somaram-se as correntes de consumo dos principais componentes eletrônicos das placas, totalizando apenas 45 mA. De posse dessa corrente, foi especificado um regulador de tensão 7805, o qual possui uma tensão de saída regulada de +5 Volts, apresenta uma capacidade de corrente de 2,2 A, dissipação máxima de 1,5 W para a operação sem a inclusão de dissipador externo ao seu invólucro e ainda o mesmo possui a característica de solicitar no mínimo uma tensão de 2 V a mais em sua entrada, necessária para realizar a regulação de tensão. Na prática é conveniente fornecer a tensão de entrada em 3 V a mais para assegurar uma melhor regulação. Como inicialmente os ensaios foram laboratoriais, foi possível alimentar o circuito através de uma fonte de tensão regulável e junto aos ensaios foram realizadas as medições de consumo da fonte para as mais variadas condições de operação do circuito. Durante os ensaios as correntes oscilaram de 35 mA até 70 mA, evidenciando as maiores correntes nos instantes das transmissões de sinais sem fio, onde o

consumo do sistema de transmissão *Bluetooth* exige uma maior potência da fonte. Neste sentido, dimensionou-se uma bateria externa para alimentação do sistema SADi que possuísse a capacidade de manter a operação do SADi em perfeitas condições por um período mínimo de 24 horas em operação permanente. O aspecto final construtivo da placa eletrônica e da bateria é apresentado na Figura 39.

Figura 39. Placas eletrônicas e bateria do SADi.



Para o projeto da fonte e dimensionamento da bateria foram utilizados conhecimentos práticos e dados sobre os componentes da fonte. Ainda, foi inserido um diodo 1N4007 em série com a fonte para evitar danos aos componentes eletrônicos da placa, caso houver a inversão dos polos da bateria. O diodo 1N4007 apresenta capacidade de corrente de 1 A e uma tensão reversa típica de 0,7 V, para o sentido de condução direta.

Para determinar a tensão mínima da bateria é somada a tensão de saída do regulador que é de 5 V, com a tensão de 3V a mais em sua entrada e com a tensão reversa do diodo que é de 0,7 V, logo totalizando 8,7 V. A bateria dimensionada apresenta tensão de 9 V e capacidade de corrente 1800 mAh, conhecida no mercado como *Pack*. A capacidade de

corrente definida para a bateria supera a necessidade solicitada pelo SADi, já que se o consumo máximo de 70 mA perdurar por 24 horas ininterruptas, serão necessários 1680 mAh. Embora dimensionada a bateria para o SADi, para os testes foi utilizada uma bateria existente do tipo LiPo (Lítio-polímero), de tensão 11,1 V e capacidade de corrente de 2450 mA em 3 segundos, desta forma não necessitando adquirir mais um componente, mas sendo necessário rever o projeto da fonte. Tem-se então que a tensão de alimentação do regulador 7805 passou de 8 V para 5,4 V, elevada pelo aumento da tensão da bateria. Para o caso do regulador 7805 fornecer a máxima corrente de 70 mA a potência dissipada sobre o regulador de tensão será o produto a corrente pela tensão retida, resultando em 0,378 W, ficando abaixo da dissipação máxima suportável pelo regulador de tensão para uso sem dissipador externo que é de 1,5 W. Já com relação à capacidade de corrente a bateria de LiPo, a mesma possui capacidade de corrente muito superior a projetada, sendo desta forma a bateria de LiPo adequada ao uso.

4.1.5 Calibração do SADi

Ao final do processo de desenvolvimento e construção, o SADi foi submetido à calibração e ensaios de verificações de suas medições. Foi utilizada para realizar a calibração do SADi a mesa tridimensional alta precisão modelo Prismo Navigator fabricada pela Carl Zeiss, assumidos aqui como os valores reais de inclinação, existente no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, visualizada através da Figura 41.

A calibração ocorreu através de uma reprodução prática de medição utilizando o SADi, apenas diferenciando o local onde a sonda foi colocada. A sonda foi instalada em um suporte construído especificamente para realizar a condição que permitisse um processo de calibração do SADi. O suporte possui um segmento de 0,35 m de tubo guia fixado em um sistema articulado, que possibilita movimentos livres e traváveis, nos mesmos quatro sentidos possíveis de medição do transdutor SCA100T-D02. O suporte construído para a calibração é apresentado na Figura 40.

Figura 40. Suporte utilizado para calibração do SADi.

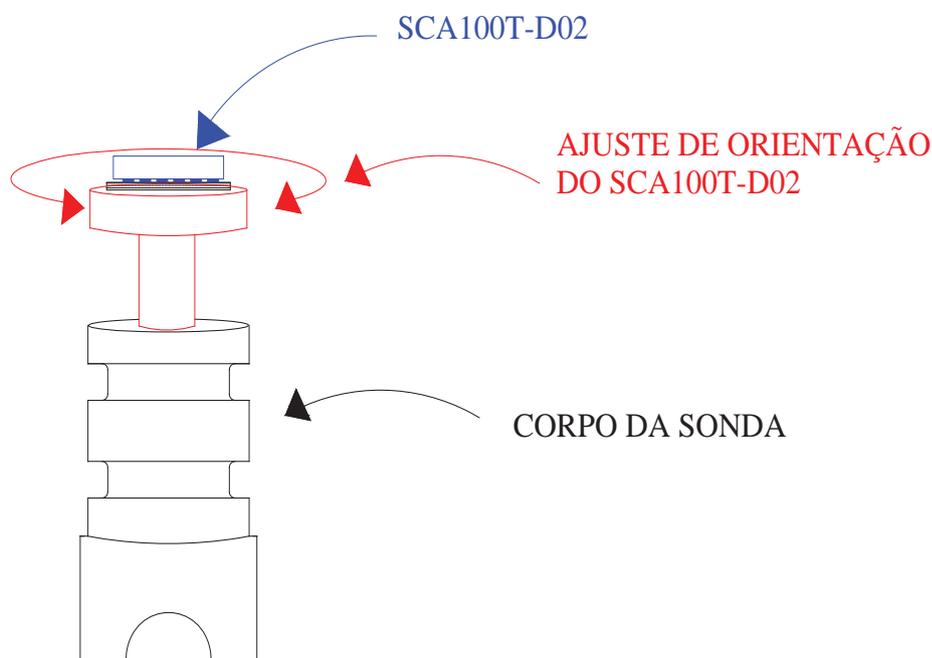


Figura 41. Mesa tridimensional utilizada para calibração



Antes de iniciar a realização de medições com o SADi, foi necessário primeiramente ajustar a orientação do SCA100T-D02 em relação ao corpo da sonda. A nomenclatura da orientação dos eixos para o SADi, segue conforme a evidenciada na Figura 33. O ajuste de orientação ocorreu posicionando a sonda o mais próximo de sua vertical para ambos os eixos e inclinando a sonda apenas no eixo direto entre -50° e $+50^\circ$. Foi acompanhada então a medição do ângulo transversal, onde este não poderia apresentar variações, ou seja, não ser influenciado pelos movimentos efetuados, garantindo o alinhamento do SAC100T-D02 ao corpo da sonda. Para realizar o ajuste de orientação do SADi, deve-se movimentar o SCA100T-D02 de forma relativa ao corpo da sonda conforme ilustra a Figura 42. Foram necessárias algumas repetições no ensaio até encontrar o posicionamento mais correto do SCA100T-D02 em relação ao corpo da sonda. Na posição final ajustada, a sonda excursionou por $\pm 50^\circ$ no eixo direto enquanto não houve variação na medição de eixo transversal. Embora para o ponto ajustado não ocorresse variação no ângulo do eixo transversal, ainda pode não ser a posição ideal, pois a resolução do canal serial do SADi é de $0,07^\circ$.

Figura 42. Ajuste de alinhamento entre SCA100T-D02 e corpo da sonda.

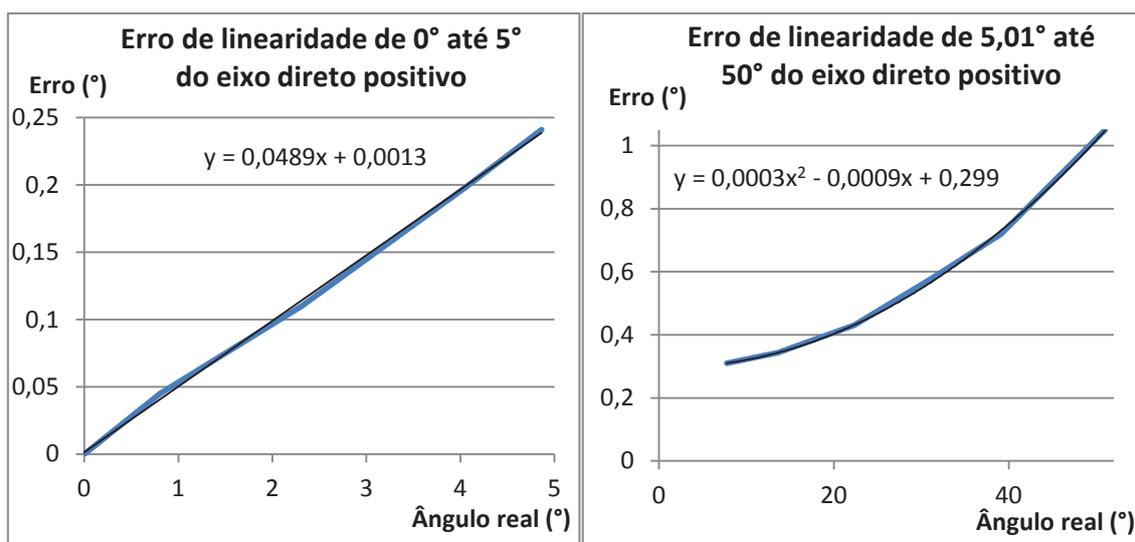


Outro ajuste necessário antes de iniciar as medições com o SADi foi a verificação dos zeros das medições dos eixos, ou seja, ajustar a posição de zero grau do corpo da sonda

ao valor de zero grau medido pelo SADi. Procedendo com o posicionamento do corpo da sonda em zero graus com relação a vertical, posição essa conferida através de medições da mesa tridimensional, foi então realizada a verificação da medição indicada no SADi, onde o valor encontrado foi zerado através de ajuste de programação. Este procedimento ocorreu para os dois eixos de medição do SADi.

Por fim, a sonda foi ensaiada em todo seu alcance de medição e nos dois sentidos dos seus eixos, a fim de realizar a calibração para toda a faixa de funcionamento. O ensaio procedeu variando ângulos na sonda, que eram lidos na IHM do SADi e também eram medidos pela mesa tridimensional. Foram realizados ensaios para os quatro sentidos possíveis de medições da sonda, o que resultou para os primeiros ensaios na verificação de uma não linearidade do sistema com relação à condição real medida pela mesa tridimensional. Foram então realizadas várias medições para os quatro sentidos possíveis a fim de determinar o comportamento da não linearidade, com o intuito de corrigir esta condição. Na Figura 43 são apresentados os comportamentos dos erros para o sentido positivo de eixo direto do SADi, que por sua vez resultaram em valores positivos de erros, definindo que os ângulos medidos pelo SADi eram maiores que os ângulos reais medidos pela mesa tridimensional.

Figura 43. Gráfico do erro de linearidade do eixo direto positivo.



Assim, para o sentido positivo de eixo direto os valores dos ângulos medidos pelo SADi devem ser subtraídos dos erros. A necessidade de apresentar dois gráficos do comportamento dos erros na Figura 43 advém das condições para as correções dos erros de linearidade, onde a equação de segundo grau encontrada para os ângulos acima de 5° traz uma componente fixa de 0,299°, que se subtraída de um ângulo muito pequeno medido pelo SADi pode causar um erro maior do que o erro de linearidade existente. É possível verificar também que o comportamento do erro para ângulos menores que 5°, por se tratar de um curto segmento analisado, apresenta um comportamento linear e a componente fixa da equação do erro é de 0,0013°, que para a aplicação prática na correção do ângulo do SADi acabou sendo retirada da equação.

O processo de ensaio descrito anteriormente foi aplicado de igual forma aos quatro sentidos de movimentos da sonda, desta forma foram evidenciados oito comportamentos de erros, produzindo oito equações de erros, que foram implementadas no programa do microcontrolador responsável pelo recebimento da palavra serial oriunda do SCA100T-D02. A Tabela 2 apresenta os resultados para os 8 ensaios, com as equações encontradas e as equações implementadas no programa.

Tabela 2. Equações para os erros de linearidade dos eixos do SADi.

Sentido ângulo	Eixo	Alcance	Equação do erro	Equação programada	R ²
Positivo	direto	0° até 5°	$y = 0,0489x + 0,0013$	$y = 0,0489x$	0,9989
Positivo	direto	5° até 50°	$y = 0,0003x^2 - 0,0009x + 0,299$	$y = 0,0003x^2 - 0,0009x + 0,299$	0,993
negativo	direto	0° até 5°	$y = -0,1091x - 0,0061$	$y = -0,1091x$	0,9666
negativo	direto	5° até 50°	$y = 0,0001x^2 + 0,0296x + 0,1871$	$y = 0,0001x^2 + 0,0296x + 0,1871$	0,9697
Positivo	transversal	0° até 5°	$y = -0,0264x - 7E-05$	$y = -0,0264x$	0,9825
Positivo	transversal	5° até 50°	$y = -8E-05x^2 + 0,0231x - 0,2338$	$y = -8E-05x^2 + 0,0231x - 0,2338$	0,9853
negativo	transversal	0° até 5°	$y = 0,0724x - 0,0474$	$y = 0,0724x$	0,9523
negativo	transversal	5° até 50°	$y = 0,0004x^2 + 0,0263x - 0,1797$	$y = 0,0004x^2 + 0,0263x - 0,1797$	0,996

Após todas as equações dos erros de linearidade serem inseridas no programa de conversão do sinal digital para medida angular, ocorreu a repetição do ensaio de calibração do SADi na mesa tridimensional. Os resultados obtidos nos ensaios apresentaram variações nas medições realizadas pelo SADi em relação a mesa tridimensional. A Tabela 3 apresenta o ensaio realizado para o sentido positivo do eixo direto do SADi.

Tabela 3. Ensaio de verificação da calibração do SADi eixo direto positivo.

Medição SADi (°)	Medição mesa tridimensional (°)	Erro (%)
1,05	1,044	0,57
1,9	1,885	0,80
3,97	3,945	0,63
6,8	6,75	0,74
13,48	13,387	0,69
24,45	24,4	0,20
29,06	28,85	0,73
36,77	36,62	0,41
42,44	42,34	0,24
50,1	49,95	0,30

Utilizando os valores dos erros percentuais apresentados na Tabela 3, foi calculado o desvio padrão do erro percentual do ensaio. Inicialmente utilizando a Equação 16, calcula-se a média dos valores dos erros.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi \quad (16)$$

Onde:

\bar{x} = média dos valores dos erros;

n = número de elementos da média;

xi = valores dos erros.

Para cálculo do desvio padrão é utilizada a Equação 17.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

Onde:

s = desvio padrão;

n = número de elementos da média;

\bar{x} = média dos valores dos erros;

x_i = valores dos erros.

Desta forma através do ensaio na mesa tridimensional, o SADi apresentou um desvio padrão percentual de 0,224% e um erro médio de 0,531% no sentido positivo de eixo direto. A Tabela 4 apresenta o ensaio realizado para o sentido positivo do eixo transversal do SADi.

Tabela 4. Ensaio de verificação da calibração do SADi eixo transversal positivo.

Medição SADi (°)	Medição mesa tridimensional (°)	Erro (%)
1,46	1,455	0,34
2,2	2,183	0,78
4,6	4,587	0,28
8,37	8,32	0,60
15,77	15,69	0,51
21,23	21,17	0,28
28,8	28,78	0,07
34,56	34,41	0,44
40,4	40,29	0,27
49,1	48,92	0,37

Utilizando os valores dos erros percentuais apresentados na Tabela 4, foi calculado o desvio padrão percentual do erro do ensaio utilizando a Equação 16 e a Equação 17. O Resultado apresentou um desvio padrão percentual de 0,199% e um erro médio de 0,394% no sentido positivo de eixo direto.

Ainda foram ensaiados os movimentos da sonda do SADi no sentido negativo de eixo direto e no sentido negativo de eixo transversal e os resultados estão apresentados na Tabela 5.

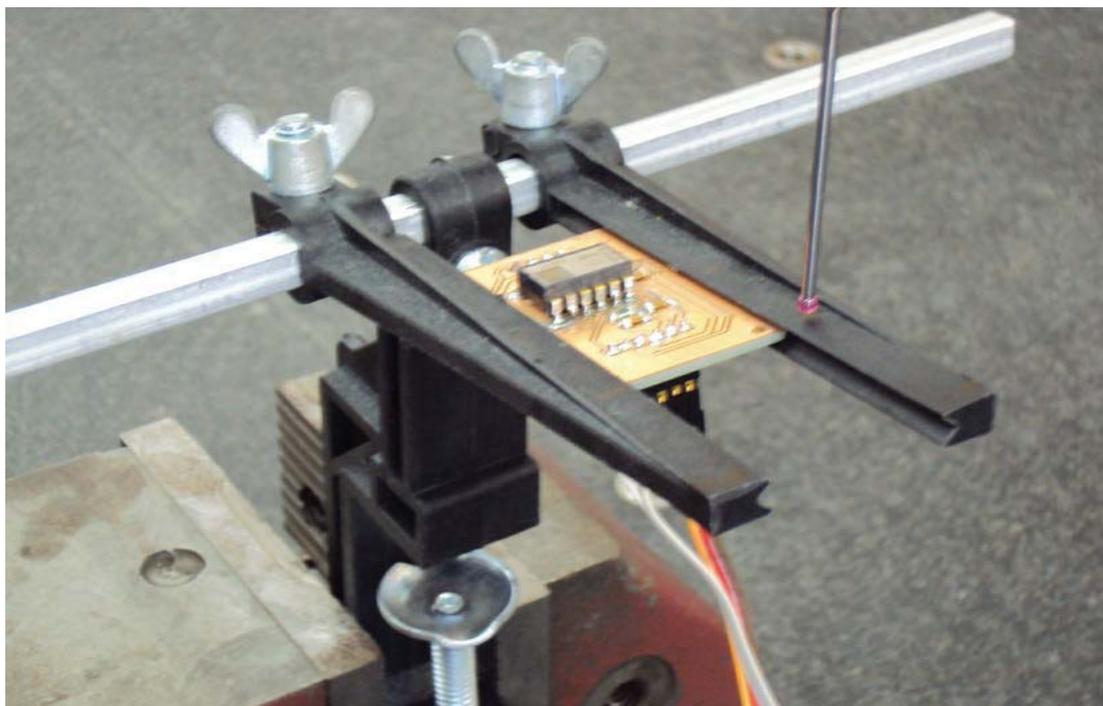
Tabela 5. Erros percentuais encontrados no SADi após ensaio.

Eixo	Sentido do movimento	Desvio padrão (%)	Erro médio (%)
Direto	Positivo	0,224	0,531
Direto	Negativo	0,217	0,482
Transversal	Positivo	0,199	0,394
Transversal	Negativo	0,208	0,414

4.2 Montagem experimental do SCA100T-D02

Com a finalidade de testar o funcionamento prático do SCA100T-D02 e obter familiarização com o mesmo, definiu-se por efetuar primeiramente uma montagem experimental. A montagem do circuito de ensaio com o SCA100T-D02 possibilitou realizar as medições de inclinação nos eixos X e Y através de valores de medições fornecidos pelo mesmo e pela mesa tridimensional. A comparação dos valores das medições ocorreu com as medições de saída do canal analógico do SCA100T-D02, que foram efetuadas por um multímetro digital. Além de possibilitar as medições, a montagem experimental também possibilitou a verificação da estabilidade do sinal elétrico de saída do SCA100T-D02, o qual é importante para o reconhecimento da necessidade de instalação de um filtro no sinal de saída. A Figura 44 mostra o SCA100T-D02 montado em uma placa de circuito impresso que está fixa a um apoio regulável e estes sobre a mesa tridimensional. Através do apoio regulável é possível proceder com a inclinação do SCA100T-D02, alterando o Ângulo de medição tanto para a mesa tridimensional como para o SCA100T-D02.

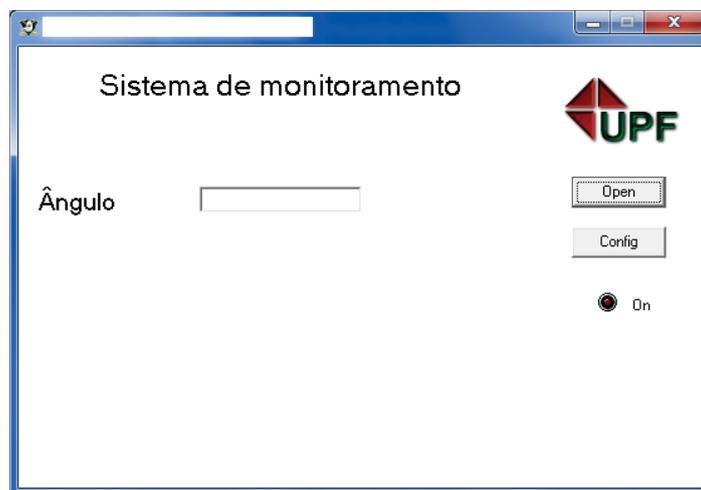
Figura 44. Ensaio experimental com o SCA100T-D02 na mesa tridimensional.



As medidas retiradas da montagem experimental não são importantes para a verificação da exatidão do SADI, visto que todo o sistema criado para possibilitar a condição de inclinação estava montado de forma provisória. As medidas são importantes para garantir a montagem correta do sistema de fixação do SCA100T-D02 na sonda, bem como o conhecimento obtido sobre a estabilidade do sinal de saída do mesmo, e a possibilidade de verificar o processo de comunicação SPI através da sua porta serial.

Junto com a montagem experimental foram desenvolvidas as atividades de construção de uma IHM, também experimental a qual tem a função de comunicação serial SPI com o SCA100T-D02, junto com o envio dos dados a um PC através de uma comunicação serial sem fio. Ainda, fez parte da montagem experimental o desenvolvimento de um programa dedicado ao recebimento dos dados provindos da IHM, ao armazenamento destes dados e a exibição dos mesmos no monitor do PC. A Figura 45 apresenta a interface gráfica elaborada em linguagem Builder C++, onde a janela de interface apresenta o valor do ângulo medido, disponibilizando ainda, um ícone *config*, de configuração da porta de comunicação, um ícone *open*, utilizado para iniciar o processo de medição e uma indicação *on* para quando o sistema estiver ligado, ou seja, efetuando medições.

Figura 45. Interface gráfica construída para o ensaio experimental.



5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Procedimento dos ensaios

Foram definidos para o SADi cinco ensaios, sendo eles:

- ensaio comparativo entre o inclinômetro de referência e o SADi em eixo direto ao esforço no tubo guia;
- ensaio comparativo entre o inclinômetro de referência e o SADi em eixo transversal ao esforço no tubo guia;
- ensaio de repetição com o SADi em eixo direto da sonda;
- ensaio de repetição com o SADi em eixo transversal da sonda;
- ensaio do sistema de medição de profundidade.

O local de referência para o ensaio do SADi, ocorreu nas instalações do CETEC, no Campus I da Universidade de Passo Fundo (UPF), na área experimental de ensaios de esforços transversais em estacas de concreto armado, onde tais estacas encontram-se enterradas no solo, como demonstrado na Figura 46.

Figura 46. Ponto de ensaio em campo.



As estacas de concreto apresentam tubos guias de 65 mm de diâmetro interno com quatro ranhuras guias e profundidade de instalação de 8 m. As colunas são submetidas a esforços transversais e pontuais localizado na parte superior da mesma, sendo esperado um comportamento curvo da coluna após a aplicação dos esforços.

O ensaio prático ocorreu utilizando as várias colunas disponíveis idênticas à demonstrada na Figura 46. As medições ocorriam somente 10 dias após a coluna sofrer a aplicação do esforço, aguardando desta forma uma acomodação da mesma. Já como medição de referência para o ensaio prático, foi utilizado um inclinômetro de propriedade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da marca *Geokon*. Na Figura 47 é possível verificar a inserção da sonda de referência em um dos tubos guias disponível na área do CETEC.

Figura 47. Sonda de referência para o ensaio prático.



5.2 Introdução

Toda a parte de calibração do SADi realizada no capítulo anterior não apresentam uma condição real de utilização para o SADi, visto que todas as medições realizadas ocorreram em condições estáticas, ou seja, a sonda não estava em movimento. Como a condição proposta para o SADi é realizar medições de inclinação e profundidade de forma automática e com a sonda em movimento, é necessário ensaiar o SADi em uma situação prática em campo.

Durante os primeiros ensaios práticos em campo com o SADi, foi possível verificar que o sistema de medição de inclinação estava sofrendo com as variações de velocidade que ocorriam na movimentação da sonda, visto da grande oscilação e variação nas medições que ocorriam no SADi. Verificou-se assim, que mesmo com o sistema de disco de inércia implementado junto ao suporte guia, ainda estava ocorrendo interferência de acelerações na sonda.

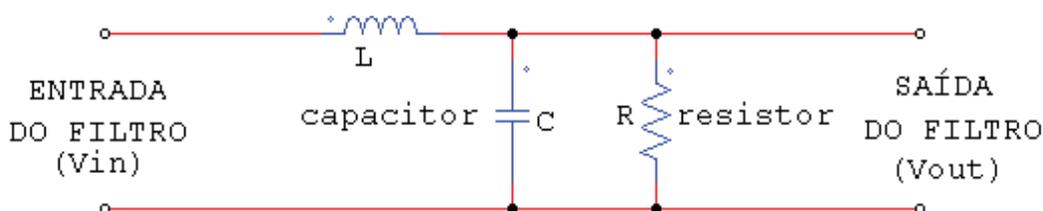
Definiu-se por realizar uma modificação no sistema de conversão dos dados das medições que provem do SCA100T-D02, realizando uma condição de média em conjunto com um sistema de filtro passa-baixa. O sistema de média ajuda na manutenção de uma tendência, assim, como o sistema de recebimento de medições providas do SCA100T-D02 é rápido, ocorrendo aproximadamente 50 medições em um segundo, efetivou-se uma média aritmética com seis medições consecutivas, onde desta média resulta o valor que será utilizado como valor verdadeiro de leitura. Desta forma, se a sonda do SADi excursionar a uma velocidade de 15 cm/s, a cada segundo serão geradas 8 novas atualizações de valores de inclinação. Na prática, a média ajudou a estabilizar o valor de leitura do SADi, não ocorrendo valores discrepantes, mas os valores das medições permaneceram oscilantes durante o processo de medição com o SADi.

Foi então utilizado no programa de conversão um filtro passa-baixa digital. Pela teoria de filtros, os filtros passa-baixa somente permitem a passagem sem atenuação ou com pouca atenuação de sinais que apresentem frequências menores que a frequência de corte do filtro, sendo que para frequências acima da frequência de corte do filtro os sinais são fortemente atenuados. Para o SADi não há frequência de oscilação do sinal, mas há uma condição de variação da medição angular entre medições antecessoras e sucessoras a um valor medido. Desta forma é possível criar uma condição que possibilite caracterizar a

aplicação de um filtro passa-baixa. Como há uma tendência nas medições de inclinação de solos de ocorrerem pequenas alterações nas medições angulares consecutivas ao longo do tubo guia, principalmente no caso do SADI, que apresenta um ciclo de leitura de 8 atualizações por segundo e para uma suposta velocidade de excursão da sonda de 0,15 m/s haverá uma atualização na sua medição a cada 1,87 cm. Estas pequenas variações angulares serão consideradas como baixas frequências, assim, uma grande variação na medição angular consecutiva será reconhecida como alta frequência e acabará tendo seu valor atenuado pelo filtro passa-baixa.

Para determinação da equação do filtro passa-baixa foi definido utilizar um filtro de segunda ordem, ou seja, que contem dois elementos filtrantes de acordo com o circuito elétrico da Figura 48.

Figura 48. Circuito elétrico de um filtro passa-baixa de segunda ordem.



Realizando o equacionamento para o circuito da Figura 48, é obtida a Equação 18.

$$V_{out} = \frac{V_{in} * R}{(w^2 * L * C * R) + (w * L) + R} \quad (18)$$

Das parcelas do denominador da Equação 18, a variável w é a componente comportamental de variação da frequência, assim a parcela $(w^2 * L * C * R)$ deve permanecer na equação do filtro do SADI por apresentar o termo w^2 , onde este efetua a parte de filtragem de forma igual para condições de variações angulares tanto positivas quanto negativas, já a parcela $(w * L)$ deve ser retirada da equação do filtro do SADI, já que a variável comportamental não é elevada ao quadrado, assim desequilibra o filtro para o SADI, pois somará para sentidos variações positivas e irá subtrair para variações negativas. Já a terceira parcela é a condição da resistência da carga do filtro, que também está presente no numerador da Equação 18 e na primeira parcela do denominador. Pela análise de circuitos sobre o filtro passa-baixa da Figura 48, quanto menor for a resistência de carga

maior será a queda de tensão sobre o elemento L. Logo o comportamento da atenuação do filtro apresenta para pequenas variações nas medições angulares sucessoras uma elevada atenuação. Desta forma, iniciou-se os testes do filtro com o valor de R igual a 1 (um), por se tratar de um valor pouco atenuante para a Equação 18. A definição dos termos L e C, como eles somente aparecem uma única vez na Equação 18 e o termo R é igual a um, é necessário definir apenas a parcela única da multiplicação entre L e C. A equação do filtro do SADi é então definida através da Equação 19.

$$V_{out} = \frac{v_{in}}{\omega^2 * LC + 1} \quad (19)$$

Como condição inicial para o filtro do SADi, estipulou-se que para uma variação angular de 30% entre a medida anterior tomada como base e a sua medida angular consecutiva, o filtro deve reduzir a diferença entre as medições em 50 %. Utilizando o simulador gráfico *Graph* e transformando a variável “w” na variável “x”, foi possível efetuar alterações da constante LC, até encontrar um valor apropriado a ser utilizado seguindo as condições analisadas previamente, obtendo assim a Equação 20.

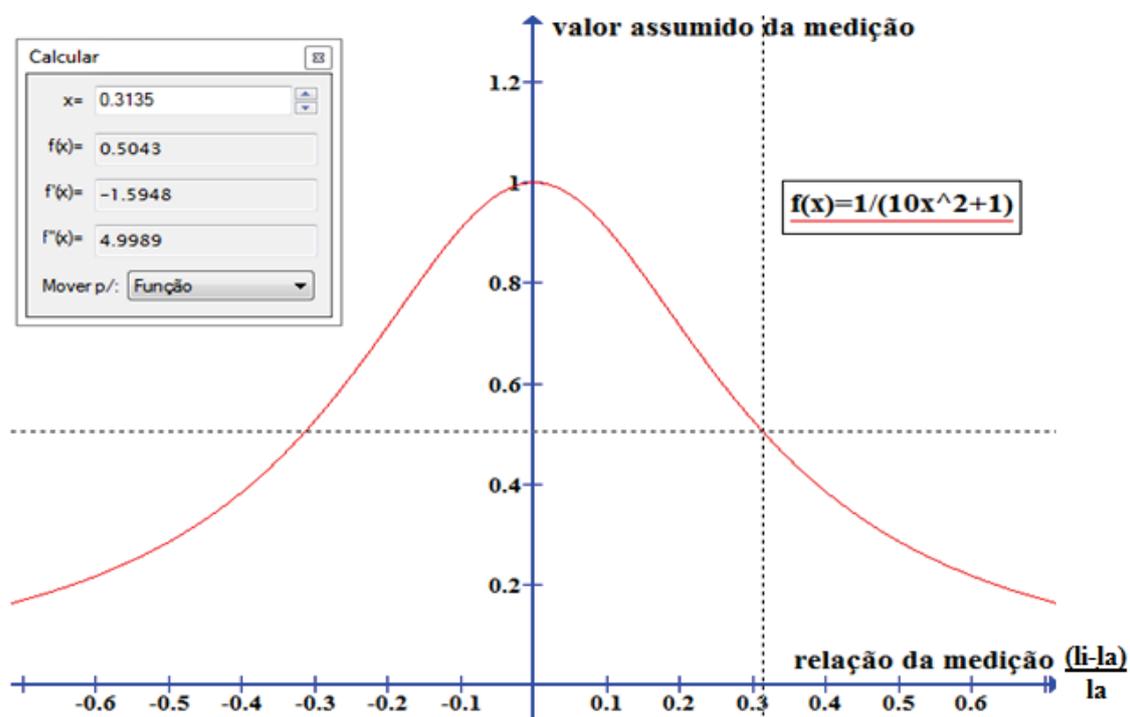
$$F_i = 1 / \{ 10 * \left[\frac{(I_i - I_a)}{I_a} \right]^2 + 1 \} \quad (20)$$

A partir da Equação 20, a parcela “Fi” representa o fator de inclinação assumido para atenuação da diferença entre os valores consecutivos de inclinação. A parcela “Ii” é o valor enviado pela sonda do SADi para o ponto em medição, e pode conter influências das variações das acelerações e a parcela “Ia” é a média aritmética das últimas quatro leituras, ou seja é a tendência do comportamento da inclinação da sonda, logo a parcela “(Ii-Ia)/Ia” é a variável comportamental “w” da Equação 19, que é a variação angular entre duas medições consecuentes com base na medição anterior. O comportamento da Equação 20 pode ser verificado de forma gráfica a partir da Figura 49, onde esta apresenta no eixo das abscissas a inscrição “relação da medição”, que é definida pela parcela “(Ii-Ia)/Ia” e no eixo das ordenadas identifica-se a inscrição “ valor assumido da medição”, que é definido pela parcela “Fi”.

É possível verificar através da Figura 49, na janela Calcular, onde esta é referenciada ao cruzamento das linhas pontilhadas sugestivamente escolhida, o ponto de cruzamento

definido pelo valor da ordenada “f(x)” igual a 0,5043, ou seja, haverá uma atenuação de 50% da variação da medição do ponto em relação à média. Atenta-se que a atenuação de 50% ocorrerá no ponto 0,313 das abscissas, assim uma variação angular de 31,3% em relação à média das últimas quatro medições atenua a variação em 50%, conforme estipulado para um primeiro teste com o filtro passa-baixa no SADi.

Figura 49. Resposta do Filtro passa baixa implementado no programa.



A atuação do filtro implementado através da Equação 20, deve ocorrer sobre a diferença entre os valores angulares medidos em situações consecutivas. A Equação 21 define a resposta filtrada para o valor de inclinação medido pela sonda do SADi, sendo a equação implementada no programa de conversão do sinal do SCA100T-D02.

$$I_f = [F_i * (I_i - I_a)] + I_a \quad (21)$$

Logo, o valor assumido pelo SADi como ângulo filtrado é o resultado “If” da Equação 21, que apresenta um resultado tendencioso, pois atenua-se a diferença entre as

medidas sucessivas e soma-se a média anterior. Pode-se afirmar assim, que o sistema opera sobre uma tendência. Embora o valor de “If” seja assumido como real pelo SADi, este valor não é utilizado para o cálculo da média das últimas quatro medições “Ia”. Neste caso assume-se para realização da média o valor da medição “Ii”. Obtém-se assim, uma condição de agilidade no acompanhamento das variações das medições angulares provindas da sonda do SADi, pois todo o sistema de filtragem acaba por atrasar o acompanhamento do sinal real. Assim, se caso ocorrerem variações de medições sucessivas de proporção elevadas e, estas forem verdadeiras, sem sofrer a influencia das acelerações, seus valores serão pouco atenuados inicialmente, pois, para o cálculo da média o SADi irá demorar o ciclo de quatro leituras para modificar esta média, adequando o filtro para o comportamento da nova tendência.

Após a implementação do filtro passa-baixa no programa de conversão do sinal do SCA100T-D02, as medições efetuadas pelo SADi apresentaram uma estabilização significativa comparativamente a situação sem o filtro, ficando mantida esta condição para a realização dos testes de campo.

5.3 Apresentação dos resultados do SADi

Como já definido na seção 4.1.2, o SADi apresenta os valores das medições diretamente na tela do PC e também armazena as mesmas em um arquivo eletrônico previamente configurado com a extensão .CSV. Para todos os ensaios apresentados neste trabalho, além de outros ensaios realizados, o SADi disponibiliza o arquivo como demonstrado na Figura 50.

Logo, é necessário realocar os valores da tabela, utilizando o separador padrão do arquivo, que é a vírgula. Desta forma, o arquivo resultante estará adequado para realizar gráficos e outras condições requeridas para a efetuação de análises. São utilizados recursos das próprias planilhas eletrônicas para efetuar esta realocação dos valores, resultando em um arquivo conforme apresentado na Figura 51.

Figura 50. Arquivo gerado pelo SADi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Profundidade,ângulo direto,X direto,Y direto,ângulo transversal,X transversal,Y transversal								
2	0.15,-1.13,-0.0030,0.1500,0.52,0.0014,0.1500								
3	0.30,1.36,0.0006,0.2999,-2.04,-0.0040,0.2999								
4	0.45,1.36,0.0042,0.4499,-2.04,-0.0093,0.4498								
5	0.60,1.36,0.0077,0.5998,-1.73,-0.0138,0.5997								
6	0.75,1.20,0.0109,0.7498,-1.88,-0.0188,0.7497								
7	0.90,1.20,0.0140,0.8998,-2.04,-0.0241,0.8996								
8	1.05,1.36,0.0176,1.0497,-1.96,-0.0292,1.0495								
9	1.20,1.36,0.0211,1.1997,-2.04,-0.0346,1.1994								
10	1.35,1.28,0.0245,1.3497,-2.04,-0.0399,1.3493								
11	1.50,0.90,0.0268,1.4996,-1.96,-0.0450,1.4992								
12	1.65,0.98,0.0294,1.6496,-1.81,-0.0498,1.6491								
13	1.80,1.05,0.0321,1.7996,-1.96,-0.0549,1.7990								
14	1.95,0.98,0.0347,1.9496,-2.19,-0.0606,1.9489								
15	2.10,0.98,0.0373,2.0995,-2.19,-0.0663,2.0988								
16	2.25,1.20,0.0404,2.2495,-1.81,-0.0711,2.2487								
17	2.40,1.28,0.0437,2.3995,-2.11,-0.0766,2.3986								
18	2.55,1.28,0.0471,2.5494,-2.11,-0.0821,2.5485								
19	2.70,1.36,0.0507,2.6994,-1.96,-0.0872,2.6984								
20	2.85,1.28,0.0540,2.8494,-2.19,-0.0930,2.8483								
21	3.00,1.28,0.0574,2.9993,-1.96,-0.0981,2.9983								
22	3.15,1.20,0.0605,3.1493,-1.81,-0.1028,3.1482								
23	3.30,1.20,0.0636,3.2993,-1.96,-0.1080,3.2981								
24	3.45,1.13,0.0666,3.4492,-1.96,-0.1131,3.4480								
25	3.60,1.13,0.0695,3.5992,-1.88,-0.1180,3.5979								

Com os resultados agora divididos em células na planilha eletrônica e seus valores de deslocamentos horizontais já calculados, a construção de gráficos e as ações de copiar e colar valores, mover valores e importar valores de outros arquivos é toda definida pela aplicação dos conhecimentos no programa da planilha eletrônica que estiver sendo utilizada. Desta forma, toda a informação da medição está disponibilizada ao uso, efetivando uma adequada situação para a ocorrência de análises com os valores das medições.

Figura 51. O arquivo gerado pelo SADi modificado na planilha eletrônica.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Profundidade	ângulo dir	X direto	Y direto	ângulo tra	X transver	Y transversal
2	0,15	-1,13	-0,003	0,15	0,52	0,0014	0,15
3	0,3	1,36	0,0006	0,2999	-2,04	-0,004	0,2999
4	0,45	1,36	0,0042	0,4499	-2,04	-0,0093	0,4498
5	0,6	1,36	0,0077	0,5998	-1,73	-0,0138	0,5997
6	0,75	1,2	0,0109	0,7498	-1,88	-0,0188	0,7497
7	0,9	1,2	0,014	0,8998	-2,04	-0,0241	0,8996
8	1,05	1,36	0,0176	1,0497	-1,96	-0,0292	1,0495
9	1,2	1,36	0,0211	1,1997	-2,04	-0,0346	1,1994
10	1,35	1,28	0,0245	1,3497	-2,04	-0,0399	1,3493
11	1,5	0,9	0,0268	1,4996	-1,96	-0,045	1,4992
12	1,65	0,98	0,0294	1,6496	-1,81	-0,0498	1,6491
13	1,8	1,05	0,0321	1,7996	-1,96	-0,0549	1,799
14	1,95	0,98	0,0347	1,9496	-2,19	-0,0606	1,9489
15	2,1	0,98	0,0373	2,0995	-2,19	-0,0663	2,0988
16	2,25	1,2	0,0404	2,2495	-1,81	-0,0711	2,2487
17	2,4	1,28	0,0437	2,3995	-2,11	-0,0766	2,3986
18	2,55	1,28	0,0471	2,5494	-2,11	-0,0821	2,5485
19	2,7	1,36	0,0507	2,6994	-1,96	-0,0872	2,6984
20	2,85	1,28	0,054	2,8494	-2,19	-0,093	2,8483
21	3	1,28	0,0574	2,9993	-1,96	-0,0981	2,9983
22	3,15	1,2	0,0605	3,1493	-1,81	-0,1028	3,1482
23	3,3	1,2	0,0636	3,2993	-1,96	-0,108	3,2981

5.4 Ensaio comparativo entre o inclinômetro de referência e o SADi

Para o ensaio comparativo entre o SADi e o inclinômetro de referência, optou-se por realizar duas comparações. Tomando como base um tubo guia que sofreu com os esforços de ensaio e acabou sendo movimentado em sua extremidade superior com relação a sua extremidade inferior, compararam-se medições no sentido direto ao movimento e no sentido transversal ao movimento do tubo guia.

Para o ensaio no sentido direto ao movimento do tubo guia, foram efetuadas as medições com o SADi nos quatro sentidos possíveis de medição, sejam elas 0°, 90°, 180° e

270°, onde estes correspondem aos sentidos diretos positivo (0°) e negativo (180°), expressos pela Figura 33 no alinhamento B B' e os sentidos transversais positivo (90°) e negativo (270°), expressos pela Figura 33 no alinhamento A A'. As medições do SADi, nos sentidos direto ao movimento, são provindas do canal em eixo direto do SCA100T-D02, já as medições do SADi, no sentido transversal ao movimento, são provindas do canal em eixo transversal do SCA100T-D02, logo, todas as medições acabam representando o comportamento no sentido direto ao movimento.

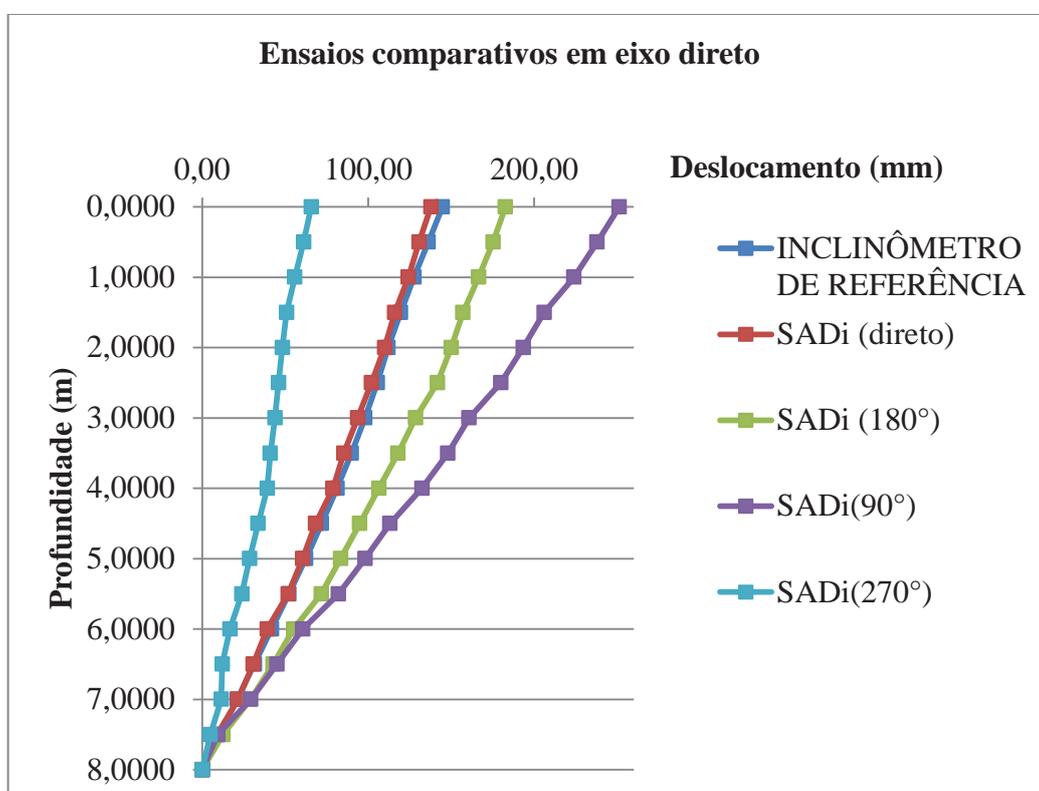
Os valores das medições obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 6 e a demonstração gráfica dos valores é apresentada na Figura 52. Tanto para a Tabela 6 como para a Figura 48, ocorre que nem todos os valores de profundidade da sonda do SADi coincide com os valores de profundidade da sonda de referência. Para possibilitar a comparação, os valores das medições do SADi que apresentam sua profundidade mais próximos da profundidade da sonda de referência, foram realocados para o valor de profundidade da sonda de referência. Já, as demais medições do SADi foram descartadas. Esta modificação não alterou a condição de resposta final do SADi e tampouco a tendência da sua curva.

Tabela 6. Resultados das medições comparativas obtidas em eixo direto.

PROFUNDIDADE (m)	INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA (mm)	SADi (direto) (mm)	SADi (180°) (mm)	SADi(90°) (mm)	SADi(270°) (mm)
0,0000	144,67	137,80	182,70	251,30	65,70
0,50	136,14	130,60	175,20	237,90	61,00
1,00	127,55	124,10	166,50	223,90	55,70
1,50	119,45	116,00	157,10	206,00	50,80
2,00	111,90	109,90	150,00	193,40	48,30
2,50	105,40	101,90	141,70	179,80	45,90
3,00	97,95	93,60	128,50	160,80	43,80
3,50	89,82	85,30	117,90	148,00	41,00
4,00	81,22	78,80	106,40	132,40	39,10
4,50	71,83	68,20	94,90	113,10	33,60
5,00	62,30	60,50	83,30	98,10	28,50
5,50	52,15	51,70	71,70	82,10	23,80
6,00	41,71	39,10	55,00	60,60	16,70
6,50	31,35	30,60	42,60	45,00	12,00
7,00	21,12	21,40	29,00	29,20	11,40
7,50	10,28	8,80	12,40	9,30	4,70
8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Neste ensaio comparativo, quando a sonda do SADi foi utilizada em medição direta positiva, em relação ao sentido do movimento da coluna, isto é na posição de 0° , os valores das medições obtidos pelo SADi apresentaram um comportamento muito similar ao do inclinômetro de referência. Já, com a sonda do SADi posicionada em sentido direto negativo ao movimento, isto é 180° , os valores das medições aumentando demasiadamente. É possível que ocorra tal situação, já que a equação de linearidade para o sentido positivo do eixo direto não é a mesma equação para o sentido negativo de eixo direto, indicando que pode haver necessidade de ajuste na equação de linearidade para esta situação.

Figura 52. Gráfico dos ensaios comparativos em eixo direto.



Com relação às medições no eixo transversal do SADi em sentido positivo (90°) e negativo (270°), seus valores acabaram ficando distante do valor esperado, mas verifica-se que os comportamentos contrários apresentam um distanciamento do valor de referência quase que equidistante. Esta condição pode ser caracterizada por erro no zeramento entre o corpo da sonda e o SCA100T-D02, pois se somados os deslocamentos totais das medições obtidas pelo posicionamento a 90° e a 270° totalizam 317 mm e dividindo por dois esta

medição chega ao valor médio de 158,5 mm, valor próximo ao encontrado pelo inclinômetro de referência que é de 144,67. Caso for verdadeira a expectativa de erro de zero, este processo irá se repetir para o ensaio comparativo em eixo transversal.

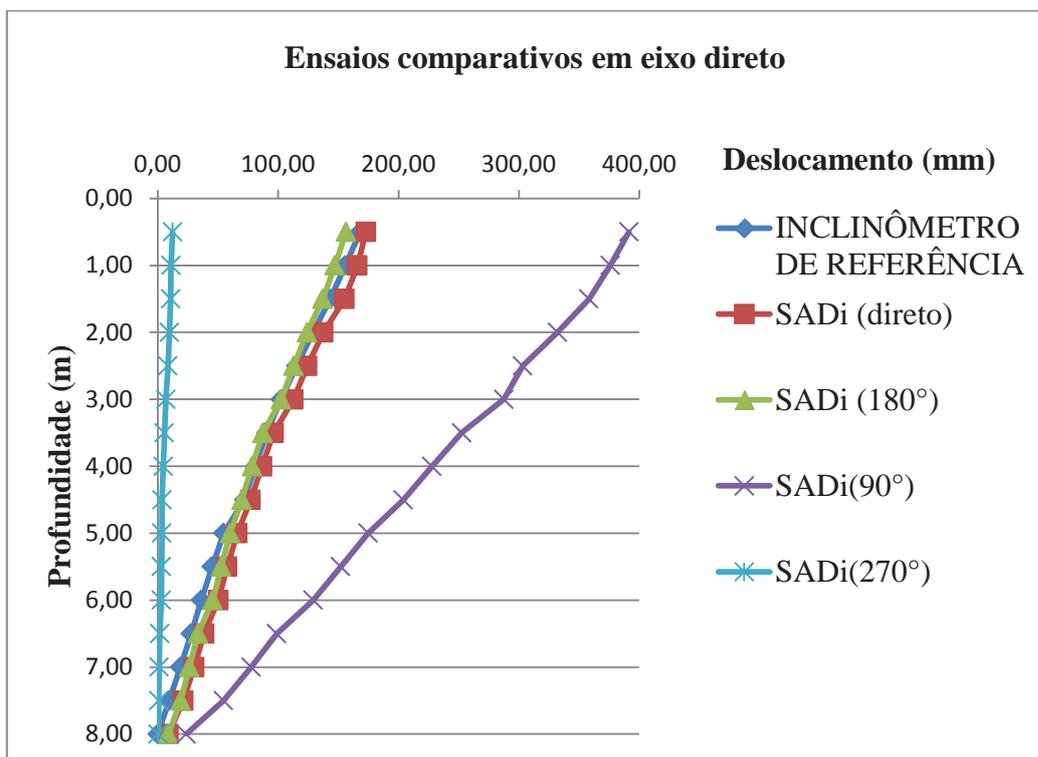
A realização do ensaio comparativo de eixo transversal seguiu o mesmo procedimento do ensaio de eixo direto, somente realizando a tomada dos valores das medições para o sentido transversal ao movimento sofrido pelo tubo guia. Na sequência foram sendo alteradas as posição da sonda do SADi a cada 90° como no ensaio ocorrido para o sentido direto.

Os valores das medições obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 7 e a demonstração gráfica dos valores é apresentada na Figura 49. Tanto para a Tabela 7 como para a Figura 49, ocorreram as realocações dos valores das medições conforme proximidade dos valores de profundidade do SADi e da sonda de referência.

Tabela 7. Resultados das medições comparativas obtidas em eixo transversal.

PROFUNDIDADE (m)	INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA (mm)	SADi (direto) (mm)	SADi (180°) (mm)	SADi(90°) (mm)	SADi(270°) (mm)
0,50	168,08	173,00	156,40	391,50	12,40
1,00	155,79	165,80	147,10	376,00	11,00
1,50	143,22	155,20	137,00	358,20	10,80
2,00	129,18	137,60	124,00	332,20	9,70
2,50	115,41	124,20	113,00	303,20	8,50
3,00	102,36	112,70	102,50	287,50	6,80
3,50	90,49	96,20	87,30	252,60	5,60
4,00	81,02	86,70	78,30	227,90	4,60
4,50	71,97	77,10	69,80	204,00	3,60
5,00	63,38	66,00	60,20	174,80	3,40
5,50	54,73	57,60	52,70	151,90	3,10
6,00	45,13	50,30	45,60	129,10	3,00
6,50	36,13	38,50	33,40	98,80	1,70
7,00	27,69	30,30	26,30	77,50	1,10
7,50	18,72	21,20	19,10	54,60	0,90
8,00	9,33	8,90	8,70	23,70	0,50

Figura 53. Gráfico dos ensaios comparativos em eixo transversal.



Neste ensaio comparativo, vê-se os valores das medições em eixo direto do SADI, obtendo uma boa similaridade em relação ao valor medido pelo inclinômetro de referência. Com relação à comparação entre os ensaios comparativos em sentido direto e transversal ao movimento do tubo guia, a medição do ensaio em sentido direto ao movimento utilizando a sonda em eixo direto negativo, apresentou uma discordância em relação ao valor de referência, o que não ocorreu no ensaio no sentido transversal ao movimento do tubo guia. Acredita-se que esta condição é decorrente de medições errôneas, devido a influências das acelerações durante o excursionamento da sonda, acarretadas pela forma como a sonda sofreu o deslocamento. Esta situação pode ser minimizada através da alteração das constantes do filtro digital.

Já com relação aos valores das medições em eixo transversal do SADI, os mesmos apresentaram um distanciamento do valor medido pela sonda de referência, mas apresentando um comportamento equidistante ao valor de referência, muito similar ao ocorrido no ensaio anterior. Logo, a expectativa do erro de ajuste no zeramento do eixo transversal está confirmada, pois se for realizada a mesma análise efetuada para o ensaio anterior, somando os valores acumulados das medições das posições de 90° e 270° e dividir seu resultado por dois é encontrada a média de 201,95 mm, valor mais próximo do valor encontrado pelo inclinômetro de referência, que é de 168,08 mm.

Outra análise que ocorreu durante as realizações dos ensaios foi o de tempo para efetuação das medições. Para os ensaios o deslocamento total da sonda pelo tubo guia era de 8 m, sendo que em uma quantidade total de 10 medições para o SADi os tempos de excursão da sonda variaram entre 68 segundos e 81 segundos, o que representa uma velocidade média entre de 0,098 m/s e 0,117 m/s, embora o movimento da sonda seja controlado manualmente e existam variações de velocidade durante estas movimentações. Já para o inclinômetro de referência com a mesma quantidade de medições, as mesmas resultaram em tempos variando entre 109 segundos e 122 segundos. Obtém-se, desta forma, uma vantagem na utilização do SADi que é a redução do tempo de medição, que para locais com muitos pontos a serem medidos traria grandes vantagens.

Outra vantagem do SADi em relação ao inclinômetro de referência ocorreu no número de medições efetuadas no tubo guia. O inclinômetro de referência apresenta uma sonda com medição em um sentido, o que necessita realizar quatro medições. Já o SADi, como possui medições em dois sentidos, são necessários apenas duas medições.

5.5 Ensaio de repetição com o SADi em eixo direto da sonda

Para verificar a condição prática de repetibilidade de medição com o SADi foi necessário ensaiar cada um dos eixos de medição. Apenas, os ensaios de repetição de eixo direto foram realizados em dois tubos guias, sendo repetidas três medições em cada tubo guia. Os valores das medições estão apresentados no Anexo 2 e no Anexo 3. Na Figura 54 e Figura 55 estão apresentados os resultados gráficos das medições realizadas.

Com os valores das medições dos ensaios de repetição no eixo direto do SADi, foi possível calcular o desvio padrão encontrado nas medições. Para o primeiro ensaio o desvio padrão percentual médio calculado entre as medições das três repetições é de 2,05% e para o segundo ensaio o desvio padrão percentual médio calculado é de 2,08%. Assim, tomando pelo pior caso, o SADi apresenta uma variação de leituras em repetição em seu eixo direto de $\pm 2,08\%$ do valor médio da sua leitura.

Figura 54. Primeiro ensaio de repetição para o SADi em eixo direto.

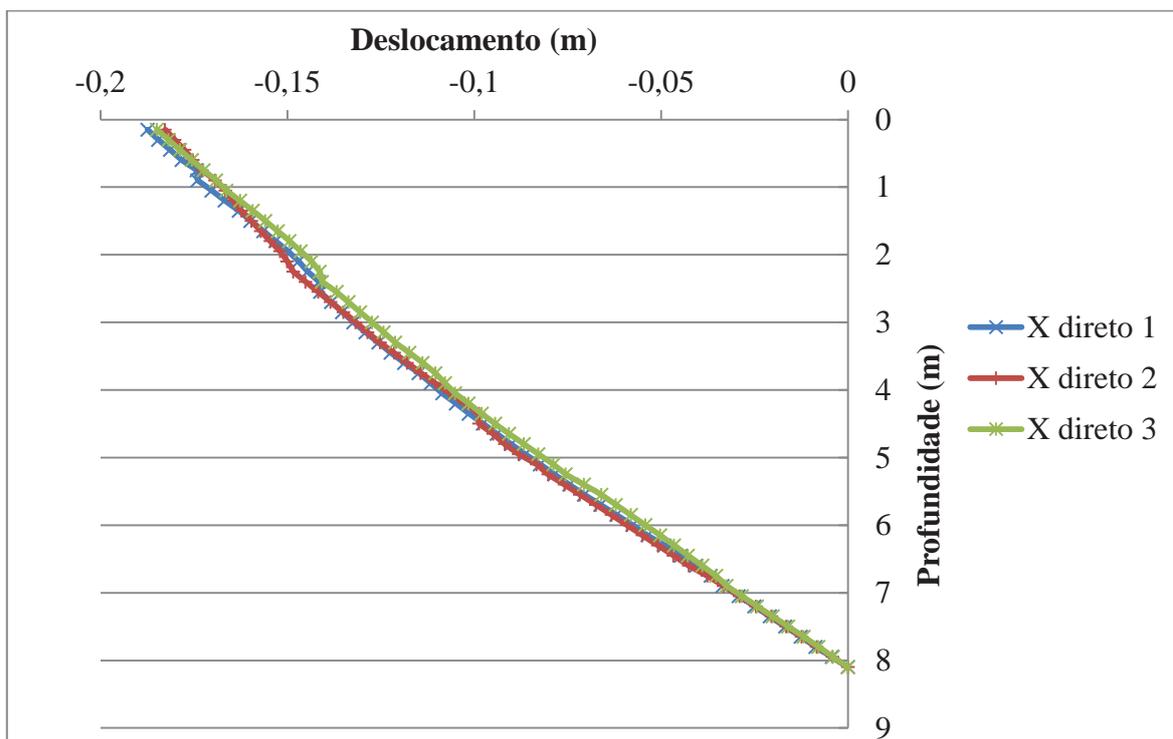
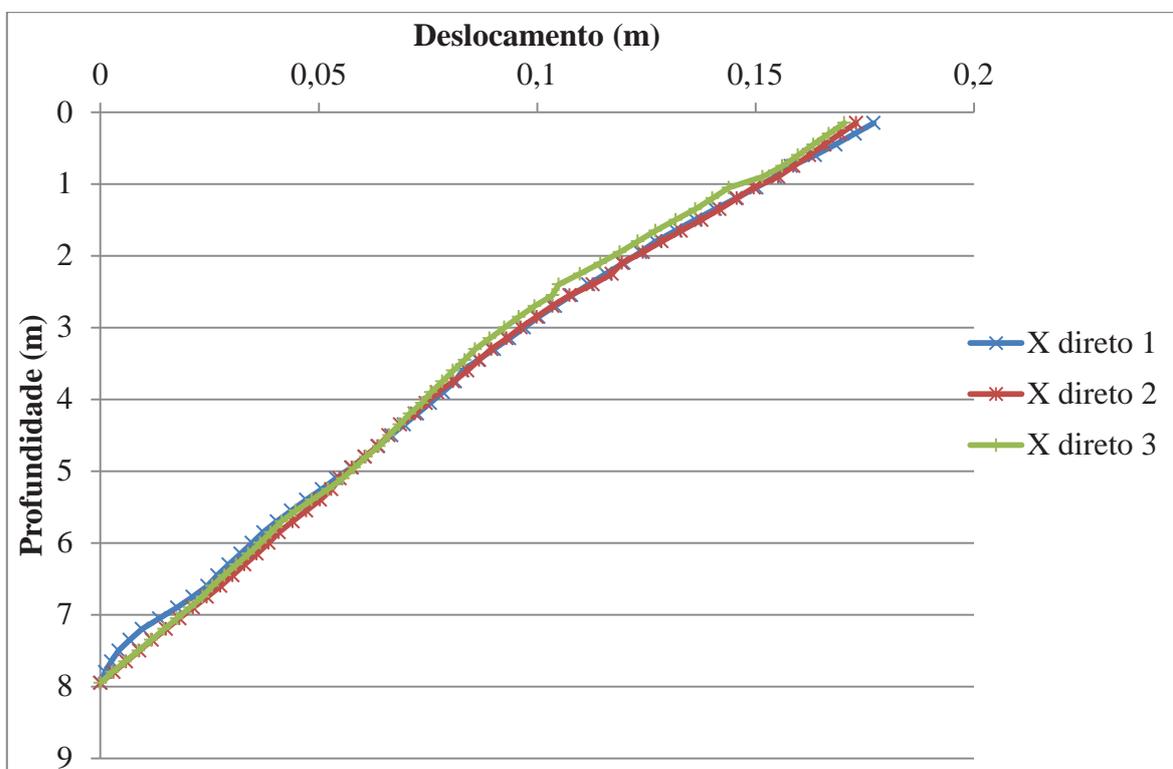


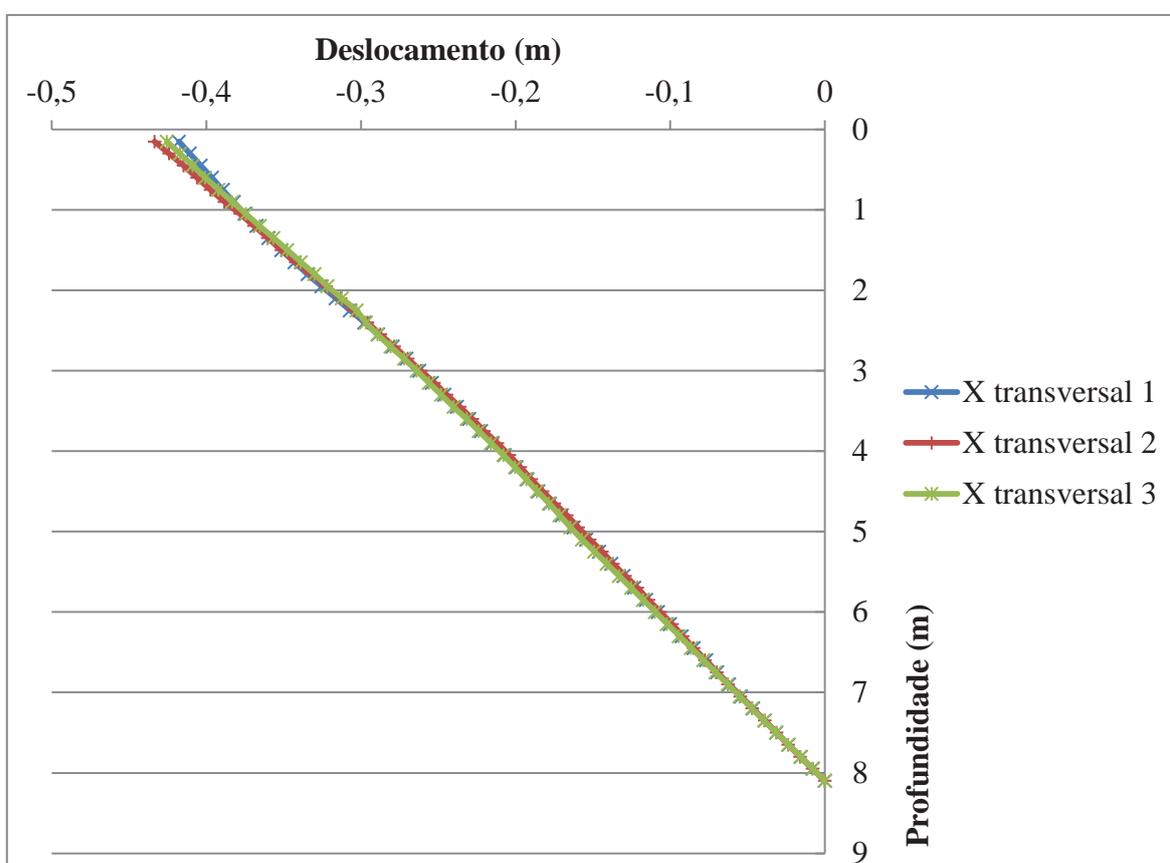
Figura 55. Segundo ensaio de repetição para o SADi em eixo direto.



5.6 Ensaio de repetição com o SADi em eixo transversal da sonda

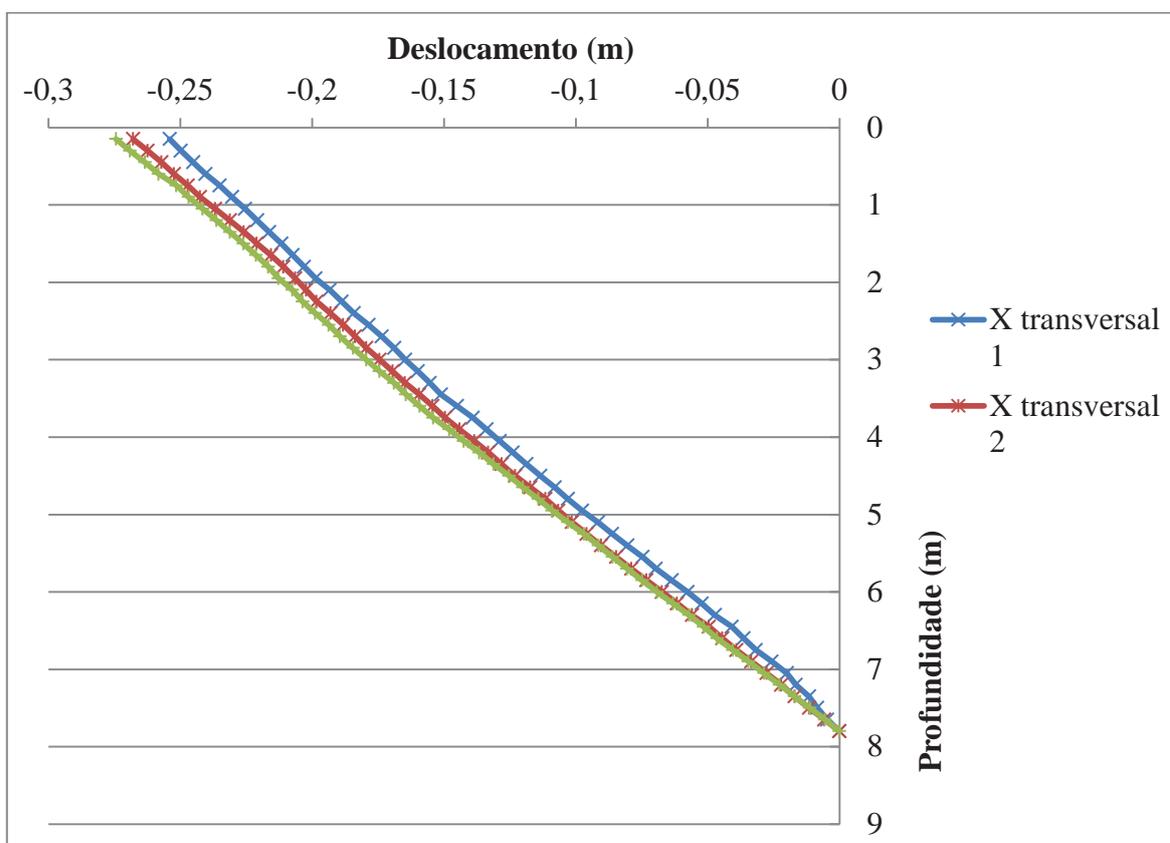
De igual forma ao ensaio de repetição de eixo direto, foram realizados dois ensaios em tubos guias diferentes, realizando três repetições de medições em cada tubo guia. Os resultados dos ensaios estão apresentados no Anexo 4 e no Anexo 5. Na Figura 56 e Figura 57 estão apresentados os resultados gráficos das medições realizadas.

Figura 56. Primeiro ensaio de repetição para o SADi em eixo transversal.



A partir do ensaio de repetição no eixo transversal do SADi, foi determinado o desvio padrão percentual médio calculado entre as três medições do referentes ao primeiro tubo guia, onde resultou em 1,94%, já para o segundo ensaio, o desvio padrão percentual médio calculado foi de 1,02%. Assim, tomando pelo pior caso o SADi apresenta uma variação de leituras em repetição no seu eixo transversal de $\pm 1,02\%$ do valor médio da sua leitura.

Figura 57. Segundo ensaio de repetição para o SADi em eixo transversal.



5.7 Ensaio do sistema de medição de profundidade

Embora já apresentados os resultados dos ensaios com o SADi na questão das medições de deslocamentos horizontais, o ensaio do sistema de medição de profundidade ocorreu primeiramente. Para realizar a verificação da correta medição de profundidade por parte do SADi, foi utilizada uma instalação de um tubo guia de 8 m de extensão, inicialmente tido como extensão correta, pois utiliza 4 barras de tubo guia, onde cada barra mede 2 m. O comprimento total do tubo foi conferido utilizando uma trena e o resultado apontou um valor total de 8,015 m. Foi então lançada a sonda até o fundo do tubo guia, mantendo-se uma pequena tração no cabo elétrico a fim de não deixá-lo solto, mas de forma a não suspender a sonda. Em seguida iniciou-se o processo de deslocamento da sonda, com a mesma próxima ao final do tubo guia, o SADi apresentava o valor de profundidade de 7,5 m. A sonda foi movimentada lentamente o SADi indicar o valor de

7,65 m, neste momento a sonda do SADi apresentava uma pequena parte já exposta ao tubo guia, que em medida representava 2 cm. Somando desta maneira a profundidade indicada pelo SADi de 7,65 m, com a medida do corpo da sonda do SADi que é de 0,39 m é totalizada a medida de 8,04 m e descontando da medida que a sonda já havia passado do tubo guia, resulta na medição de 8,02 m. Assim, a diferença entre as medições de profundidade realizadas pela trena e pelo SADi resultou em 5 mm, num total medido de 8000 mm, que representa um erro de 0,06%.

5.8 Ensaio com alteração na resposta do filtro passa baixa

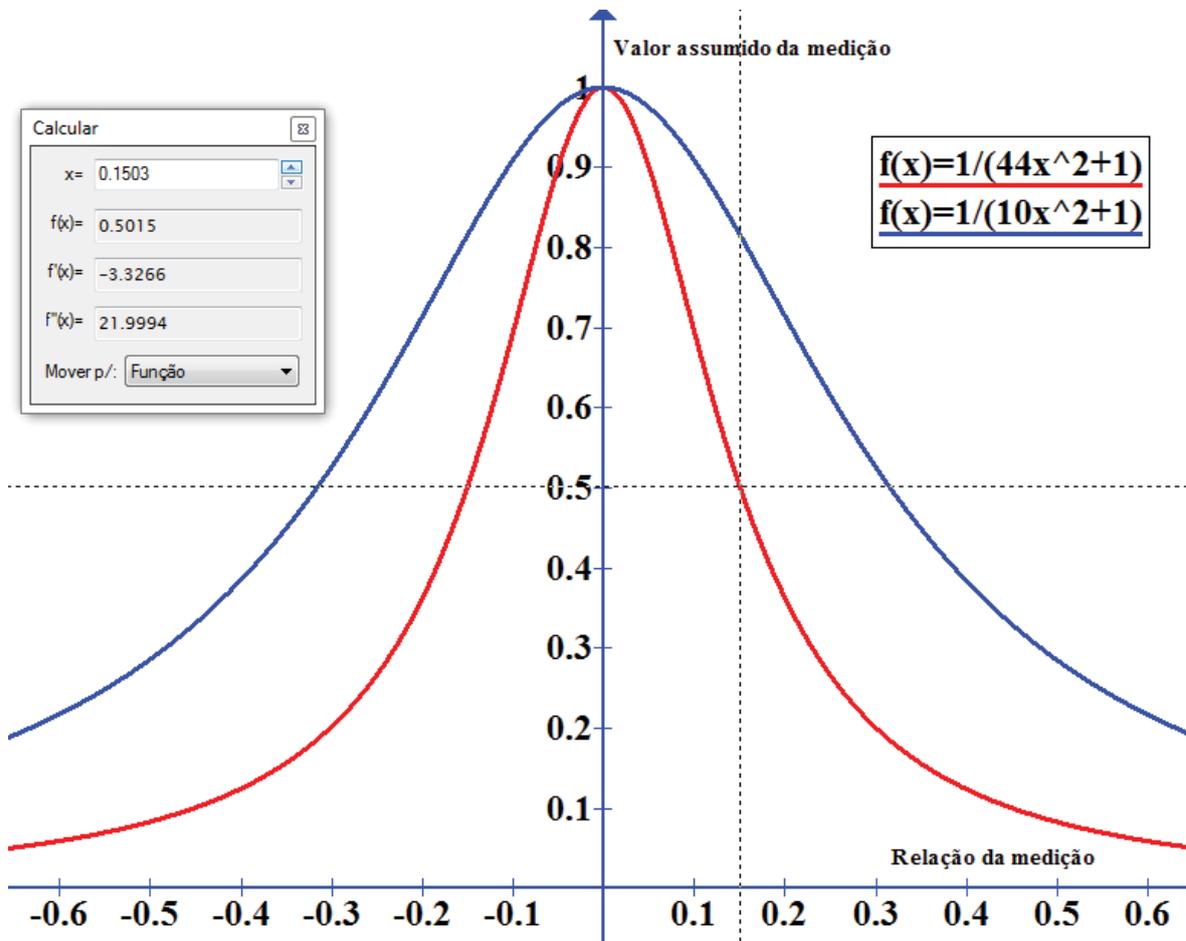
Após as realizações dos ensaios de comparação e de repetição, definiu-se por alterar a resposta do filtro passa baixa digital, implementado no programa do microcontrolador da placa FDC, responsável por receber as informações dos valores das inclinações medidas pelo SCA100T-D02. Em vista de alguns valores medidos durante os ensaios de comparação e repetição e, devido às variações encontradas nos valores das medições totais nestes ensaios, foi alterada a resposta do filtro passa baixa, a fim de aumentar a atenuação sobre os valores medidos, que forem diferentes das médias das medições antecessoras. O filtro utilizado para os ensaios realizados até o momento apresenta uma resposta conforme a Equação 20, que de forma gráfica esta apresentada na Figura 49. A nova equação para o filtro passa baixa digital passou a ser conforme a Equação 22, onde apenas foi aumentado o valor da constante do membro quadrático, o que produz uma atenuação maior, comparativamente a Equação 20.

$$Fi = 1 / \{ 44 * \left[\frac{(Ii - Ia)}{Ia} \right]^2 + 1 \} \quad (22)$$

Como forma de visualização comparativa entre os dois filtros, sejam eles o da Equação 20 e o da Equação 22, a Figura 58 apresenta os mesmos sobrepostos. Comparativamente, o filtro da Equação 20 apresenta uma atenuação de 50% para os valores da relação $[(Ii - Ia)/Ia]$ que são iguais a 0,3135, como é possível verificar na janela Calcular presente na Figura 49. Já, para a Equação 22 o filtro apresenta uma atenuação de 50% para os valores da mesma relação que são iguais a 0,1503, como é possível verificar na janela Calcular presente na Figura 58.

É entendido tanto pela análise da comparação do valor da atenuação analisada no parágrafo anterior, como também através da visualização das respostas gráficas dos filtros implementados, que o filtro oriundo da Equação 22 é muito mais atenuante.

Figura 58. Visualização gráfica das respostas dos filtros passa baixa



Já com a equação do filtro alterada no programa, foram efetuadas novas medições utilizando o SADi em um ensaio de campo, sendo as medições realizadas no mesmo tubo guia utilizado para os ensaios de comparação. A Tabela 8 apresenta os valores das medições efetuadas pelo SADi, onde no total foram realizadas três medições e junto a estas está a medição efetuada pelo inclinômetro de referência. Para possibilitar a comparação dos valores de medição do inclinômetro de referência com os valores de medição do SADi, alguns valores do SADi foram descartados, pois o inclinômetro de referência não possui medições em intervalos de 0,15 m e sim de 0,5 m, assim foram tomados os valores de

medição do SADI nos pontos de profundidades mais próximas ao inclinômetro de referência.

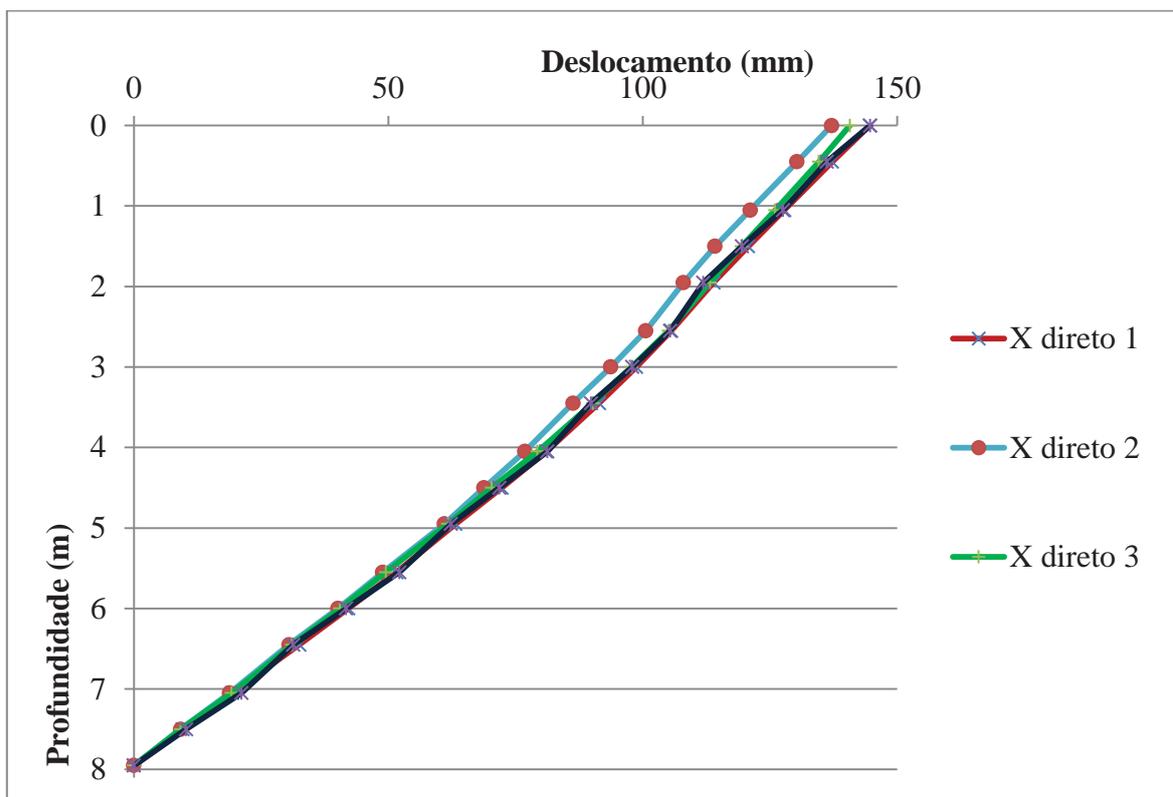
Tabela 8. Valores das medições do SADI com alteração no filtro passa baixa

Profundidade (m)	X direto 1 (mm)	X direto 2 (mm)	X direto 3 (mm)	Inclinômetro de Referência (mm)
0	144,6	137,1	140,7	144,67
0,45	137,2	130,3	134,6	136,14
1,05	127,8	121,1	126	127,55
1,5	120,7	114,2	119,4	119,45
1,95	113,9	108	113,2	111,90
2,55	105,6	100,6	105,1	105,40
3	98,7	93,7	97,8	97,95
3,45	91,4	86,3	90,2	89,82
4,05	81	76,8	79,3	81,22
4,5	72,3	68,8	70,3	71,83
4,95	63,2	61	61,7	62,30
5,55	51,6	48,9	49,5	52,15
6	42,1	40,1	40,5	41,71
6,45	32,5	30,5	31,1	31,35
7,05	19,3	18,8	19,2	21,12
7,5	9,6	9,2	9,2	10,28
7,95	0	0	0	0,00

Na Figura 59 é possível visualizar de forma gráfica os comportamentos das medições do SADI obtidas após a alteração da equação do filtro passa baixa, junto à medição do inclinômetro de referência.

Notou-se que não houve modificações expressivas em questão de comparação entre as medições do SADI, ficando muito próximas dos ensaios com o filtro da Equação 20. Contudo, ocorreu uma estabilização das medições com relação ao valor medido pela sonda de referência, representando que o SADI ficou mais estável.

Figura 59. Visualização gráfica das medições com o filtro modificado



Com os valores das medições realizadas pelo SADi, determina-se o valor do desvio padrão percentual entre as três medições em 0,209%, sendo este o mesmo desvio padrão percentual encontrado para o ensaio com o filtro passa baixa da Equação 20, que foram de 0,205% e 0,208%.

Na comparação das medições realizadas pelo SADi com a medição realizada pelo inclinômetro de referência, o desvio padrão percentual das médias das medições do SADi foi de 1,89%.

É necessário que ocorram outros ajustes nas constantes do filtro passa baixa, assim possibilitando a verificação de possíveis melhorias no SADi. É importante verificar que o SADi, mesmo realizando medições com a sonda em movimento apresentou um comportamento de sua medição muito similar a sonda de referência que efetuou as medições de forma parada.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho tratou das tecnologias envolvidas na construção de instrumentos de medições de deslocamentos horizontais em solo, conhecidos como inclinômetros. Estes movimentos de solo foram inicialmente definidos e direcionados a locais que apresentam taludes. Entretanto, as aplicações do inclinômetro podem ir além, como no caso de medições de inclinações em colunas metálicas.

Foram realizados estudos sobre a tecnologia empregada atualmente nos inclinômetros e verificadas as possibilidades de melhorias para o sistema. Depois de efetuar as inclusões de novas características no inclinômetro, este recebeu a identificação de SADi, sistema de aquisição de dados de inclinação. O SADi então passou pelos processos de calibração e de ensaio em campo, onde foram realizadas várias comparações a fim de verificar o comportamento do mesmo.

O trabalho atingiu os objetivos traçados, sejam eles, utilização de um acelerômetro MEMS, redução do comprimento da sonda, implementação de um sistema de medição em dois sentidos, realização de um sistema automático de medição de profundidade e a utilização de um PC como IHM.

Foram também apresentadas soluções como o filtro passa baixa e o sistema de disco de inércia, ambos necessários para a realização da medição da inclinação com a sonda em movimento. Este método pode ser transferido para outros equipamentos que sofram com instabilidades nas medições.

O trabalho encontra-se em um estágio avançado, visto dos resultados obtidos, mas ainda não apresenta uma formatação de um produto acabado, sendo necessário realizar algumas adequações de caráter técnico, junto a um maior número de ensaios.

6.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, na metodologia utilizada no desenvolvimento do SADi e realizadas as comparações, é afirmativo que este trabalho atingiu seus objetivos, e conclui-se que:

- uma contribuição tecnológica do SADi ocorre pela utilização do PC como IHM, trazendo uma enorme facilidade na manipulação dos valores das medições, excluindo a necessidade de transferir os dados das medições de uma IHM específica para o PC, possibilitar a verificação dos valores das medições de forma instantânea e ainda, efetuar a visualização gráfica imediatamente após a efetuação da medição;
- validação dos elementos atenuadores das influências causadas pelas acelerações na sonda durante a efetuação das medições, sendo eles, o sistema de disco de inércia, a média dos valores das medições e o filtro passa-baixa. Condicionando a aplicação dos mesmos como indispensáveis;
- é necessário melhorar a resolução da medição para o SADi, realizando uma conversão analógico/digital de 16 bits nos sinais dos canais analógicos do SCA100T-D02;
- a redução do erro de medição do SADi somente ocorrerá com a calibração do mesmo em uma condição de menor resolução na sua medição;
- o sistema de comunicação serial entre a sonda e a placa de conversão de sinal “FDC”, apresentou-se estável, não ocorrendo perda de informações e interferências em seu sinal, sendo desta forma adequado à aplicação ;
- o sistema de comunicação serial sem fio “*Bluetooth*” entre a placa FDC e o PC “IHM”, além de apresentar um comportamento estável e sem perda de informações, garante uma grande flexibilidade no uso da IHM, visto que não existem fios interligando os sistemas;
- o sistema de medição de profundidade operou com uma adequada exatidão, mostrou ser confiável e de fácil manipulação e operação.
- a medição automática da profundidade em conjunto com a da inclinação efetivou para o SADi a condição de um sistema sem erro grosseiro, além de facilitar a operação do sistema durante a medição, acelerando o processo de medição e descaracterizando a necessidade de cabos elétricos especiais com marcações equidistantes ao longo de seu comprimento;
- a metodologia de disponibilização dos valores das medições pelo SADi, é adequada a qualquer tipo de análise, pois além de fornecer todas as medições realizadas, disponibiliza os valores para uso em planilhas eletrônicas;

- obtenção de resultados iniciais favoráveis para continuar com a evolução do SADi, visto dos resultados obtidos nos ensaios comparativos e nos ensaios de repetição;
- embora em alguns ensaios resultados das medições de deslocamento horizontais não ficaram exatos com os valores de referência, o SADi no primeiro instante não busca uma melhora na exatidão da medida, busca sim verificar a possibilidade de incrementar novas tecnologias ao inclinômetro, junto ao processo de medição com a sonda em movimento, verificando o comportamento destas alterações sobre o sistema.

6.2 Sugestões de continuidade

Com o objetivo de dar continuidade a este trabalho são sugeridas algumas linhas de trabalho que visam transformar o SADi em um produto acabado, onde são elas:

- utilizar os canais de saída analógicos do SCA100T-D02 que possui uma resolução de $0,0025^\circ$ e converte-lo em uma palavra de 16 bits com um conversor analógico/digital externo;
- aprimorar o sistema de estabilização de velocidade realizado pelo disco de inércia;
- variar os coeficientes da equação do filtro passa-baixa e realizar um estudo comparativo entre estes coeficientes a fim de determinar a melhor equação;
- implementar um sistema de tração motorizada para a excursão da sonda, o que é visualizado como um agente de redução das acelerações que ocorrem no movimento da sonda;
- ampliar a questão de comunicação do SADi para o envio de dados por GPRS.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, IZABEL G. **Estabilização de Encostas Através de Drenagem Profunda: Estudo de Um Caso de Estabilização com Túnel de Drenagem**. Dissertação de Mestrado, 2006. Disponível em <www.teses.usp.br/.../EstabilizacaoEncostasDrenagemProfunda.pdf>. Acesso em 20 ago. 2011, 22:05:00.

BERTACCHINI, ELEONORA. et. al. **Integrated Surveying System for Landslide Monitoring, Valoria Landslide (Appennines of Modena, Italy)**. 2011.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações: Fundamentos**. 6. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CARDOSO, DANIELA; ROMANA, MANUEL; SÁNCHEZ, MILA. **Método de Avaliação do Risco Associado a Desprendimentos em Taludes em Rocha (Como Parte do Projecto de Investigação Cota)**. 2011. Disponível em <http://oa.upm.es/9266/1/INVE_MEM_2010_85621.pdf>. Acesso em 05 de jul. 2013, 09:00:00.

CARDOSO, R; LYNCE DE FARIA, F; GODINHO, N; MARANHA DAS NEVES, E. **Estudo do Comportamento de um Aterro da Autoestrada A10 Construído com Margas**. Disponível em <http://www.civil.ist.utl.pt/~rafaela/Curriculum_files/11CNG-RCardoso_Aterro_revisto.pdf>. Acesso em 22 ago. 2011, 23:10:00.

CELESTE, WANDERLEY C. **Montagem e Teste de Inclinômetros Microprocessados Utilizando Acelerômetros Baseados em Tecnologia MEMS**. Vitória, 2002. Disponível em <http://www.fca.unesp.br/pos_graduacao/Teses/PDFs/Arq0215.pdf>. Acesso em 12 set. 2011, 14:05:00.

CUSATIS, ANDREA C. **Diagnóstico de Taludes Rodoviários Revegetados Naturalmente na Região de Viçosa, MG**. Tese Magister Scientiae, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

DNIT - MT-DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM-Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico-IPR-Divisão de Capacitação Tecnológica. **Projeto de Aterros Sobre Solos Moles para Obras Rodoviárias**. Rio de Janeiro, 1998.

DUNNICLIFF, JOHN. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Lexington, Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc, 1988.

DYMINSKI, ANDRÉA S. **Noções de Estabilidade de Talude e Contenções**.

EINSENBARGER, CÍCERO N. **Estudo do Comportamento de um Talude Coluvionar Urbano em Santa Cruz do Sul – RS**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre. 2003.

FIGUEIREDO, L.J.; GAFANIZ, A.R.; LOPES, G.S; PEREIRA, R. **Aplicações de Acelerómetros**. Lisboa, 2007. Disponível em <nebm.ist.utl.pt/repositório/download/375>. Acesso em 27 set. 2011, 22:35:00.

FONSECA, ALESSANDRA R. **Auscultação por Instrumentação de Barragem de Terra e Enrocamento Para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão**. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, 2003.

GEOKON. **Inclinometer Systems 6000 séries**. Lebanon, NH. Disponível em <<http://www.geokon.com/products/datasheets/6000.pdf>> Acesso em 27 set. 2011, 17:35:00.

GEORGIEVA, K. et. al. **An Autonomous Landslide Monitoring System based on Wireless Sensor Networks**. Departamento of Civil and Environmental Engineering. Ruhr-University Bochum, Bochum. 2012.

HANTO, D., WIDIYATMOKO, B., HERMANTO, B., PURANTO, B., HANDOKO, L. T. **Real-time inclinometer using accelerometer MEMS**: Research Center for Physics, Indonesian Institute of Sciences. University of Indonesia, 2011.

HERZOG, CECÍLIA P. **Infraestrutura Verde: Sustentabilidade e Resiliência Para a Paisagem Urbana**. Revista Labverde, USP. São Paulo. 2010.

JORGE, FRANCISCO N. DE; BAPTISTI, EDSON DE; GONÇALVES, ALEXANDRE. **Monitoramento em Aterros Sanitários nas Fases de Encerramento e de Recuperação. Desempenhos Mecânicos e Ambiental**. In: Seminário Sobre Resíduos Sólidos "RESID'2004". Belo Horizonte: UFMG, 2004. Disponível em <<http://etg.ufmg.br/~gustavo/geotecniaaplicada/p7.pdf>> .Acesso em 07 set. 2011, 11:32:00.

KOSOW, IRVING L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15. ed. São Paulo : Globo, 2005. 667 p.

KRELLING, PAULO C. L. **Concepção de um Inclinômetro Foto-Mecânico Para Controle Geodésico de Estruturas**. Tese Doutorado. UFPR, Curitiba, 2006. Disponível em <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/7361/TESE+COMPLETA+FINAL.pdf>>. Acesso em 25 ago. 2011, 23:10:00.

MACHADO, WILLIAM G. DE FREITAS. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração**. São Paulo, 2007. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/pt-br.php>>. Acesso em 20 ago. 2011, 22:30:00.

MEDEIROS, SOLON F. **Fundamentos de Medidas Elétricas**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1981.

MENEZES, DIRCEU M. JÚNIOR. **Taludes de Rodovias: Orientação para Diagnósticos e Solução de Problemas**. IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica, 2003. (Visitado 29/04/2012).

MISHRA, P. K. et. al. **Detection of Landslide Using Wireless Sensor Network**. Central Institute of Mining and Fuel Research. Jharkhand, India. 2011.

PERRETO, ELIANE C. D.; COSTA, TATIANE. **Inclinômetro Digital de Talude**. Universidade Positivo, Curitiba, 2011. Disponível em <[http://www.leandrohsouza.com.br/engcomp/attachments/article/113/Inclinometro DigitaldeTalude.pdf](http://www.leandrohsouza.com.br/engcomp/attachments/article/113/Inclinometro%20DigitaldeTalude.pdf)>. acesso em 05 jan. 2012, 21:34:00.

PIMENTA, ITAMAR J.. **Caracterização Geotécnica e Análise de Estabilidade de Taludes de Mineração em Solos da Mina de Capão Xavier**. Dissertação Mestrado. UFV, Viçosa, 2005. Disponível em http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde_arquivos/42/tde-2006-12-14T073940Z-165/Publico/texto%20completo.pdf>. Acesso em 10 jan. 2012, 20:30:00.

RDP ELECTRSENSE, USA. Disponível em <<http://www.rdpe.com/us/hiw-lvdt.htm>>. Acesso em 22 maio 2012, 17:35:00.

RIBAS, RENATO P. **Microsistemas Integrados (MEMS)**. Instituto de Informática – UFRGS, 2011. Disponível em <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap14.pdf>>. Acesso em 02 maio 2012, 20:35:00.

RUSSO, LUIZ N. **Interpretação de Deformação e Recalque na Fase de Montagem de Estrutura de Concreto com Fundação em Estaca Cravada**. Tese Doutorado. USP-Escola de Engenharia de São Carlos, 2005. Disponível em <<http://www.eesc.usp.br/ppgsgs/dissertes/russo.pdf>>. Acesso em 02 de maio 2012, 20:30:00.

SARAIVA, DELCYR BARBOSA. **Materiais elétricos**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 251 p.

SILVEIRA, JOÃO F. A. **Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SILVEIRA, JOÃO F. A.. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C.A.A.; GALVÃO, T.C. de B.; BATISTA, H.P. **Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários: A Experiência da Central de Tratamentos de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte - MG.** Belo Horizonte: 2003. Disponível em <<http://etg.ufmg.br/~gustavo/arquivos/monitoramentobh.pdf>>. Acesso em 08set. 2011 22:35:00.

SIMÕES, GUSTAVO F. **Monitoramento Geotécnico do Aterro Sanitário de Belo Horizonte, Brasil.** Disponível em <<http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/catapre.pdf>>. Acesso em 25 de ago. 2011, 22:05:00.

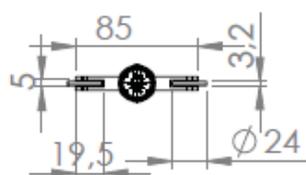
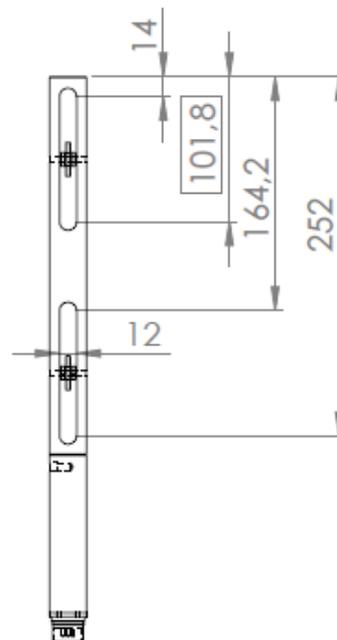
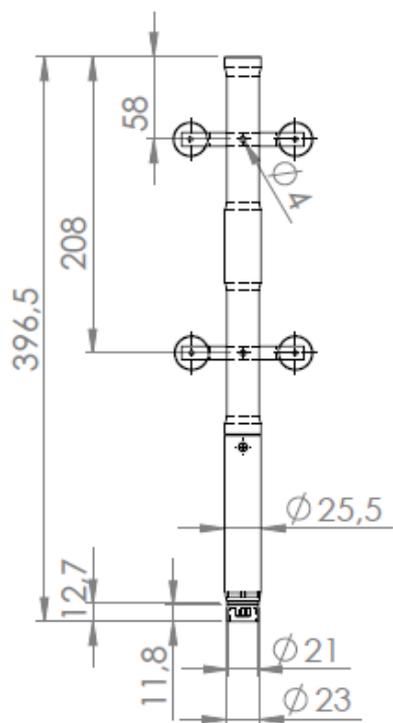
STARK, TIMOTHY D.; CHOI, HANGSEOK. **Slope inclinometers for landslides.** Landslides DOI 10.1007/s10346-008-0126-3.

VTI : VTI TECHNOLOGIES. **Data Sheets, The SCA100T Dual Axis inclinometer series.**

TERZAGHI, K., PICHLER, E. **Mecanismo dos escorregamentos de terra.** São Paulo: 38 p. 1967.

YIN, J.; ZHU, H. **Monitoring of soil nailed slopes and dams using innovative Technologies.** Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China. 2008.

ANEXO 1 - Desenho mecânico da sonda do SADi.



ANEXO 2 - Primeiro ensaio de repetição no eixo direto do SADi.

Profundidade	X direto 1	X direto 2	X direto 3
0,15	-0,1874	-0,1827	-0,1849
0,3	-0,1845	-0,1801	-0,1818
0,45	-0,1813	-0,1775	-0,1787
0,6	-0,1782	-0,1752	-0,1755
0,75	-0,1742	-0,1728	-0,1724
0,9	-0,174	-0,1693	-0,169
1,05	-0,1702	-0,1665	-0,1663
1,2	-0,1667	-0,1644	-0,1626
1,35	-0,1629	-0,1622	-0,1592
1,5	-0,1598	-0,1596	-0,1559
1,65	-0,1564	-0,1571	-0,1525
1,8	-0,1531	-0,1545	-0,1494
1,95	-0,1497	-0,1519	-0,1464
2,1	-0,147	-0,15	-0,1435
2,25	-0,1446	-0,1484	-0,1413
2,4	-0,1415	-0,1451	-0,1407
2,55	-0,1412	-0,1417	-0,1368
2,7	-0,1382	-0,1384	-0,1336
2,85	-0,1353	-0,135	-0,1305
3	-0,1323	-0,1317	-0,1273
3,15	-0,129	-0,1285	-0,1242
3,3	-0,1256	-0,1252	-0,1211
3,45	-0,1223	-0,1214	-0,1173
3,6	-0,1187	-0,1179	-0,1138
3,75	-0,1148	-0,1143	-0,1104
3,9	-0,1116	-0,1104	-0,1078
4,05	-0,1085	-0,1064	-0,1051
4,2	-0,1049	-0,1025	-0,1015
4,35	-0,1014	-0,0987	-0,098
4,5	-0,0976	-0,0987	-0,0944
4,65	-0,0939	-0,0949	-0,0907
4,8	-0,0901	-0,0918	-0,0867
4,95	-0,0864	-0,0881	-0,0828
5,1	-0,0824	-0,0833	-0,0788
5,25	-0,0785	-0,0802	-0,0755
5,4	-0,0745	-0,0758	-0,0706
5,55	-0,0706	-0,0717	-0,066
5,7	-0,0662	-0,0674	-0,0621
5,85	-0,0619	-0,0632	-0,0581
6	-0,0576	-0,0591	-0,0542
6,15	-0,0536	-0,055	-0,0502

6,3	-0,0491	-0,0508	-0,0465
6,45	-0,0447	-0,0467	-0,0428
6,6	-0,0406	-0,0426	-0,039
6,75	-0,0367	-0,0376	-0,0353
6,9	-0,0335	-0,0333	-0,0325
7,05	-0,0292	-0,029	-0,0284
7,2	-0,025	-0,0246	-0,0243
7,35	-0,0209	-0,0205	-0,0201
7,5	-0,0168	-0,0165	-0,016
7,65	-0,0126	-0,0124	-0,0119
7,8	-0,0087	-0,0083	-0,0079
7,95	-0,0043	-0,0041	-0,004
8,1	0	0	0

ANEXO 3 - Segundo ensaio de repetição no eixo direto do SADi.

Profundidade	X direto 1	X direto 2	X direto 3
0,15	0,177	0,173	0,1703
0,3	0,1727	0,1694	0,1668
0,45	0,1683	0,1658	0,1632
0,6	0,1636	0,1623	0,1597
0,75	0,1581	0,1587	0,1561
0,9	0,1545	0,1552	0,1516
1,05	0,1502	0,1496	0,1439
1,2	0,1454	0,1457	0,1401
1,35	0,1407	0,1417	0,1362
1,5	0,1362	0,1376	0,1317
1,65	0,1317	0,1329	0,1271
1,8	0,1271	0,1285	0,123
1,95	0,1236	0,1242	0,1189
2,1	0,1198	0,1194	0,1145
2,25	0,1157	0,1171	0,1098
2,4	0,1117	0,1127	0,1049
2,55	0,1078	0,1074	0,1035
2,7	0,1041	0,1035	0,0994
2,85	0,1003	0,0999	0,0958
3	0,097	0,0962	0,0925
3,15	0,0936	0,093	0,0891
3,3	0,0901	0,0895	0,0858
3,45	0,0865	0,0867	0,0834
3,6	0,0829	0,084	0,0807
3,75	0,0812	0,0808	0,0783
3,9	0,0784	0,0771	0,0757
4,05	0,0755	0,0745	0,0736
4,2	0,0725	0,072	0,0708
4,35	0,0695	0,0686	0,0685
4,5	0,0666	0,066	0,0661
4,65	0,0636	0,0635	0,0638
4,8	0,0605	0,0605	0,0608
4,95	0,0574	0,0576	0,0581
5,1	0,054	0,0548	0,0555
5,25	0,0507	0,0529	0,0521
5,4	0,0471	0,0503	0,0484
5,55	0,0437	0,0471	0,0447
5,7	0,0404	0,044	0,0415
5,85	0,0373	0,0409	0,039

6	0,0347	0,0385	0,0366
6,15	0,0321	0,0358	0,0339
6,3	0,0294	0,033	0,0311
6,45	0,0268	0,0303	0,0284
6,6	0,0245	0,0275	0,0256
6,75	0,0211	0,0244	0,0234
6,9	0,0176	0,0212	0,0205
7,05	0,0135	0,0181	0,0175
7,2	0,0095	0,015	0,0146
7,35	0,0067	0,0118	0,0116
7,5	0,0042	0,0089	0,0087
7,65	0,0025	0,0059	0,0057
7,8	0,0011	0,003	0,0027
7,95	0	0	0

ANEXO 4 - Primeiro ensaio de repetição no eixo transversal do SADi

Profundidade	X transversal 1	X transversal 2	X transversal 3
0,15	-0,4178	-0,4335	-0,4256
0,3	-0,4107	-0,4241	-0,4171
0,45	-0,4036	-0,4147	-0,4088
0,6	-0,3965	-0,406	-0,4007
0,75	-0,3894	-0,3973	-0,3922
0,9	-0,3823	-0,3882	-0,3833
1,05	-0,3752	-0,3782	-0,3744
1,2	-0,3675	-0,3691	-0,3655
1,35	-0,3598	-0,3602	-0,3566
1,5	-0,3515	-0,3515	-0,3477
1,65	-0,343	-0,3422	-0,3389
1,8	-0,3345	-0,3323	-0,33
1,95	-0,3254	-0,3225	-0,3217
2,1	-0,3163	-0,3132	-0,3124
2,25	-0,3071	-0,3049	-0,3029
2,4	-0,2978	-0,2958	-0,2968
2,55	-0,2889	-0,2875	-0,2893
2,7	-0,2796	-0,2784	-0,2808
2,85	-0,2705	-0,2698	-0,2721
3	-0,2622	-0,2613	-0,264
3,15	-0,2541	-0,2526	-0,256
3,3	-0,2461	-0,2445	-0,2481
3,45	-0,238	-0,236	-0,24
3,6	-0,2299	-0,2279	-0,2315
3,75	-0,2224	-0,2204	-0,2238
3,9	-0,2149	-0,2117	-0,2159
4,05	-0,2072	-0,204	-0,2078
4,2	-0,1995	-0,1969	-0,2003
4,35	-0,1924	-0,1898	-0,193
4,5	-0,1853	-0,1825	-0,1861
4,65	-0,1778	-0,1748	-0,1784
4,8	-0,1701	-0,1667	-0,1715
4,95	-0,1624	-0,1594	-0,1644
5,1	-0,1543	-0,1519	-0,1569
5,25	-0,146	-0,144	-0,149
5,4	-0,1381	-0,1371	-0,1409
5,55	-0,1302	-0,1291	-0,133
5,7	-0,1233	-0,1212	-0,1251
5,85	-0,1156	-0,114	-0,1174
6	-0,1079	-0,1065	-0,1097
6,15	-0,1003	-0,0988	-0,102

6,3	-0,0926	-0,0919	-0,0943
6,45	-0,0849	-0,0848	-0,0864
6,6	-0,0768	-0,0775	-0,0785
6,75	-0,0697	-0,0698	-0,0706
6,9	-0,062	-0,0625	-0,0627
7,05	-0,0543	-0,0546	-0,0551
7,2	-0,0464	-0,0469	-0,047
7,35	-0,0389	-0,0389	-0,0391
7,5	-0,0314	-0,0312	-0,0316
7,65	-0,0235	-0,0237	-0,0237
7,8	-0,0156	-0,016	-0,0156
7,95	-0,0079	-0,0079	-0,0077
8,1	0	0	0

ANEXO 5 - Segundo ensaio de repetição no eixo transversal do SADi

Profundidade	X transversal 1	X transversal 2	X transversal 3
0,15	-0,253995	-0,2679	-0,2744
0,3	-0,249795	-0,2624	-0,2691
0,45	-0,24507	-0,2571	-0,2634
0,6	-0,24045	-0,2524	-0,2582
0,75	-0,235095	-0,2472	-0,2515
0,9	-0,23037	-0,2425	-0,2468
1,05	-0,225435	-0,2368	-0,2415
1,2	-0,220815	-0,2312	-0,2363
1,35	-0,2163	-0,2259	-0,2312
1,5	-0,21168	-0,221	-0,2261
1,65	-0,207375	-0,2156	-0,2213
1,8	-0,20307	-0,2109	-0,2166
1,95	-0,19866	-0,2064	-0,2127
2,1	-0,193305	-0,2023	-0,2075
2,25	-0,18879	-0,1983	-0,2036
2,4	-0,18417	-0,193	-0,1988
2,55	-0,178605	-0,1882	-0,1937
2,7	-0,173565	-0,1837	-0,1894
2,85	-0,16884	-0,1794	-0,1845
3	-0,164745	-0,1744	-0,1795
3,15	-0,159915	-0,1695	-0,1744
3,3	-0,1554	-0,1648	-0,1689
3,45	-0,1512	-0,1594	-0,1644
3,6	-0,145005	-0,1543	-0,1592
3,75	-0,13902	-0,1496	-0,1541
3,9	-0,133875	-0,1441	-0,148
4,05	-0,128835	-0,1385	-0,1425
4,2	-0,1239	-0,1332	-0,1366
4,35	-0,118755	-0,1281	-0,1312
4,5	-0,1134	-0,123	-0,1253
4,65	-0,10794	-0,1172	-0,12
4,8	-0,103005	-0,1115	-0,1142
4,95	-0,09765	-0,1066	-0,1089
5,1	-0,09156	-0,1015	-0,103
5,25	-0,086205	-0,0959	-0,0969
5,4	-0,08043	-0,0904	-0,0914
5,55	-0,074655	-0,0847	-0,086
5,7	-0,069615	-0,079	-0,0805

5,85	-0,06363	-0,0732	-0,0748
6	-0,057645	-0,0673	-0,0692
6,15	-0,05229	-0,0616	-0,0631
6,3	-0,04725	-0,0559	-0,057
6,45	-0,040845	-0,0495	-0,0515
6,6	-0,03633	-0,0444	-0,0464
6,75	-0,03171	-0,0391	-0,0404
6,9	-0,025725	-0,0334	-0,0345
7,05	-0,01995	-0,0276	-0,0286
7,2	-0,01659	-0,0221	-0,0227
7,35	-0,01155	-0,017	-0,017
7,5	-0,0084	-0,0115	-0,0112
7,65	-0,00462	-0,0057	-0,0055
7,8	0	0	0

ADENDO 1- Depósito da Patente