

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Sheila Rossoni

APERFEIÇOAMENTO DE UM INCLINÔMETRO
APLICADO AO MONITORAMENTO DE OBRAS
GEOTÉCNICAS

Passo Fundo

2019

Sheila Rossoni

APERFEIÇOAMENTO DE UM INCLINÔMETRO
APLICADO AO MONITORAMENTO DE OBRAS
GEOTÉCNICAS

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Eng. Rodrigo Siqueira Penz.

Passo Fundo

2019

Sheila Rossoni

Aperfeiçoamento de um inclinômetro aplicado ao monitoramento de obras Geotécnicas

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Eng. Rodrigo Siqueira Penz.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Rodrigo Siqueira Penz - UPF

Prof. Dr. Blanca Rosa Maquera Sosa - UPF

Prof. Dr. Jocarly Patrocinio de Souza - UPF

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado durante essa trajetória e me dado forças para vencer todos os obstáculos.

Agradeço aos meus pais Gilmar e Rita Rossoni e minha irmã Priscila por estarem sempre ao meu lado me apoiando e dando todo suporte necessário.

Agradeço também a todos os demais da minha família que de uma maneira ou outra contribuíram.

A todos meus amigos que estiveram ao meu lado durante toda essa trajetória, comemorando as vitórias e muitas vezes me apoiando e aguentando quando tinha meus dias ruins.

Agradeço ao professor, mestre e orientador Rodrigo Penz por todos ensinamentos e apoio, estando sempre disponível a ajudar. Os professores Joan e Adriano, que também sempre contribuíram quando foram solicitados, e aos demais professores do curso que passaram seus conhecimentos.

Meus colegas que dividiram as salas de aula, as vezes desesperos, conquistas e até o lanche, agradeço cada minuto vivido junto deles.

“O que você sabe não tem valor; o valor está no que você faz com o que sabe”.

Bruce Lee

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de medição de inclinação em eixo direto e transversal em relação a linha dos rodízios da sonda, bem como apresenta a solução para converter os sinais analógicos em 16 bits com transmissão desses sinais em uma comunicação I2C. O sistema apresenta inicialmente em sua sonda um circuito de medição de inclinação, construído a partir do acelerômetro SCA 100T, como sensor inclinação, que efetua medições instantâneas em dois sentidos ortogonais entre si e ortogonais em relação ao corpo da sonda, e um conversor ADS1115 Analógico-Digital (A/D) de 16 bits e comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C) para transmissão entre a sonda e a superfície. Além disso, a sonda apresenta redução entre seus rodízios guias em relação as sondas atuais, passando a medir em intervalos de 0,25 m, proporcionando maior número de discretizações no tubo guia a ser medido. Contará também com um encoder juntamente com um sistema mecânico de roldanas para a medição automática da profundidade da sonda. Um microcontrolador ARM opera como processador principal, realizando o monitoramento tanto do encoder quanto da sonda, seu firmware conta com um sistema matemático que atenua possíveis interferências na medição devido a mesma ocorrer em movimento. O microcontrolador ainda envia informações à interface de usuário que é um computador pessoal (PC), que auxiliado por um programa ambiente desenvolvido em C# realiza a indicação da inclinação instantânea na sua tela, bem como, também armazena os valores das medições em um banco de dados, para posterior análise do usuário. Os envios de dados para o PC são oriundos da sonda e do sistema de medição de profundidade, e ocorrem através de comunicação sem fio.

Palavras-Chave: Deslizamento de solo. Estabilidade de taludes. Inclinômetro, conversão A/D 16 bits.

ABSTRACT

This work presents the development of a direct and transverse axis tilt measurement system in relation to the line of the probe casters, as well as the solution to convert the analog signals to 16 bits with the transmission of these signals in an I2C communication. The system initially presents in its probe a tilt measurement circuit, built from the accelerometer SCA 100T, as a tilt sensor, which makes instantaneous measurements in two directions orthogonal to each other and orthogonal to the body of the probe, and an ADS1115 Analogic -Digital (A / D) 16-bit and Inter-Integrated Circuit (I2C) communication for transmission between probe and surface. In addition, the probe has a reduction between its guide rollers in relation to the current probes, starting to measure in intervals of 0.25 m, providing a greater number of discretizations in the guide tube to be measured. It will also have an encoder along with a mechanical pulley system for automatic measurement of depth of the probe. An ARM microcontroller operates as the main processor, monitoring both the encoder and the probe, its firmware has a mathematical system that attenuates possible interference in the measurement due to the same occur in movement. The microcontroller still sends information to the user interface which is a personal computer (PC), which, aided by an environment program developed in C #, performs the indication of instantaneous tilt on your screen, as well as stores the values of the measurements in a bank. data for further analysis by the user. The data sends to the PC comes from the probe and the depth measurement system, and occurs through wireless communication.

Keywords: Slip Soil. Stability of slopes. Inclinator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. DANOS HUMANOS POR TIPO DE DESASTRE - 2013	19
FIGURA 2. ÓBITOS POR TIPO DE DESASTRE – 2013	19
FIGURA 3. CARACTERIZAÇÃO DE UM TALUDE	20
FIGURA 4. RESULTADO GRÁFICO DE UMA MEDIÇÃO COM INCLINÔMETRO	24
FIGURA 5. INCLINÔMETRO DE ESFERA	25
FIGURA 6. VISUALIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE INCLINAÇÃO	26
FIGURA 7. VISTA DE UM TUBO GUIA EM UMA OBRA DE ATERRO	27
FIGURA 8. TUBO GUIA	28
FIGURA 9. SONDA OU TORPEDO DE UM INCLINÔMETRO	28
FIGURA 10. INTERFACE DE LEITURA	29
FIGURA 11. CABO ELÉTRICO ACONDICIONADO EM ROLO	30
QUADRO 1. CARACTERÍSTICAS INCLINÔMETROS COMERCIAIS	32
FIGURA 12. CABO ELÉTRICO COM MARCAÇÃO DE MEDIDAS	33
FIGURA 13. PLANO INCLINADO	34
FIGURA 14. DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA P	35
FIGURA 15. FORÇA EXTERNA F ATUANDO SOBRE O BLOCO	36
FIGURA 16. ÂNGULO MEDIDO PELO INCLINÔMETRO	37
FIGURA 17. AÇÃO DA ACELERAÇÃO SOBRE A SONDA	37
FIGURA 18. ÂNGULOS OBTIDOS NO PLANO INCLINADO QUANDO APLICADA UMA ACELERAÇÃO	39
FIGURA 19. COMPONENTES FORMADAS PARA A MEDIÇÃO DO ÂNGULO PELA SONDA	40
FIGURA 20. MEDIÇÕES ACUMULADAS PELO INCLINÔMETRO	41
FIGURA 21. SONDA	43
FIGURA 22. DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROJETO	44
FIGURA 23. MODELO DO SENSOR SCA100T-D02	46
FIGURA 24. CONVERSOR A/D - ADS1115	47
FIGURA 25. RECONHECIMENTO DO SENTIDO DO MOVIMENTO DO ENCODER	49
FIGURA 26. ROLDANA	49
FIGURA 27. SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO PARA O SADI	50
FIGURA 28. CIRCUITO REGULADOR DE TENSÃO	53
QUADRO 2. CORRENTE DE CONSUMO DAS FONTES	54
FIGURA 30. CIRCUITO DO SENSOR DE INCLINAÇÃO SCA100T-D02	55
FIGURA 31. CIRCUITO DO CONVERSOR A/D - ADS1115	56
FIGURA 32. PINAGEM ENCODER	57
FIGURA 33. BLUETOOTH HC-06 UTILIZADO NO PROJETO	57
FIGURA 34. FLUXOGRAMA DO FIRMWARE	58
FIGURA 35. FLUXOGRAMA SOFTWARE	60
FIGURA 36. INTERFACE IHM	61
FIGURA 37. COMPARAÇÃO ENTRE AS SONDAS NA EXCURSÃO POR CURVAS RAIOS PEQUENOS	62

FIGURA 38. PLACA SENSOR DE INCLINAÇÃO SCA100TD02	62
FIGURA 39. PLACA CONVERSOR ADS1115	63
FIGURA 40. PLACA AUXILIAR CONVERSOR ADS1115	63
FIGURA 41. PLACA REGULADOR DE TENSÃO	64
FIGURA 42. PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	64
FIGURA 43. ENSAIO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	66
FIGURA 44. SUPORTE PARA CALIBRAÇÃO.....	67
FIGURA 45. MITUTOYO 950-315 DIGITAL PROTRACTOR.....	67
FIGURA 46. SUPORTE DE CALIBRAÇÃO COM INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA.....	68
FIGURA 47. CURVA DE DISPERSÃO PARA OS VALORES DO ÂNGULO X	72
FIGURA 48. CURVA DE DISPERSÃO PARA OS VALORES DO ÂNGULO Y	72
FIGURA 49. SISTEMA PARA SIMULAÇÃO REAL DA MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE E ÂNGULOS.....	76
FIGURA 50. VARIAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA X.....	77
FIGURA 51. VARIAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA Y.....	78
FIGURA 52. VARIAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA X.....	79
FIGURA 53. VARIAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA Y.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VALORES OBTIDOS NO ENSAIO COM ENCODER	65
TABELA 2. VALORES PARA ENCONTRAR O ÂNGULO ZERO NO EIXO X, UTILIZANDO A FÓRMULA IDEAL.	68
TABELA 3. VALORES DO EIXO X COM AJUSTE DO PONTO ZERO	69
TABELA 4. VALORES PARA ENCONTRAR O ÂNGULO ZERO NO EIXO Y, UTILIZANDO A FÓRMULA IDEAL.	70
TABELA 5. VALORES DO EIXO Y COM AJUSTE DO PONTO ZERO	71
TABELA 6. VARIAÇÃO DE ÂNGULO X, COMPARANDO INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO NOVO.	71
TABELA 7. VARIAÇÃO DE ÂNGULO Y, COMPARANDO INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO NOVO.	71
TABELA 8. ENSAIO DE EXATIDÃO PARA O EIXO X	73
TABELA 9. ENSAIO DE EXATIDÃO PARA O EIXO Y	74
TABELA 10. ENSAIO VARIANDO X EM COMPARAÇÃO COM O INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA.	75
TABELA 11. ENSAIO VARIANDO Y EM COMPARAÇÃO COM O INCLINÔMETRO DE REFERÊNCIA.	75
TABELA 12. VALORES OBTIDOS PARA X	77
TABELA 13. VALORES OBTIDOS PARA Y	78
TABELA 14. VALORES OBTIDOS PARA X	79
TABELA 15. VALORES OBTIDOS PARA Y	80
TABELA 16. VALORES OBTIDOS PARA X NO ENSAIO COM ACELERAÇÃO	82
TABELA 17. VALORES OBTIDOS PARA Y NO ENSAIO COM ACELERAÇÃO	82

LISTA DE SIGLAS

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

I2C – *Inter Integrated Circuit* – Circuito Integrado

A/D – Conversor Analógico-Digital

.CSV – Arquivo de valores separados por vírgulas

SPI – *Serial Peripheral Interface* – Interface Periférica Serial

I2C – *Inter Integrated Circuit* – Circuito interligado

A/D – Conversor Analógico / Digital

IHM – Interface Homem Máquina

ABS – Acrilonitrila Butadieno Esteno

LSB– Bit menos significativo

D/A– Conversor digital- analógico

SADi – Sistema de Aquisição de Dados

I/O – Entradas e saídas digitais

SSH – *Secure Shel* – Protocolo de rede criptografado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 DESASTRES NATURAIS	18
2.2 TALUDES	20
2.3 MONITORAMENTO DE TALUDES	21
2.3.1 Monitoramento de taludes com inclinômetro	22
2.4 O INCLINÔMETRO	24
2.4.1 Componentes e tecnologia de inclinômetros de obras geotécnicas	25
2.4.1.1 <i>Tubo Guia</i>	26
2.4.1.2 <i>Sonda</i>	27
2.4.1.3 <i>Interface de leitura</i>	29
2.4.1.4 <i>Cabo Elétrico</i>	29
2.4.2 Características dos inclinômetros comerciais	30
2.5 MOVIMENTAÇÃO DA SONDA	33
2.6 USO DO INCLINÔMETRO NA DETERMINAÇÃO DE MOVIMENTOS TRANSVERSAIS	39
3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	43
3.1 SONDA	45
3.1.1 Inclinômetro	45
3.1.2 Conversor A/D	46
3.2 MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	48
3.3 SISTEMA DE PROCESSAMENTO CENTRAL.....	50

3.4 BLUETOOTH	51
3.5 FONTE	51
3.6 IHM	52
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	53
4.1 HARDWARE.....	53
4.1.1 Fonte do Sistema e Regulador de tensão	53
4.1.2 Sensor de Inclinação.....	55
4.1.3 Conversor A/D	55
4.1.4 Encoder.....	56
4.1.5 Bluetooth	57
4.2 FIRMWARE.....	58
4.3 SOFTWARE.....	59
4.4 ESTRUTURA MECÂNICA DA SONDA.....	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 ENSAIO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE.....	65
5.2 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO EIXO X E Y	66
5.3 ENSAIO DE EXATIDÃO DO INCLINÔMETRO	73
5.4 ENSAIO DE PRECISÃO E REPETIÇÃO DO INCLINÔMETRO	74
5.5 ENSAIO DE INCLINAÇÃO E MEDIDA DE PROFUNDIDADE COM USO DO ENCODER.....	76
5.6 ENSAIO DE COMPROVAÇÃO DE INFLUÊNCIA DA ACELERAÇÃO SOBRE MEDIÇÕES.....	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO 1 – Datasheet sensor de inclinação SCA100TD02	86

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, várias obras de engenharia foram sendo construídas, algumas simples outras mais complexas. Junto com a complexidade para a construção das obras aparecem os efeitos promovidos por tais. Assim ocorre com obras geotécnicas, que alteram as características dos solos, mudando o comportamento do mesmo quando na presença de agentes externos, como chuvas por exemplo.

No Brasil é grande a variedade de perigos naturais que podem ser associados as obras de engenharia, sendo na maioria eventos recorrentes da natureza hidrometeorológicos tais como seca, chuvas torrenciais e deslizamentos de terra. Esses desastres trazem uma ameaça para o local e especialmente para comunidades mais vulneráveis, onde a cada ano várias vidas são perdidas e prejuízos econômicos são contabilizados. Por esses motivos busca-se maneiras mais ágeis e confiáveis para evitar possíveis acidentes.

À vista disso, uma forma de evitar esses desastres é fazendo o gerenciamento das infraestruturas. Obras geotécnicas são uma das áreas com realização do mesmo, onde um dos fatores verificados é o comportamento da estabilidade de taludes. Os deslocamentos horizontais em taludes podem ser verificados de duas formas, sendo, medição interna e medição externa do talude. As medições internas no talude verificam os deslocamentos das massas de solo do talude de forma relativa entre si.

Nesse sentido, os estudos, medições e monitoramentos da estabilidade de taludes, encostas de morros, regiões com riscos de deslizamentos, barragens, entre outras, têm crescido muito nas últimas décadas e, junto a essas ações, novas tecnologias vem sendo empregadas nos equipamentos ora utilizados para as medições e monitoramentos da estabilidade do solo, agregando maiores confiabilidades aos resultados, junto com a agilidade na efetuação das medições.

Para realizar as medições de deslocamento das massas e monitoramento de estabilidades um dos instrumentos utilizados é o inclinômetro, pelo fato de o mesmo possuir características adequadas para efetuar medições de inclinação ao longo do tubo guia previamente instalado no talude.

Através de sondas com inclinômetros é possível realizar medições preventivas de angulações relativas à vertical gravitacional em taludes, fundações e contenções, a fim de verificar a existência de movimentos transversais ao solo. Essas medições são comparadas com valores históricos, a fim de prevenir possíveis desastres provenientes do deslizamento dos mesmos.

Dessa forma, a utilização do inclinômetro para acompanhamento nas formações de taludes e gerenciamento de sua estabilidade são premissas indispensáveis para a manutenção da infraestrutura no que diz respeito ao prolongamento de sua vida útil. Do mesmo modo, auxilia o monitoramento da segurança desta infraestrutura afim de evitar acidentes e perdas que seu dano pode vir a gerar.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avançar o desenvolvimento de um inclinômetro que realiza a medição da inclinação e da profundidade de uma sonda de forma simultânea e dinâmica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Implementar em um sistema de medição de inclinação de solo um conversor A/D de 16 bits, com saída I2C, para converter a saída analógica em digital;
- b) Monitorar as saídas de inclinação e profundidade com o uso de um microcontrolador, bem como desenvolver o firmware para o mesmo;
- c) Possibilitar a transmissão da informação de profundidade provinda da sonda;
- d) Verificar a influência da aceleração nas medições de inclinação e propor um sistema de atenuação matemática no software;
- e) Estabelecer comunicação entre microcontrolador e PC;
- f) Realizar medições de forma dinâmica e comprovar os resultados obtidos;

1.3 JUSTIFICATIVA

A atual tecnologia e inclinômetros disponíveis no mercado realiza as medições com a sonda estanque, ou seja, a cada segmento a ser medido a sonda deve estar posicionada no ponto e não pode estar em movimento. Ainda, as menores distâncias de discretizações do segmento ao longo do tubo guia são de 0,5 m. O trabalho tem sua justificativa na proposta de promover medições com a sonda em movimento, propondo uma solução matemática para possíveis interferências na aceleração do inclinômetro, visto que o mesmo é um acelerômetro, além de reduzir o segmento de discretização dos atuais 0,5 m para 0,25 m, aumentando o

número de medições ao longo do trecho medido, promovendo uma maior veracidade do trecho medido. Devido a medição ocorrer em movimento, também será desenvolvido um sistema de medição de profundidade automático, substituindo o atual sistema que são marcações equidistante no cabo elétrico da sonda. Juntando-se a isso, será utilizado conversor A/D de 16 bits, o que proporciona uma resolução compatível aos atuais equipamentos do mercado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DESASTRES NATURAIS

Os desastres naturais representam um conjunto de fenômenos que fazem parte da geodinâmica terrestre e quando ocorrem podem trazer consequências catastróficas para o ser humano (Toda Matéria, 2018). Esses desastres estão associados a um fenômeno natural de grande intensidade sobre uma área ou região, podendo ou não ser agravado pelas atividades decorrentes de ação humana (CASTRO, 2013). Pode-se considerar que atualmente a maior parte dos desastres que vem ocorrendo no mundo é consequência da correlação entre fenômenos naturais e o desequilíbrio nos ecossistemas, causados principalmente pelas atividades humanas.

Os eventos de precipitação são os mais preocupantes e os que mais impactam no Brasil. Casos de eventos extremos hidrometeorológicos ocorrem com alta velocidade surpreendendo muitas vezes as populações atingidas, causando inundações e movimentos de massa. Atualmente esses eventos são os perigos naturais que mais causam mortes no Brasil (CAMARINHA, 2016).

A Secretaria Nacional de Defesa Civil, analisa e publica dados através do Anuário Brasileiro de Desastres Naturais, o último exemplar publicado foi no ano de 2014, porém seus dados são de 2013. Através dos dados coletados, um perfil de ocorrências é formado para auxiliar o planejamento e gerenciamento dos locais de risco, possibilitando assim definir medidas de prevenção, como forma de evitar ou minimizar os impactos causados pelos mesmos (ANUÁRIO, 2013).

Os desastres naturais causam anualmente um impacto significativo a sociedade brasileira, em 2013, 4.433 municípios foram afetados, sendo reportados 493 desastres naturais, os quais causaram 183 óbitos e afetaram 18.557.233 pessoas, conforme Figura 1.

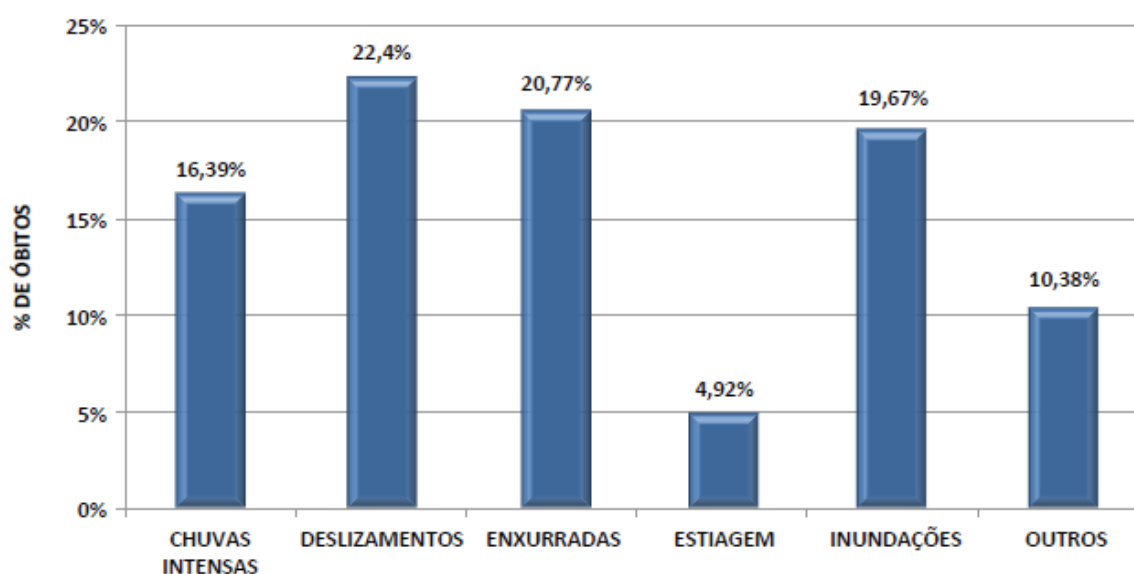
Figura 1. Danos humanos por tipo de desastre - 2013

	Óbitos	Feridos	Enfermos	Desabrigados	Desalojados	Desapa- recidos	Outros	Afetados
Alagamentos	4	279	4.306	44.330	48.260	0	180.641	277.820
Chuvas intensas	30	468	3.607	25.585	103.278	5	1.604.303	1.757.668
Deslizamentos	41	133	88	6.721	6.843	0	219.530	233.356
Enxurradas	38	787	2.324	17.266	118.074	92	778.694	931.608
Erosão	1	86	466	2.826	3.964	0	343.906	351.249
Estiagem	9	5.020	68.047	2.040	10.009	2	11.194.527	11.953.305
Geadas	0	0	0	0	0	0	0	0
Granizo	1	95	8	5.551	9.967	0	160.315	176.936
Incêndios florestais	0	0	139	113	145	0	2.970	3.367
Inundações	36	1.461	13.283	59.023	208.274	6	1.083.402	1.389.454
Vendaval	4	166	33	4.553	6.552	0	107.432	123.735
Outros	19	78	67.395	7.601	1.039	0	1.282.603	1.358.735
TOTAL	183	8.573	159.696	175.609	516.405	105	16.958.323	18.557.233

Fonte: Anuário Brasileiro de Desastres Naturais – 2014.

De acordo com o Anuário Brasileiro de Desastre Naturais, dentre os 4.433 municípios atingidos 70,99% foram afetados por seca/estiagem, mas ainda assim o que mais provocou óbitos no ano de 2013 foram os deslizamentos de terra, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2. Óbitos por tipo de desastre – 2013.



Fonte: Anuário Brasileiro de Desastres Naturais – 2014.

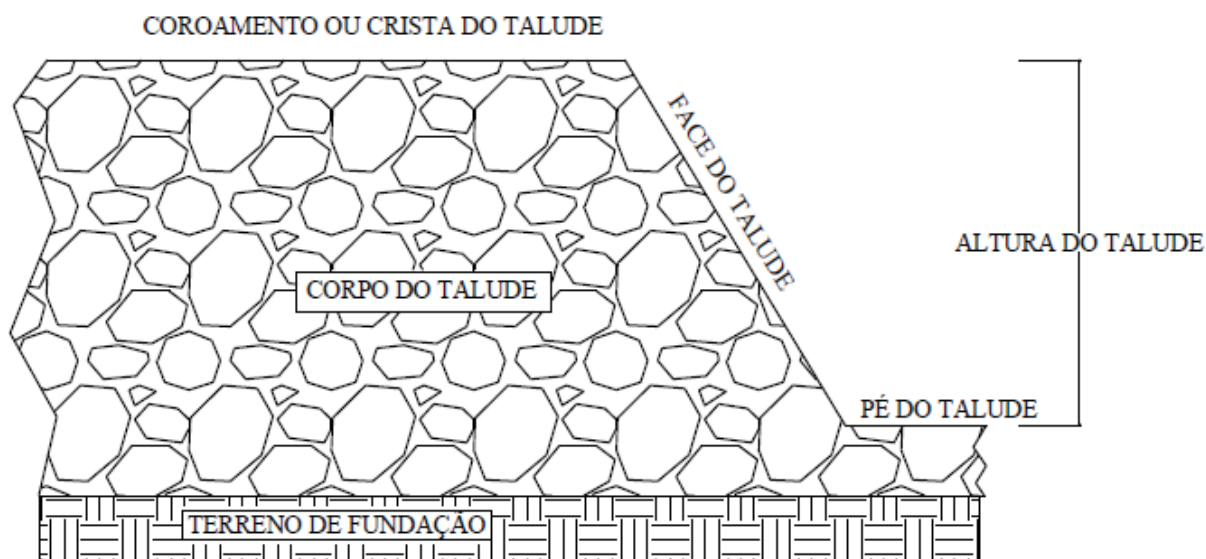
Dessa forma, é possível ressaltar a importância dos estudos relacionados ao desenvolvimento de sistemas que permitam monitorar e, assim, diminuir os agentes causadores dos desastres com maior índice registrado de óbitos, sendo estes, os deslizamentos de terra.

2.2 TALUDES

Os taludes ou encostas naturais são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solo e rocha), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos. Esses taludes podem ainda 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 3 ilustra a formação de um talude, no qual é possível visualizar as duas cotas, sejam elas a crista e o pé do talude.

Figura 3. Caracterização de um talude



Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013.

Os taludes podem ser classificados em naturais, de escavação ou ainda de aterro. Formações oriundas de milhares de anos pela geologia da região, assim como, pela ação da chuva, vento, sol entre outras são chamados de taludes naturais. Os taludes de escavações são rebaixos no nível natural solo causados mecanicamente pela ação do homem. Já, os taludes de

aterro, são formados por acúmulos de solo, rocha e outros elementos, mantendo um ângulo de levante que garanta a sua estabilidade (PERRETO, 2011).

É importante salientar dentre as caracterizações dos taludes o tipo e a diferença das formas de instabilidade ou movimentos que ocorrem nas massas formadoras dos taludes. Pode-se classificar os principais tipos de movimentos em três grandes grupos, desprendimento de terra ou rocha, escorregamento e rastejo (CAPUTO, 1973).

O desprendimento de terra ou rocha, é quando uma porção de um maciço terroso ou de fragmentos de rocha que se destaca do resto cai livre e rapidamente, acumulando-se na superfície mais favorável (CAPUTO, 1973).

O escorregamento ocorre quando parte do solo se solta do maciço, deslizando para a condição mais favorável, ao longo de toda sua superfície de deslizamento, podendo apresentar grandes volumes de massa (PERRETO, 2011).

Já o rastejo é caracterizado por apresentar movimentos lentos e contínuos de camadas mais superficiais sobre as camadas mais profundas. Em um rastejo a velocidade de deslocamento é geralmente muito pequena se comparado com a velocidade média de um avanço de um escorregamento típico que é na ordem de 30 cm por hora, enquanto no rastejo é na ordem de 30 cm por decênio (CAPUTO, 1973).

Estudos geotécnicos em taludes definem que uma condição para ocorrer grandes movimentações, que são os desprendimentos e os escorregamentos, sempre são antecidos por rastejos (CAPUTO, 1988). Assim, o monitoramento dos rastejos auxilia na prevenção da ocorrência de situações de risco, que são presenciadas na ocorrência de um desprendimento ou escorregamento. Através de medições com inclinômetros é possível verificar de forma satisfatória os movimentos de rastejo em taludes, desde que essas medições possuam repetições temporais e sejam adequadas ao tipo característico do talude (PENZ, 2013). Nesse sentido, a medição cíclica do local de risco, através do uso de um inclinômetro, que apresente agilidade e facilidade na sua aplicação e na sua utilização, é uma opção para a implementações de programas de monitoramento de riscos para as regiões geotecnicamente perigosas.

2.3 MONITORAMENTO DE TALUDES

Existe uma variedade de instrumentos que podem ser utilizados para realizar o monitoramento de taludes e encostas, mas a seleção do mais adequado depende do tipo de

obra, sua localização, topografia, geologia, tipo de solo (ou rocha), entre outros. O Brasil ainda é carente de fabricantes de instrumentos geotécnicos, sendo a maioria dos mesmos importados, restringindo a utilização de quantidades mais adequadas devido ao alto custo de investimento (BRESSANI, 2009); (OLIVEIRA, 2016).

Os instrumentos podem ser agrupados pelo tipo de informações que monitoram, ou seja, para identificação específica de algo, como, movimentos superficiais da terra, deformações no interior do maciço, campo de tensões, poropressões, entre outras. Características particulares como por exemplo, o grau de precisão, sensibilidade, durabilidade e a finalidade dos instrumentos, também podem influenciar na especificação do tipo do instrumento. Além disso, outras características que também devem ser observadas são: robustez, facilidade de calibração, manutenção, viabilidade de acesso para instalação, registro, obtenção de dados, rotina e periodicidade de leituras (OLIVEIRA, 2016).

Dentre essas características os principais instrumentos utilizados para o monitoramento de taludes, são extensômetros, inclinômetros, pressão de água positiva – Piezômetros e Medidores de nível de água, Cargas – células de carga de tirantes e elementos de reforço, Pressão de água negativa – tensiômetros para solos não-saturados, Tensiômetros de baixa sucção, Tensiômetros de alta capacidade (TAC) e Emissão acústica (BRESSANI, 2009).

2.3.1 Monitoramento de taludes com inclinômetro

O monitoramento e a instrumentação em áreas de risco potencial de instabilidade têm como objetivo acumular informações suficientes das condições locais, sendo com estas possível de analisar o problema e avaliar o risco de instabilidade e quando necessário propor medidas para reduzir o risco a níveis aceitáveis (WALKER et al, 1987 apud PINHEIRO, 2000). O mesmo deve tentar responder determinadas dúvidas existentes a respeito do comportamento da encosta ou talude. As situações típicas no qual a instrumentação vem sendo utilizada são (PINHEIRO, 2000):

- a) determinação da profundidade e da forma da superfície de escorregamento;
- b) determinação de movimentos verticais e laterais na massa escorregada;
- c) determinação da velocidade do movimento (aceleração ou desaceleração);
- d) monitoração da estabilidade de taludes naturais e escavados devido a atividades de construção ou precipitação;
- e) monitoramento dos níveis d'água ou poro-pressões;
- f) fornecer um sistema de alerta remoto contra possíveis desastres;

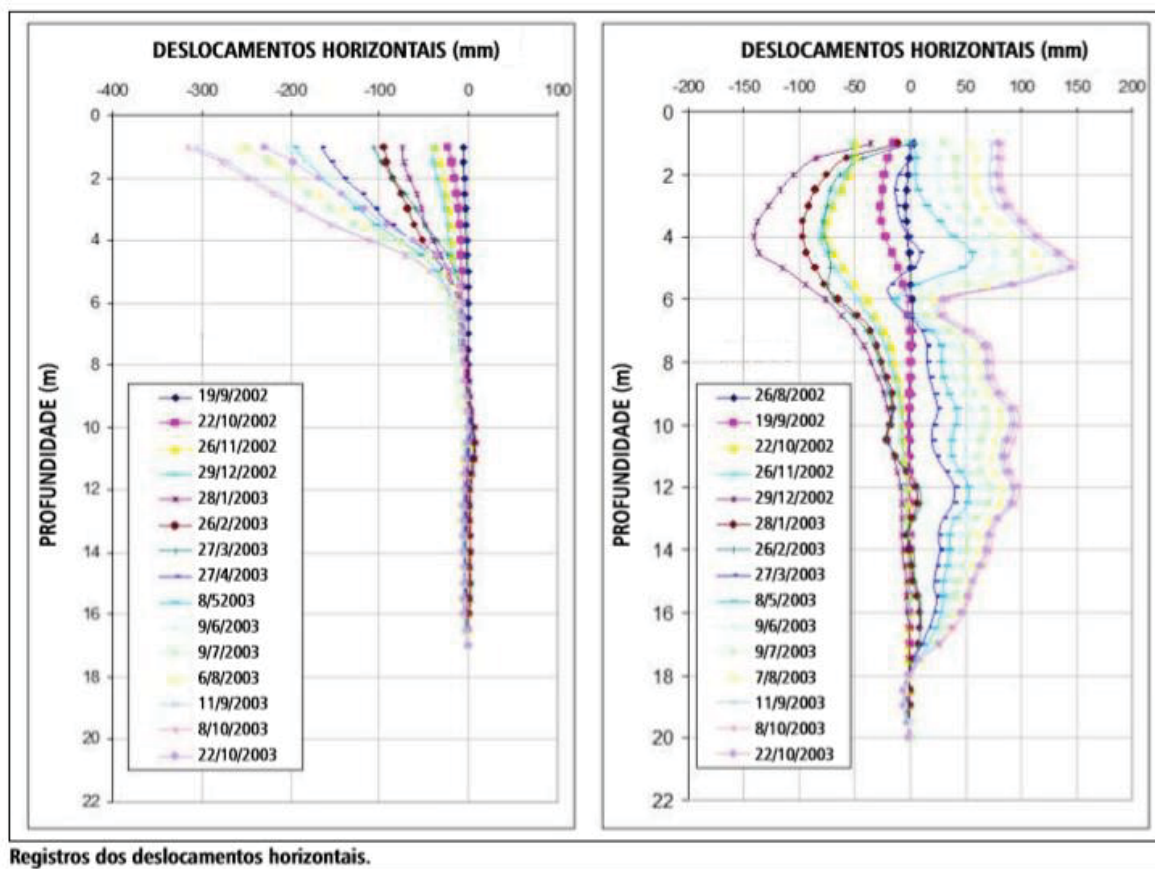
g) monitoração e avaliação da eficácia das várias medidas de controle (drenagem, contenção, etc.).

A grande parte dos casos que apresentam instabilidade são antecidos por vários sinais como fendas e trincas de tração, não há uma ruptura brusca. O movimento da massa instável geralmente será gradativamente acelerada até atingir o ponto de ruptura, fazendo com que a instrumentação possa ser bastante útil na previsão de escorregamento (EISENBERGER, 2003).

Quando os movimentos de massa ocorrem nas camadas internas do solo e quando a profundidade do escorregamento não permite sua detecção na superfície de forma visual, são requeridas medidas de deslocamentos subsuperficiais. Para o monitoramento das deformações subsuperficiais os métodos utilizados incluem furos de sondagem instrumentados de forma que os dados recebidos sejam medidos de forma perpendicular ou paralela ao alinhamento dos furos de sondagem (PINHEIRO, 2000). Para taludes que apresentem pequenos níveis de deformação ou movimentos no solo como rastejos, os instrumentos de monitoramento mais utilizados são os inclinômetros (PENZ, 2013).

Na Figura 4 é apresentado um gráfico de resultados de uma medição realizada com inclinômetro, ou seja, a forma como o equipamento devolve as medições para a visualização dos usuários. As leituras apresentam cada ponto de medição realizado pelo inclinômetro, e variam para a esquerda ou para a direita indicando eventuais movimentações do tubo e, portanto, do terreno que ele está instalado.

Figura 4. Resultado gráfico de uma medição com inclinômetro



Fonte: <http://engeground.com.br/catalogos/inclinometro.pdf>. Acesso em 01/11/2018

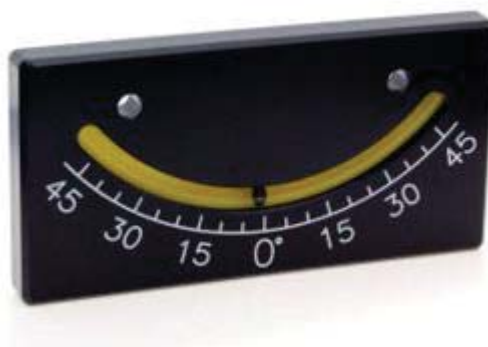
2.4 O INCLINÔMETRO

O inclinômetro é todo instrumento que devido a suas características construtivas propicia efetuar a medição de inclinação local, elevação ou depressão de um objeto em relação à gravidade ou apenas verificar a existência de uma variação angular, podendo realizar seu processo de forma diferencial ou absoluta (PENZ, 2013).

Os inclinômetros possuem vários princípios de funcionamento, no qual os mais conhecidos são os pêndulos, as esferas, os líquidos e medição angular direta. Podem ser uni ou bidirecionais e suas precisões são variáveis (KRELLING, 2006).

Na Figura 5 é mostrado um inclinômetro de esfera, possui dois eixos de medições de inclinação e suas medidas são em forma analógica, sendo utilizado em operações que advertem o operador do ângulo de trabalho de uma máquina.

Figura 5. Inclínômetro de esfera



Fonte: Fonte: <http://engeground.com.br/catalogos/inclinometro.pdf>. Acesso em 01/11/2018

Por apresentarem tamanho reduzido e baixo custo, os inclinômetros construídos através de técnicas utilizando microeletrônica são os mais difundidos atualmente, isso se dá devido ao avanço da eletrônica.

Os inclinômetros estão presentes em inúmeros dos equipamentos utilizados no dia-a-dia, tanto pessoais quanto nas áreas médica e bélica. Às vezes pode passar despercebidos nos equipamentos de nosso cotidiano, como em equipamentos de telefonia celular o que apenas facilitam a interação com o equipamento, ou até no sistema de controle de estabilidade em automóveis, garantindo uma maior segurança no controle do veículo (VARGAS, 2016). Porém, em outras aplicações o uso do inclinômetro apresenta um objetivo específico, na maioria dos casos seus resultados são valores de medida necessários para um estudo ou avaliação de risco. Algumas aplicações com inclinômetro tem como finalidade informar a exata inclinação instantânea do objeto em relação a um ponto de referência, no qual, normalmente é a vertical gravitacional (PENZ, 2013).

Uma das aplicações mais conhecidas é na construção civil, onde o inclinômetro é aplicado para verificar comportamento de colunas e vigas em grandes estruturas, bem como é bastante utilizado para verificar o comportamento de solos, especialmente em locais que apresentem predisposição à alteração de sua estrutura física, como ocorre no monitoramento da estabilidade de taludes, contenções entre outras obras geotécnicas.

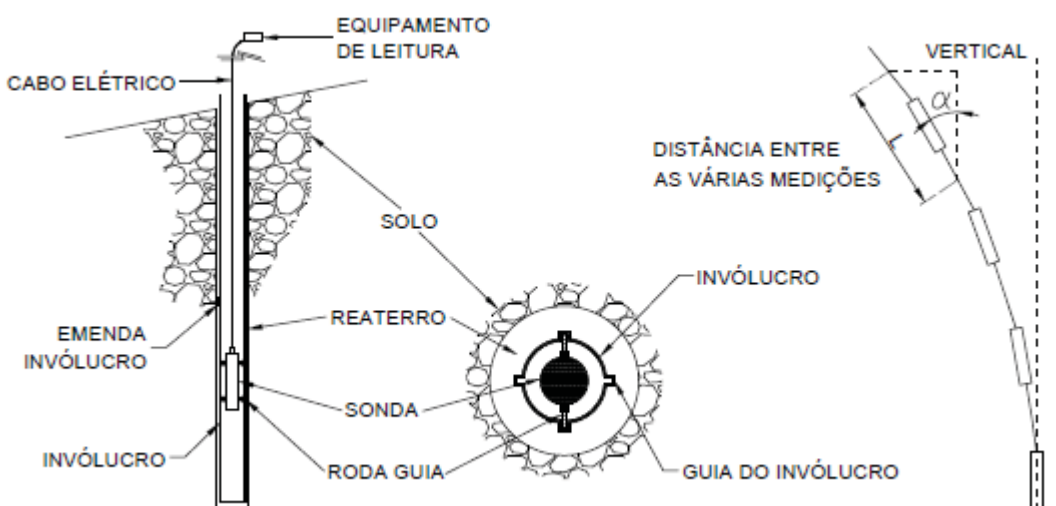
2.4.1 Componentes e tecnologia de inclinômetros de obras geotécnicas

Conforme definido em 2.4, o inclinômetro é um dispositivo que possibilita verificações e medições de inclinações. No entanto, 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 estes, o mesmo deve apresentar características e elementos construtivos específicos ao seu uso (PENZ, 2013).

As partes envolvidas no sistema de medição podem ser visualizadas na Figura 6, a vista em corte mostra 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. As condições de medições efetuadas pelo inclinômetro também são apresentadas esquematicamente, onde “L” é a distância entre as medições e “ α ” o ângulo entre o corpo da sonda e a vertical gravitacional.

Figura 6. Visualização esquemática da instalação do sistema de medição de inclinação



Fonte: Adaptação de DUNNICLIFF, 1988

2.4.1.1 Tubo Guia

O tubo guia é de fundamental importância para a obtenção de medições inclinométricas coerentes e consistentes. Também é denominado de invólucro guia e serve como superfície base para a medição, uma vez que é o elemento que com os movimentos de massa em seu perímetro externo irá sofrer as deformações. É possível de ser encontrados tubos guias com duas e quatro ranhuras, deslocadas de 180° e 90° respectivamente. Isso se deve a possibilidade de efetuar medições em diferentes direções, assim, os tubos de duas ranhuras normalmente estão direcionados a fazer medições no sentido direto aos esforços suportados pelo talude, e os de quatro ranhuras possibilitam realizar medições na direção direta e transversal aos esforços suportados pelo talude (DUNNICLIFF, 1988).

Os tubos guias são instalados de forma definitiva no solo, dessa forma devem ser flexíveis para acompanhar os movimentos de deformação do solo, mas ao mesmo tempo possuir resistência mecânica adequada ao tipo de solo. Algumas características fazem com que atualmente maior parte dos tubos guias sejam de ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), pois apresentam boa maleabilidade, suportam variação de temperatura, apresentam baixo envelhecimento com o tempo, construção fácil dos canais guias e fácil manutenção (PENZ, 2013).

A instalação do tubo guia pode ser feita durante o levante da obra, ou ainda poderá ser feito após a conclusão da obra. Idealmente durante a instalação do mesmo, deve feita a ancoragem de sua extremidade inferior na rocha, definindo como ponto fixo, assim como a extremidade superior deve receber uma estrutura de concreto, aumentando a área de contato com o solo, mantendo este sincronizado com o movimento da superfície (DUNNICLIFF, 1988). Na Figura 7 está apresentado um ponto de um tubo guia instalado durante a obra, onde é possível verificar a estrutura de concreto que cerca a extremidade superior de um tubo guia, promovendo a ancoragem desta parte superior a camada superficial do solo.

Figura 7. Vista de um tubo guia em uma obra de aterro



Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013

2.4.1.2 Sonda

Conhecida como probe ou torpedo, sua estrutura é construída de aço inox, apresentando quatro roldanas distribuídas nas laterais, encontrando-se em seu interior um transdutor responsável pela conversão do ângulo de inclinação do corpo da sonda em relação a vertical

gravitacional. Essa conversão é normalmente em grandezas elétricas que pode ser tensão, corrente ou resistência e, assim, o sinal é enviado a interface de leitura para ser convertido em ângulo e deslocamento horizontal. Através dos rodízios guias, a sonda excursiona sobre a parede interna do tubo guia, os mesmos possuem molas tensionadoras que mantêm uma força sobre a parede interna do tubo guia sobre pequenas ranhuras, desta forma, a sonda poderá se deslocar livremente dentro do tubo em uma orientação pré-definida. Em tubos guias que possuem quatro ranhuras guias, deve-se realizar a inserção da sonda de acordo com a medição desejada, na direção direta ou transversal ao esforço do talude. Mas já existem sondas que tem a capacidade de efetuar duas medições ao mesmo tempo, sendo essas transversais entre si (PENZ, 2013). Na Figura 8, é possível visualizar um modelo de tubo guia e suas ranhuras.

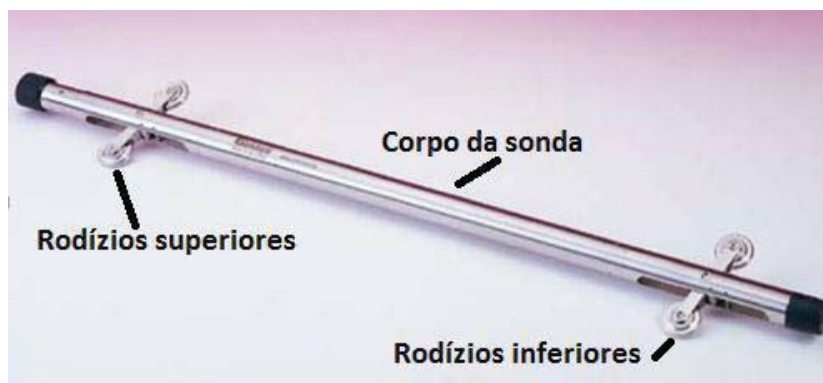
Figura 8. Tubo guia



Fonte: <http://www.geotechnicaltrade.com/product-detail/pvc-inclinometer-casing>

Na Figura 9 é apresentada um modelo de sonda, onde é possível visualizar o corpo da sonda formado por um tubo de aço inox, os quatro rodízios guias.

Figura 9. Sonda ou torpedo de um inclinômetro

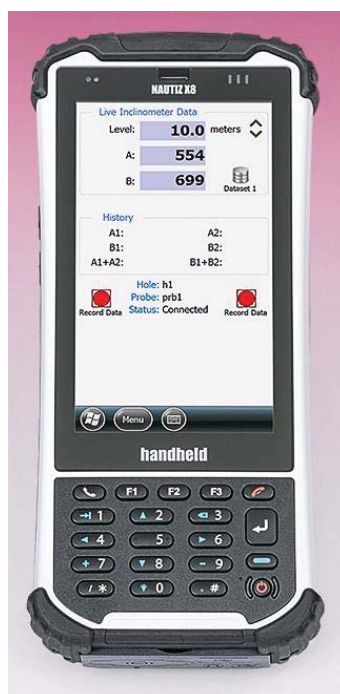


Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013

2.4.1.3 Interface de leitura

Interface de leitura ou interface homem-máquina é responsável pela conversão do sinal elétrico enviado pela sonda, que é normalmente em graus geométricos relativos ao eixo vertical ou até em valor de deslocamento horizontal. Além disso, deve apresentar o valor de medição ao usuário, fornecer a alimentação elétrica para a sonda e permitir que seja feito o armazenamento dos valores em memória interna para posterior manipulação dos mesmos pelo usuário (PENZ, 2013). Uma interface de leitura encontrada em equipamentos comerciais é mostrada na Figura 10.

Figura 10. Interface de leitura



Fonte: GEOKON, 2018

2.4.1.4 Cabo Elétrico

O cabo elétrico é uma das principais partes que constitui um inclinômetro apesar de não ser especificamente um equipamento, o mesmo é responsável por fornecer o caminho para a alimentação elétrica da sonda, pelo envio de dados da medição, além de sustentar a sonda suspensa durante o processo de medição. Os modelos mais recentes de cabo elétrico possuem marcações regulares de comprimento ao longo de sua extensão, mas é importante salientar que essas marcações devem apresentar a mesma distância existente entre os rodízios superiores e inferiores da sonda. Geralmente, para menor risco de danos ao cabo elétrico ele é

acondicionado em um rolo como mostra na Figura 11, além de facilitar o lançamento e o recolhimento do mesmo.

Figura 11. Cabo elétrico acondicionado em rolo



Fonte: GEOKON, 2018

2.4.2 Características dos inclinômetros comerciais

Empresas como GEOKON Incorporated e a RST Instruments podem ser citadas como exemplos de empresas especializadas na construção de equipamentos para medições e ensaios geotécnicos, onde um deles é o inclinômetro.

As sondas comerciais variam de acordo com o fabricante e, ainda, entre modelos do mesmo fabricante. As sondas comercializadas atualmente possuem em média distâncias entre os rodízios superiores e inferiores variando de 0,5 m e 1 m, seu corpo possui diâmetro de 25 mm, sendo este construído todo em aço inox, além de possuir índice de proteção IP67, definido para imersão temporária. Sua construção mecânica apresenta a possibilidade de deslocamento dentro de tubos guias que variam entre 48 mm e 89 mm de diâmetro interno, podendo medir inclinações entre $\pm 30^\circ$ com relação a vertical gravitacional. Apresentam ainda, resolução que varia entre 0,025 mm/500 mm e 0,005 mm/500 mm, exatidão variando entre 2 mm/25 m e 3 mm/30 m, alcance térmico entre 0°C e $+50^\circ\text{C}$ e -40°C e -70°C , repetibilidade de

$\pm 1\text{mm}/30\text{ m}$, linearidade de 0,02% e sua massa pode variar entre 1,06 Kg e 7,5 Kg (GEOKON, 2018; RST Instruments, 2018).

Nos modelos atuais todos os tipos de sondas de inclinômetros comerciais apresentam obrigatoriamente a utilização de uma IHM específica, onde a mesma é responsável pelo recebimento e conversão do sinal elétrico provindo do transdutor da sonda, além de apresentar valores para o usuário e guardar na memória os dados já convertidos e, sobretudo, fornecer a alimentação elétrica da sonda. As IHM's apresentam processador entre 800 MHz e 1 GHz, memória flash de 512 Mb, comunicação via RS-232, USB e Bluetooth, slot para cartão SD, tela touchscreen além de outras características (GEOKON, 2018; RST Instruments, 2018).

Para a sustentação da sonda, bem como a alimentação e a sustentação são utilizados cabos elétricos que são construídos com fios de cobre e seu material isolante típico é poliuretano. O cabo elétrico recebe um conector para realizar a conexão com a sonda, fazendo a ligação e sustentação da mesma, esse conector tem índice de proteção IP67 (RST Instruments, 2018). Um rolo normalmente construído de plástico é fornecido para fazer a acomodação e transporte do cabo elétrico, podendo acomodar até 100 m do cabo (GEOKON, 2018).

Os inclinômetros comerciais possuem um programa que os acompanha com a finalidade de fazer a descarga dos dados armazenados na memória da IHM, armazenando os mesmos no PC e deixando livre a memória da IHM para as próximas medições. A forma como é realizada essas descargas de dados para o PC pode variar de acordo com o fabricante, para alguns ela ainda ocorre através de cabos físicos, porém já existem descargas de dados através de comunicação sem fio. Através do programa também é possível visualizar os dados das medições de forma gráfica e comparativa com dados históricos já armazenados no PC (PENZ, 2013).

Entre os modelos atuais de inclinômetros podemos citar dois modelos de fabricantes diferentes, sendo eles o Digital Inclinometer System (MEMS) – Model GK-604D da fabricante GEOKON e Digital Mems Inclinometer System da fabricante RST Instruments. As características dos mesmos podem ser verificadas no Quadro 1.

Quadro 1. Características Inclínômetros comerciais

	Fabricante/modelo	
	GEOKON / Model GK- 604D	RST Instruments / Digital Inclinometer System
Distância entre rodízios	0,5 m e 1 m	0,5 m
Diâmetro do corpo	25 mm	25,4 mm
Tamanho do invólucro	48 mm a 89 mm	70 mm
Alcance de medição	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$
Resolução	$\pm 0,025$ mm/500 mm	$\pm 0,005$ mm/500 mm
Exatidão	± 3 mm/30 m	± 2 mm/25 m
Alcance térmico	0° C a 50° C	-40° C a +70° C
Repetibilidade	± 1 mm/30 m	$\pm 0,002^\circ$
Massa do equipamento	7,5 kg	1,06 kg
Processador	Marvel PXA310 806MHz	Arm Cortex A8 i.MX53 1.0GHz
Memória	128 MB SDRAM	Memória Flash 512 MB
Comunicação	Bluetooth / Wi-fi	Bluetooth / Wi-fi

Fonte: Elaborado pelo autor

O processo de funcionamento dos inclinômetros comerciais obedece a um procedimento que inicia pelo lançamento da sonda até o fundo do tubo guia a ser medido, indo assim até a cota mais baixa do tubo guia a ser medido. Em seguida, são efetuadas as conexões dos cabos do sistema e realizada a configuração do sistema através da IHM, a fim de inicializar o processo de medição. O procedimento segue com deslocamento da sonda até a primeira marcação no cabo elétrico, no qual uma ação deve ser realizada em um botão da IHM para habilitar a medição de inclinação do ponto. Logo após a sonda deve ser movimentada novamente até a próxima marcação no cabo elétrico, dando repetição ao ciclo anterior. Ao chegar no final do tubo guia é configurado na IHM o término da medição e os dados obtidos das medições são armazenados na memória da IHM (PENZ, 2013). Na Figura 12 é possível ver o cabo elétrico e suas marcações.

Figura 12. Cabo elétrico com marcação de medidas



Fonte: <http://www.3geotecnologia.com/inclinometro/index.html>. Acessado em 26/10/2018

Como visto no parágrafo anterior, este método realiza as medições de forma estática, para maior agilidade na mesma, uma melhoria foi proposta por Penz que desenvolveu o Sistema de Aquisição de Dados de Inclinação (SADi) que propicia realizar as medições de forma dinâmica, mas isso implica em possíveis erros na medição provocados pela aceleração e desaceleração da sonda dentro do tubo guia.

2.5 MOVIMENTAÇÃO DA SONDA

Quando a velocidade de um objeto varia diz-se que o mesmo sofreu aceleração, ou seja, a aceleração de um objeto em um dado instante é a taxa com o qual a velocidade está variando nesse instante. Assim, a aceleração de um objeto em um dado instante é a derivada segunda da posição $x(t)$ em relação ao tempo nesse instante, conforme Equação 1 (HALLIDAY, 2016).

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

Na Figura 13 é mostrado a representação de uma situação que na física é chamada de plano inclinado. Onde no mesmo, o bloco de massa m não possui atrito com o plano, assim forças que atuam sobre ele são, a força peso \vec{P} , direcionada para baixo em virtude da atração da Terra, ou seja, em virtude da aceleração gravitacional, e a força normal \vec{N} exercida pelo plano inclinado, perpendicular à superfície de contato. Onde a força normal \vec{N} e a força peso

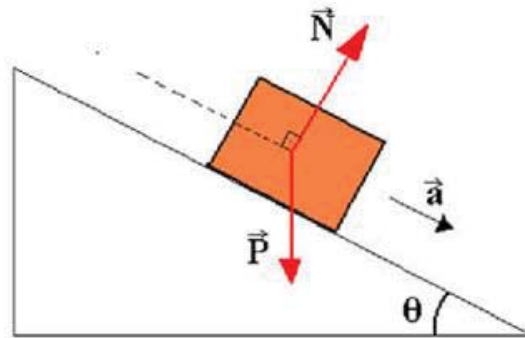
\vec{P} , podem ser calculadas de acordo com Equação 2 e Equação 3, sendo m a massa do objeto e g a gravidade (SILVA, 2018).

$$N = m \cdot g \cdot \cos \theta \quad (2)$$

$$P = m \cdot g \quad (3)$$

As forças não possuem a mesma direção, portanto nunca irão se equilibrar. Como nesse caso são as únicas forças exercidas sobre o bloco, elas admitem uma resultante que faz o plano com aceleração constante \vec{a} (SILVA, 2018).

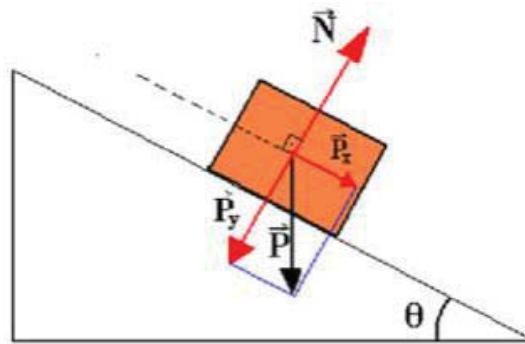
Figura 13. Plano inclinado



Fonte: SILVA, 2018

Conforme visto na Figura 13 as forças \vec{P} e \vec{N} não possuem o mesmo sentido, assim é preciso decompor a força \vec{P} em duas parcelas, sendo \vec{P}_x a parcela do peso paralela à superfície do plano inclinado e \vec{P}_y parcela do peso perpendicular à superfície do plano inclinado. Dessa forma, a componente \vec{N} se equilibra com a componente \vec{P}_y e tendo, portanto, a força resultante sobre o bloco $\vec{F}_R = \vec{P}_x$. Como pode ser visto na Figura 14 (SILVA, 2018).

Figura 14. Decomposição da força P



Fonte: SILVA, 2018

Mas como as forças \vec{P}_x e \vec{P}_y não existem como forças independentes, ou seja, elas são componentes da força peso, para encontrar o valor da aceleração é preciso utilizar as relações trigonométricas do triângulo retângulo, conforme Equação 3 e Equação 4 (SILVA, 2018).

$$P_x = P \cdot \text{sen } \theta \quad (3)$$

$$P_y = P \cdot \text{cos } \theta \quad (4)$$

De acordo com a segunda Lei de Newton, força F será igual a massa m multiplicada pela aceleração a , logo é possível obter a aceleração em um plano inclinado sem atrito, onde a mesma não dependerá da massa do bloco, conforme Equação 5.

$$F = m \cdot a \quad (5)$$

Como visto no parágrafo anterior $\vec{F}_R = \vec{P}_x$, logo, é possível igualar a Equação 2 a Equação 4, conforme Equação 6.

$$P \cdot \text{sen } \theta = m \cdot a \quad (6)$$

Logo, substituindo o valor de P apresentado na Equação 2, será obtida a Equação 7.

$$m \cdot g \cdot \text{sen } \theta = m \cdot a \quad (7)$$

Após as simplificações necessárias será obtida a aceleração, conforme Equação 8.

$$a = g \cdot \text{sen } \theta \quad (8)$$

Onde,

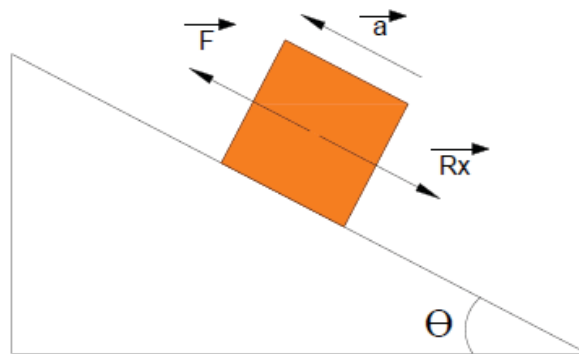
a: aceleração

g: gravidade

θ : ângulo formado entre o plano inclinado e a horizontal

Em planos inclinados onde o bloco é deslocado para cima ou para baixo, uma aceleração ou desaceleração é provocada. Para que isso ocorra uma força externa deve atuar sobre o bloco que será somada ou subtraída da força resultante. Como mostrado na Figura 15.

Figura 15. Força externa F atuando sobre o bloco

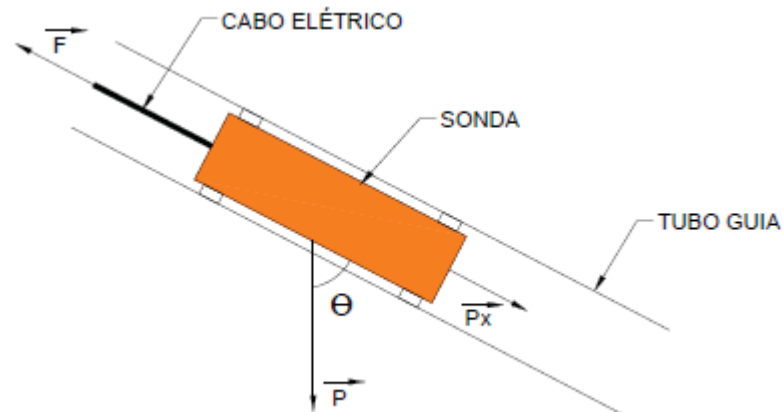


Fonte: Elaborado pelo autor

Isso ocorre também na movimentação da sonda dentro do tubo guia, pois, o tubo guia caracteriza-se como o plano inclinado e a sonda como o bloco a ser deslocado. Para realizar as medições a sonda é inserida no tubo e deslocada para cima e para baixo conforme a necessidade de medição. Essas movimentações são causadas por uma força externa, ou seja, quando o usuário puxa ou solta a sonda dentro do tubo, isso faz que a aceleração não seja constante.

Por necessidade e característica dos inclinômetros, os mesmos realizam a medição do ângulo do corpo de sua sonda em relação ao eixo vertical gravitacional, como mostrado na Figura 16.

Figura 16. Ângulo medido pelo inclinômetro

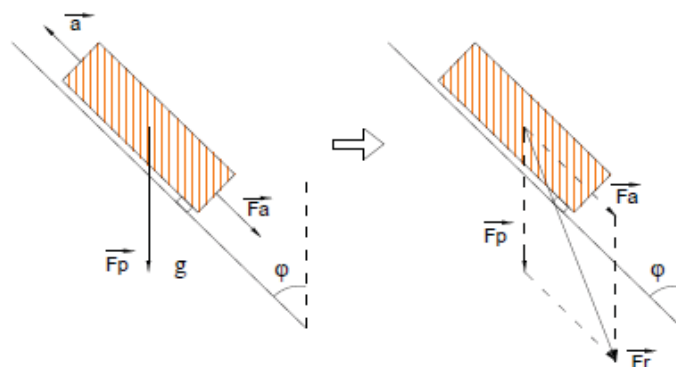


Fonte: Elaborado pelo autor

Sempre que uma força externa F é aplicada sobre a sonda uma aceleração sobre a mesma aparece, passando a sonda a ter uma aceleração que é a soma da aceleração gravitacional e a aceleração imposta para promover o movimento. Esta condição acaba por produzir uma nova condição para a decomposição da aceleração e por consequência modificando a aceleração sobre a e a tendência que por efeitos da gravidade o vetor do ângulo desloque, aproximando, se o cabo elétrico for puxado aumentando a aceleração ou afastando se a força no cabo elétrico diminuir causando uma desaceleração.

Como visto na Figura 16 o pêndulo ou força P está para baixo devido a aceleração da gravidade ser para baixo, mas se houver uma aceleração a aplicada a sonda, enquanto houver aceleração irá ocorrer uma soma das acelerações, conforme a Figura 17, onde é mostrado a força resultante no pêndulo de medição da sonda, quando é aplicada uma aceleração sobre a mesma.

Figura 17. Ação da aceleração sobre a sonda



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim é possível obter o valor das forças \overrightarrow{Fp} , \overrightarrow{Fa} e \overrightarrow{Fr} , conforme Equação 9, Equação 10 e Equação 11, respectivamente.

$$\overrightarrow{Fp} = m. \vec{g} \quad (9)$$

$$\overrightarrow{Fa} = m. \vec{a} \quad (10)$$

$$\overrightarrow{Fr} = \overrightarrow{Fp} + \overrightarrow{Fa} \quad (11)$$

Substituindo os valores e colocando em evidência os termos, temos \overrightarrow{Fr} conforme Equação 12.

$$\overrightarrow{Fr} = m. (\vec{g} + \vec{a}) \quad (12)$$

Assim, \overrightarrow{Fr} será de acordo com Equação 13.

$$\overrightarrow{Fr} = m. (g\angle - 90^\circ + a\angle(-90^\circ + \varphi)) \quad (13)$$

Como a massa apenas resultará na alteração do módulo e não do ângulo da força, pode-se considerá-la unitária, conforme Equação 14, onde \overrightarrow{Ar} é a aceleração resultante.

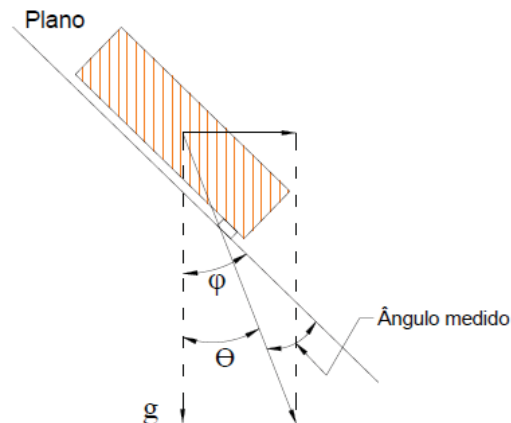
$$\overrightarrow{Ar} = g\angle - 90^\circ + a\angle(-90^\circ + \varphi) \quad (14)$$

Através da Figura 18 é possível observar o valor do ângulo medido e o valor do ângulo de erro, sendo o valor do ângulo medido conforme a Equação 15, e θ será o valor do ângulo de erro conforme Equação 16.

$$\hat{\text{Ângulo medido}} = \varphi - \theta \quad (15)$$

$$\theta = tg^{-1} \left(\frac{a \cdot \text{sen } \varphi}{-9,81 - a \cdot \text{cos } \varphi} \right) \quad (16)$$

Figura 18. Ângulos obtidos no plano inclinado quando aplicada uma aceleração

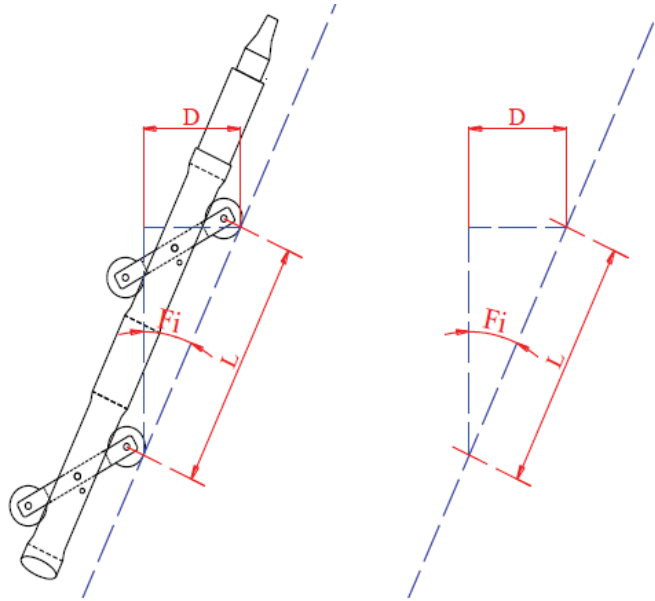


Fonte: Elaborado pelo autor

2.6 USO DO INCLINÔMETRO NA DETERMINAÇÃO DE MOVIMENTOS TRANSVERSAIS

O inclinômetro é fundamentalmente um instrumento de medida que devolve o ângulo medido, porém é instrumento de medições de deslocamentos transversais (horizontais). Assim, se faz necessário realizar a conversão da medida angular em medida de deslocamento horizontal. A teoria básica de trigometria nos possibilita encontrar um lado de um triângulo sabendo o valor de outro lado e os ângulos internos desse triângulo. Um exemplo de situação encontrada na efetuação de medições com inclinômetro pode ser visto na Figura 19 (PENZ, 2013).

Figura 19. Componentes formadas para a medição do ângulo pela sonda



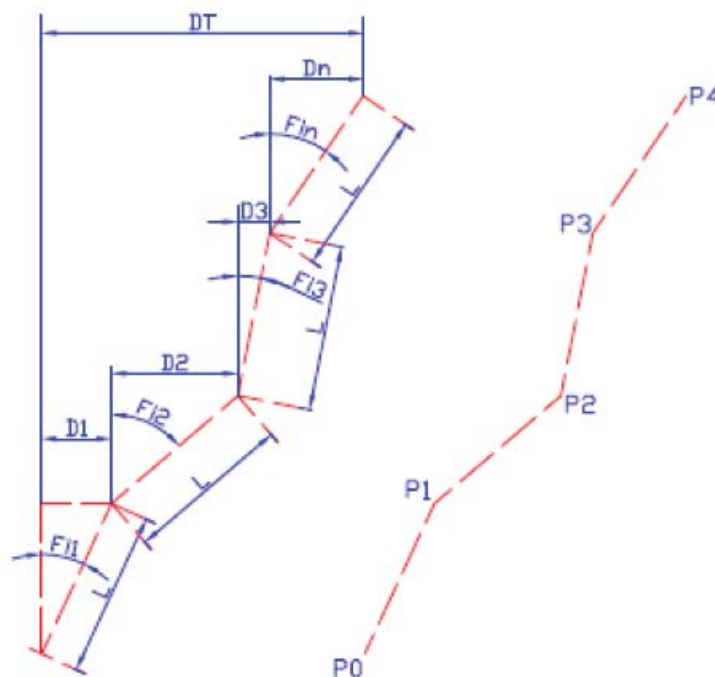
Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013

As informações que formam um triângulo retângulo formado pelo corpo da sonda e a vertical gravitacional podem ser vistas na Figura 19, sendo “L” o comprimento da sonda, no qual é a distância entre rodízios superiores e inferiores, neste caso definido como hipotenusa do triângulo, “Fi” é o ângulo fornecido através da medição do inclinômetro e “D” é o deslocamento horizontal. Através da Equação 17 é possível calcular o valor de “D”, conhecendo o comprimento e o ângulo (DUNNICLIFF, 1988).

$$D = L \cdot \text{sen}(Fi) \quad (17)$$

Para alcançar a máxima exatidão, as medições devem possuir intervalos distanciados de mesmo valor das distâncias das rodas guias da sonda. As medições sequenciais levam a um acumulado total do deslocamento horizontal, sendo esse, o somatório algébrico de todos os valores de “D” provenientes dos “n” triângulos formados durante as medidas ocorridas no tubo guia, conforme mostrado na Figura 20 (DUNNICLIFF, 1988).

Figura 20. Medições acumuladas pelo inclinômetro



Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013

Na Figura 20 pode ser visto que o deslocamento total que é dado por “DT” é a soma de todos os deslocamentos “D1, D2, D3, Dn” que são originários das medições de “Fi1, Fi2, Fi3, Fin”, dessa forma é possível chegar a Equação 18.

$$DT = \sum_{i=1}^n (L \cdot \text{sen} Fi_i) \quad (18)$$

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, pois estas são as variáveis da Equação 18. O local onde é posicionada a sonda do inclinômetro será aonde se efetivará a medição, sendo assim, a exatidão está relacionada com o ponto onde ocorrem as medições (PENZ, 2013).

Desta forma, pode ser visto na Figura 20 que a medição do ângulo “Fi1” ocorre quando a sonda do inclinômetro é posicionada com os seus rodízios nos pontos “P0 e P1”. Para encontrar o próximo ângulo “Fi2” os rodízios devem estar 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 da sonda e assim, sucessivamente (PENZ, 2013).

Assim o valor de DT é calculado por meio dos valores das medições provindas do inclinômetro, resultando em um processo de aproximações lineares, dado que, toda a extensão medida é dividida em seções de comprimento igual a distância dos rodízios superiores e inferiores da sonda, que são considerados segmentos de reta. Dessa forma, a condição de máxima de exatidão evidenciada na Equação 19 acontecerá quando os segmentos de reta se tornarem pontos, ou seja, quando o valor do comprimento “L” tender a zero (PENZ, 2013).

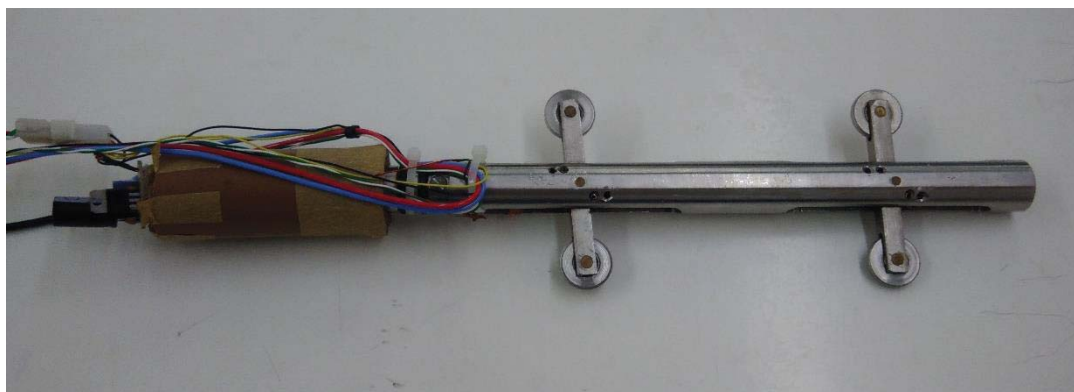
$$DT = \sum_{i=1}^n \lim_{L \rightarrow 0} (L \cdot \text{sen} F_i) \quad (19)$$

Através da Equação 19 verifica-se que quanto menor for o comprimento “L”, ou seja quanto menor for a distância entre os rodízios superiores e inferiores da sonda, mais discretizações ao longo do tubo guia a ser medido serão obtidas e assim, mais fielmente será reproduzido o comportamento dos movimentos do solo.

3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO

O Sistema de Aquisição de Dados de Inclinação (SADi) já desenvolvido em trabalhos anteriores trouxe contribuições ao método de medição de deslocamentos horizontais das massas de solos, apresentando avanços como agilidade, facilidade de medição, redução de ocorrência de erros e a possibilidade de análise dos resultados de forma rápida. As dimensões do corpo da sonda foram definidas para que fosse possível alocar os componentes internamente a mesma, sendo 150 mm entre rodízios superiores e inferiores, comprimento total de 390 mm e diâmetro do corpo de 25mm, mas a medida de 150 mm entre rodízios não é a melhor a ser utilizada, pois, não é fração exata de metro. Na Figura 21 podemos visualizar a sonda.

Figura 21. Sonda



Fonte: Elaborado pelo autor

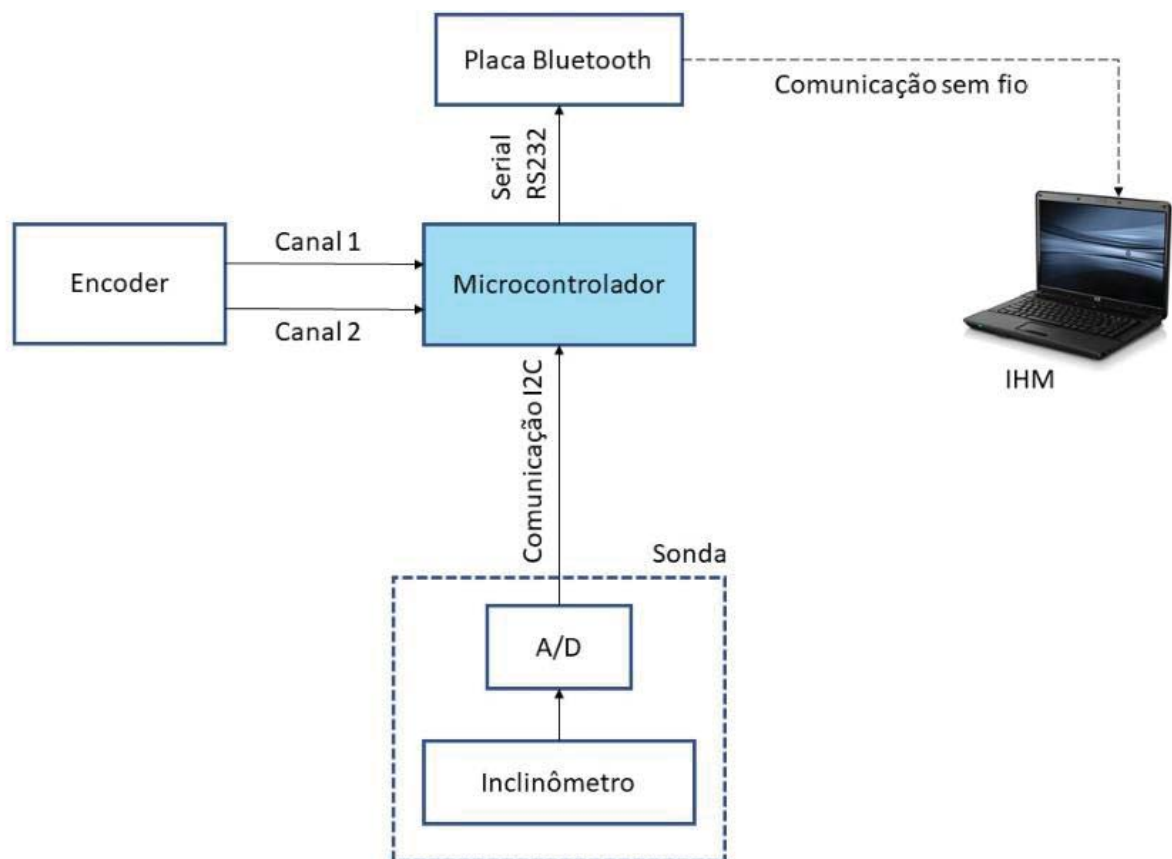
A comunicação entre inclinômetro e microcontrolador é realizada através de protocolo SPI em 11 bits de resolução com valor de $0,07^\circ$ por bit, além da baixa resolução a comunicação por protocolo SPI apresenta problemas para comunicar em longas distâncias. Já a comunicação entre o microcontrolador e a interface de usuário (IHM) ocorre através de bluetooth (sem fio). Os dados do microcontrolador são enviados para a IHM, onde são gravados em arquivo (.csv) para posterior análise.

O presente projeto propõe algumas melhorias a serem implementadas no sistema SADi, como o aumento da medida entre os rodízios superiores e inferiores da sonda para 250 mm para obter uma fração exata de metro e manter o valor abaixo das sondas comerciais que são de 0,5 m e 1 m. Além disso, incorpora o sistema de conversão em 16 bits com comunicação em protocolo I2C, além de enviar dos dados de profundidade da sonda e atenuar a influência

da aceleração sobre as medições de inclinação. É mantida medição de forma dinâmica, ou seja, com a sonda em movimento, possível pela utilização de um encoder incremental que possibilita definir a profundidade em que se encontra a sonda. Já, a IHM utilizada um computador pessoal (PC) que apresenta um ambiente desenvolvido em linguagem C#, onde seu programa apresenta os valores instantâneos e realiza o armazenamento das medições de inclinação e profundidades em arquivo (.csv) para posterior manipulação dos resultados pelo usuário.

Assim, neste capítulo, será vista a ideia do projeto, além dos componentes pré-selecionados para realização do mesmo. Na Figura 22 observa-se o diagrama de blocos do projeto que está sendo proposto, e logo após a explicação dele.

Figura 22. Diagrama de blocos do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Figura 22 é possível verificar que o microcontrolador recebe as informações de cada profundidade informadas pelo encoder e os valores do ângulo nessas mesmas profundidades informadas através do conversor A/D, que por sua vez recebe os dados do

inclinômetro. Para esta comunicação o protocolo será alterado em relação ao SADi que utilizava SPI, a comunicação a ser utilizada será a I2C, uma das melhorias a serem implementadas, pois, este protocolo de comunicação é um dos mais práticos, simples e de baixo custo disponíveis no mercado. Logo após o microcontrolador se comunica com a placa bluetooth, onde a mesma através de comunicação sem fio envia os dados de profundidade e inclinação para a IHM, onde serão gravados, para construção de um banco de dados e interface com o usuário.

3.1 SONDA

A sonda representada na Figura 22, e que pode ser vista na imagem 21, possui a distância entre rodízios de 250 mm, sendo está uma das melhorias a serem realizadas, para obter mais discretizações ao longo do tubo a ser medido, em relação as sondas comerciais, aumentando assim a sua resolução. O diâmetro do corpo será projetado para acomodar os componentes que irão internamente a ele, sendo estes um inclinômetro e um conversor A/D, e o material construtivo será aço inox 304.

3.1.1 Inclinômetro

Inclinômetros são instrumentos desenvolvidos para realizar medições de ângulos de inclinação, elevação ou depressão de um objeto em relação à gravidade. No projeto a função do inclinômetro é realizar medições de inclinação de cada segmento do tubo guia.

O modelo a ser utilizado para este projeto é o SCA100T-D02, já propostos no desenvolvimento do SADi por Penz e Pitol. Sua seleção ocorreu devido as características de precisão e compactação do CI, que podem ser verificadas junto ao Anexo 1 (Datasheet do componente SCA100T-D02), assim o mesmo será mantido. O SCA100T-D02 é um acelerômetro desenvolvido propriamente para operar como inclinômetro, possibilita medições de inclinação em dois eixos perpendiculares entre si e de forma independente, apresenta sua referência de medição angular ao eixo vertical gravitacional, tendo como referência física construtiva a base de seu invólucro, assim a medida de variação de inclinação ocorre com a inclinação do próprio encapsulamento.

Além disso, possui alta resolução, baixo ruído, baixa dependência de temperatura e é de fácil aquisição, não é sensível à vibração devido a seus elementos sensores mais amortecidos, podendo suportar choques mecânicos de até 20.000g. O sensor SCA100T-D02 é mostrado na Figura 23.

Figura 23. Modelo do sensor SCA100T-D02



Fonte: https://br.mouser.com/Images/_/?Keyword=SCA100T-D02-1&FS=True. Acessado em 23/10/2018

As principais informações 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 $^\circ$ C a +85 $^\circ$ 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.

As saídas analógicas do sensor são conectadas a entradas de um conversor A/D de 16 bits, isto se faz necessário para obter melhor resolução, assim, os valores obtidos ficam compatíveis a valores encontrados em equipamentos comerciais.

3.1.2 Conversor A/D

O conversor A/D é responsável por converter o sinal analógico recebido do inclinômetro SCA100T-D02 para um sinal digital com 16 bits de resolução, com protocolo I2C, para ser levado até o microcontrolador. O modelo a ser utilizado será o ADS1115, pois, o

mesmo possui 4 canais de conversão A/D de 16 bits, dos quais dois canais serão utilizados para a conversão dos valores de inclinação, sendo um de eixo direto e outro de eixo transversal e, os outros dois canais ficaram projetados como ampliações futuras, quando o encoder ficará junto com a sonda.

O A/D mostrado na Figura 24 é um conversor analógico-digital de precisão e faz parte da família ADS1115, com 16 bits de resolução, tipo sigma-delta. Os dados convertidos são transferidos através de uma interface serial compatível com I2C e possui quatro endereços escravos I2C que podem ser selecionados, além de ter uma referência e um oscilador integrado. Opera a partir de uma fonte de alimentação de 2V a 5,5V, pode realizar conversões em taxas de até 860 amostras por segundo e em sua estrutura possui um amplificador de ganho programável. Essas características permitem que os sinais de grande ou pequena amplitude sejam medidos com alta resolução (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

O ADS1115 funciona em modo de conversão contínua ou em modo de disparo único, onde o mesmo se desliga automaticamente após a conversão, reduzindo consideravelmente o consumo de corrente durante períodos de inatividade (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Figura 24. Conversor A/D - ADS1115



Fonte: <http://www.ti.com/product/ADS1115>. Acessado em 24/10/2018

Principais características segundo o fabricante:

- Ampla faixa de alimentação: 2,0 V a 5,5 V;
- Baixo Consumo de Corrente: 150 μ A (Modo de Conversão Contínua);
- Taxa programável de dados: de 8 à 860 amostras por segundo;
- Referência Interna de Baixa Tensão;
- Oscilador interno;
- Interface I2C: quatro endereços selecionáveis;
- Quatro entradas individuais ou duas entradas diferenciais;
- Comparador Programável.

A fim de obter uma melhor resolução, as medições de inclinação devem ser realizadas de forma segmentada a cada 250 mm de excursão da sonda dentro do tubo guia. Desta forma, é necessário um sistema de medição de profundidade que monitore a posição da sonda e informe o ponto para realizar a medição.

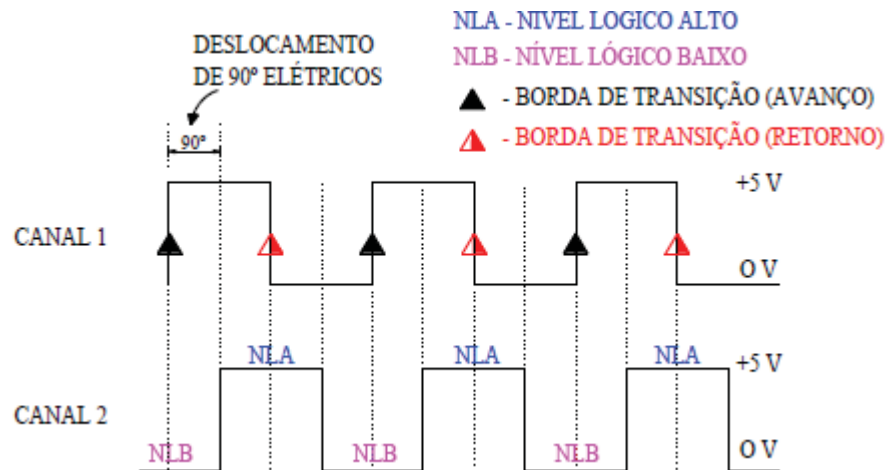
3.2 MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE

Para a realização da medição de profundidade da sonda, a qual será referência para a ocorrência do ponto exato onde o sistema efetuará uma medição, um sistema de medição de deslocamento do cabo que é incorporado junto a um encoder, será projetado e montado, sendo este, um sistema de roldanas, as mesmas guiam o cabo elétrico que sustenta a sonda e ao mesmo tempo tracionam o encoder incremental de pulsos.

O encoder incremental de pulsos gera pulsos para cada unidade deslocamento, possui dois canais (A e B) deslocados de 90° elétricos entre si, estes servem para indicar a direção do encoder, sendo que quando o canal A chega primeiro, e o B depois, indica uma direção, e quando o B chega primeiro, e o A depois, isso indica que está na direção inversa.

Na Figura 25 pode ser visualizado a saída dos dois canais do encoder e entender o processo de reconhecimento do sentido de avanço e recuo para o movimento da sonda. Para a condição de avanço, o controle verifica a ocorrência de bordas de transição positiva do sinal (altera de 0V para +5V) no canal 1, com o canal 2 estando em nível lógico baixo (0V). Já reconhecimento do sentido de recuo do movimento, o mesmo ocorre pela existência de bordas de transição positiva do sinal (0V para +5V) no canal 1, com o canal 2 em nível lógico alto (+5V).

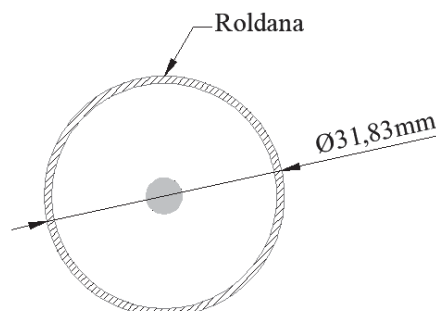
Figura 25. Reconhecimento do sentido do movimento do encoder



Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013

Será utilizado o encoder fabricado pela S&E Instrumentos, o mesmo apresenta um total de 100 pulsos por volta, e a roldana que traciona o encoder deverá possuir um diâmetro que complete um comprimento periférico de 100 mm, evidenciando uma resolução de 1 pulso/mm. O diâmetro da roldana necessário para obter 1 pulso/mm é de 31,83mm, e pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26. Roldana



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de medição a ser utilizado seguirá o mesmo padrão utilizado no desenvolvimento do sistema SADi, devido o mesmo já ter sido comprovado e estar operando adequadamente. O mesmo é mostrado na Figura 27.

Figura 27. Sistema de medição desenvolvido para o SADi



Fonte: Dissertação de mestrado – Rodrigo S. Penz, 2013

A utilização do encoder se faz necessário para realizar a medição de forma automática da profundidade da sonda, reduzindo, desta forma, o tempo de medição e possíveis erros de posicionamento, proporcionando uma maior exatidão nos resultados medidos.

Para gerenciamento dos dados fornecidos tanto pelo sistema de medição de profundidade como pelo conversor AD, é necessário um sistema de gerenciamento e processamento central que receba as mesmas e processe cada uma delas.

3.3 SISTEMA DE PROCESSAMENTO CENTRAL

O microcontrolador representado na Figura 22 é responsável por receber os dados das inclinações de eixo direto e transversal da sonda, bem como, a profundidade da sonda no tubo guia, essas funções são realizadas em paralelo. A cada reposicionamento da sonda são geradas interrupções, o microcontrolador envia os dados de inclinação e posição à saída serial RS-232 para transmissão sem fio Bluetooth, onde é recebida pelo PC e IHM. Essas interrupções não devem parar o processamento, elas devem ser tratadas enquanto o microcontrolador continua rodando seu programa principal.

O microcontrolador projetado é o ARM Cortex-M4F presente na placa de desenvolvimento TM4C123GH6PM da Texas Instruments. Por possuir as características necessárias para o projeto que são, a presença da comunicação I2C, que é responsável pela comunicação entre a sonda e o microcontrolador, sendo necessárias apenas duas conexões

elétricas, onde o firmware desenvolvido para o mesmo, possibilita o condicionamento, recebimento e a conversão do sinal serial enviado pelo A/D. Entradas de I/O para comunicação com o encoder, no qual, o firmware tem a função de reconhecer a referência zero para a profundidade através de uma informação oriunda da IHM e além disso, deve efetuar a contagem dos pulsos do encoder e reconhecer movimentos de avanço e retorno da sonda no tubo guia, a fim de não perder a sua referência. Saída serial para realizar a comunicação com o bluetooth e proporcionar o envio dos dados das medições para o PC (IHM). Além disso, possui capacidade de processamento paralelo, fazendo o processamento dos dados recebidos do conversor A/D e ao mesmo tempo realiza o tratamento da interrupção externa gerada pelos canais do encoder nos pinos de I/O para informar a profundidade da sonda, possui clock de até 80MHz e velocidade de comunicação de 115200 baud rate, que são necessários para realizar as tarefas em paralelo.

3.4 BLUETOOTH

No projeto, a placa bluetooth representada na Figura 22 tem a função de transmitir do microcontrolador para o PC os dados gerados pela sonda e encoder, sendo os dados gravados em arquivo, construindo uma base de dados, para assim possibilitar uma posterior análise pelo usuário. Além disso, o bluetooth é responsável por transmitir dados enviados pelo PC para o microcontrolador, a fim de produzir a informação para que o sistema entenda o instante do início do processo de medição. O envio e recebimento de dados entre o microcontrolador e a placa bluetooth é feita através de comunicação RS232.

O módulo de bluetooth utilizado para o projeto é o HC-06, pois, através do mesmo é possível fazer o envio e recebimento de dados e possui um alcance de transmissão de aproximadamente 10 metros, além de baixo consumo.

3.5 FONTE

Para a alimentação do sistema é necessária uma fonte DC. O dimensionamento e desenvolvimento é baseado na soma das correntes do sistema, sendo que a tensão que alimenta o sensor deve ser bem estável e precisa, para não inserir algum tipo de erro nas medidas de ângulo. A fonte será responsável por alimentar o microcontrolador, placa do bluetooth, o encoder e a sonda. A partir da definição dos componentes do sistema será

possível dimensionar a fonte necessária para garantir o bom funcionamento dos mesmos. Como fonte DC é utilizada uma bateria e circuitos reguladores para atingir a tensão final em que chega ao sistema.

Para determinar a capacidade de corrente do projeto da fonte, somaram-se as correntes de consumo dos principais componentes eletrônicos das placas, totalizando aproximadamente 50 mA. Em posse dessa corrente, foi especificado um regulador de tensão 7805, que possui saída regulada para +5V e capacidade de corrente de 1 A. Dimensionou-se uma bateria para alimentação do sistema que possuísse a capacidade de manter a operação em perfeitas condições por um período de 24 horas, assim, a bateria escolhida foi de 11,1V Li-Po com 2450 mAh.

3.6 IHM

A função da IHM é iniciar o processo de medição, apresentar as medições instantâneas, receber os dados correspondentes à profundidade e inclinação da sonda, enviados pelo microcontrolador por meio de comunicação sem fio (bluetooth). Para as informações recebidas um banco de dados foi criado para o armazenamento das mesmas, para que posteriormente, seja possível por parte dos usuários levantar curvas e fazer comparações de dados em um programa de planilhas que trabalhe com arquivos (.csv).

Para desenvolvimento da IHM foi utilizado um computador pessoal com sistema operacional Windows, juntamente com software para desenvolvimento Visual Studio 2017.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo será abordado como o projeto é constituído, definindo o funcionamento de todas as partes que foram desenvolvidas. O presente trabalho propõe o aperfeiçoamento de um inclinômetro que realiza medições de forma dinâmica, com angulações variando entre $+30^\circ$ e -30° . Para abordar todas as partes do projeto de forma detalhada, este é dividido em termos de estrutura do hardware sendo esta regulador de tensão e fonte do sistema, sensor de inclinação, conversor A/D, bluetooth, sensor foto emissor e foto receptor, firmware, software e estrutura mecânica.

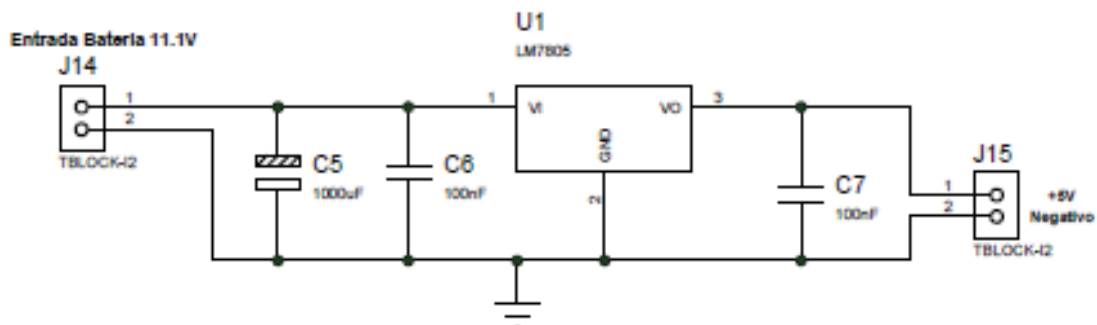
4.1 HARDWARE

Neste subcapítulo serão abordadas todas as partes envolvidas no hardware do projeto.

4.1.1 Fonte do Sistema e Regulador de tensão

A saída do sensor de inclinação SCA100TD02 é função da sua tensão de alimentação, além da sua inclinação. Para que erros causados pela oscilação na alimentação não ocorram, foi optado por alimentá-lo com uma tensão de referência de 5V, obtida da tensão de 11,1V da bateria, utilizando um LM7805, que é um regulador de tensão para 5V, onde para o correto funcionamento necessita de 2,5V acima de sua tensão. A aplicação feita pode ser vista na Figura 28.

Figura 28. Circuito regulador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor

Pensando no uso e instalação do sistema em campo foi optado por fazer a alimentação do mesmo através de uma bateria e projetado duas fontes, sendo uma para a sonda, a qual ficará junto a mesma e outra fonte para o sistema que ficará junto ao usuário do SADi, pois os circuitos ficam longe um do outro e seria perdido estabilidade na tensão tanto para o sensor de inclinação SCA100TD02 como para o conversor A/D ADS1115 e com isso os mesmos não funcionam corretamente. Desse modo, foi optado por fazer essa redução de tensão próxima ao A/D e do inclinômetro para não ocorrer erros de medição. O consumo de corrente dos circuitos das duas fontes pode ser visualizado na Quadro 02.

Quadro 2. Corrente de consumo das fontes

Fonte 01 - Junto ao usuário SADi	
Componente	Consumo
Microcontrolador	8mA
Bluetooth	8mA
Encoder	30mA
Total	46mA
Fonte 02 - Sonda	
Componente	Consumo
Sensor de inclinação SCA100T-D02	4mA
Conversor ADS1115	150µA
Total	4,15mA

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi utilizado um regulador de tensão para 5V para alimentar a fonte 01 e outro para a fonte 02. Foi optado por utilizar reguladores separados para evitar de ocorrer um erro de tensão na entrada do inclinômetro.

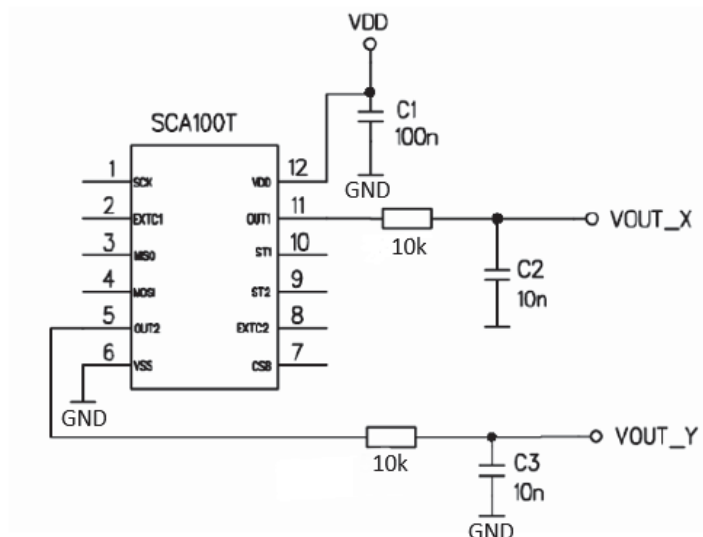
Para os reguladores de tensão 7805, a potência dissipada sobre os mesmos será o produto da corrente pela tensão retida, para a fonte 01 resulta em 0,2806 W e para a fonte 02 resulta em 25,315mW, ficando para ambas bem abaixo da dissipação máxima suportável pelo regulador de tensão para uso sem dissipador externo que é de 1,5W.

4.1.2 Sensor de Inclinação

Neste é descrito o circuito utilizado juntamente com o sensor de inclinação, o SCA100T-D02. Para trabalhar com as saídas x e y na configuração analógica, o circuito montado é disponibilizado no datasheet e pode ser visto na Figura 30.

A alimentação do SCA100T-D02 é realizada através de uma fonte de alimentação regulada de 5V. A fim de obter o melhor desempenho foi utilizado a mesma tensão de referência para o sensor SCA100T-D02 e o conversor analógico/digital. Nas saídas do sensor de inclinação foi utilizado um filtro RC passa baixa com resistor de 10 k Ω e capacitor de 10nF para minimizar o ruído (filtro especificado no datasheet do SAC100T-D02). A corrente de consumo do sensor SCA100T-D02 é de 4mA.

Figura 29.Circuito do sensor de inclinação SCA100T-D02



Fonte: Adaptação do datasheet do SCA100T-D02

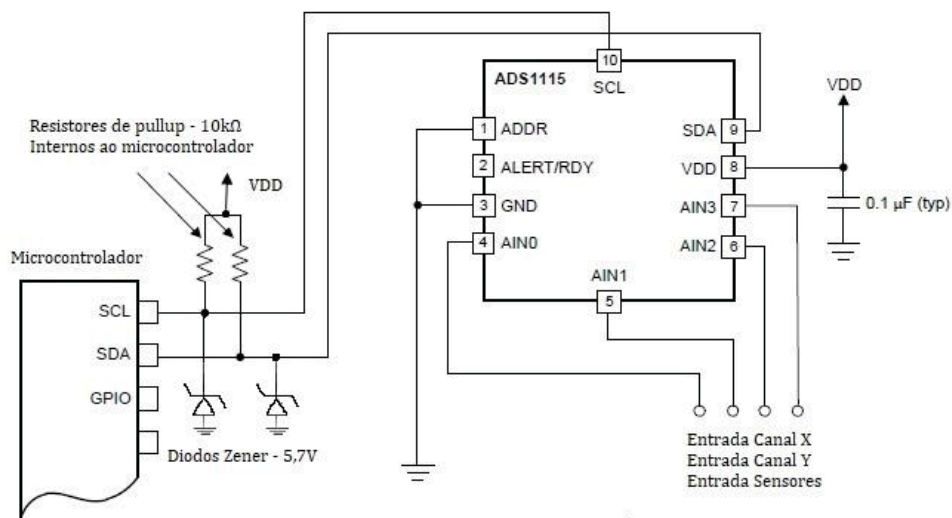
4.1.3 Conversor A/D

O circuito do conversor A/D no qual é utilizado o CI ADS1115, incluindo a comunicação I2C é mostrado na Figura 31. Nas linhas SDA e SCL são incluídos resistores de pull-up os mesmos são necessários pois os drivers do barramento I2C são de dreno aberto. O valor ôhmico dessas resistências varia de acordo com a velocidade de operação do barramento e da capacitância das linhas. Os resistores de pull-up utilizados possuem valor ôhmico de 10 k Ω e são do próprio microcontrolador, para fazer a utilização dos mesmos, é necessária que

seja feita sua ativação através do software. Nas saídas do conversor A/D forma adicionados diodos Zener de 5,7 V para proteção das entradas do microcontrolador, a fim de garantir que as entradas não fiquem expostas a tensões superiores à suportada de 5 V.

O conversor ADS1115 em conversão contínua, a qual estamos utilizando no projeto, tem uma corrente de consumo de $150\mu\text{A}$ e os dados estão sendo enviados pela I2C a uma velocidade de 100kb/s .

Figura 30. Circuito do conversor A/D - ADS1115

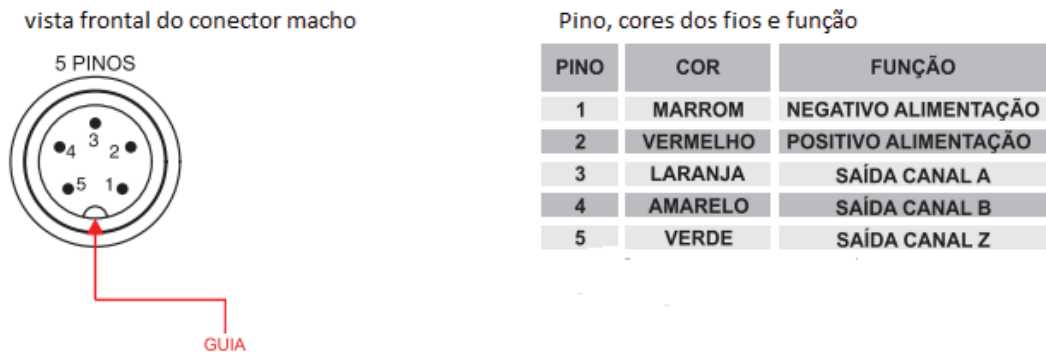


Fonte: Adaptação do datasheet do ADS1115

4.1.4 Encoder

O encoder utilizado possui 5 pinos de saída sendo eles, os canais A, B e Z, alimentação positiva e GND. Para colocar o encoder em funcionamento foram feitas as conexões necessárias dos seus pinos de acordo com o seu datasheet, a descrição dos mesmos pode ser vista na Figura 32. A alimentação do encoder no qual é 5V, provém do mesmo circuito regulador de tensão utilizado para alimentar o microcontrolador e seus canais de saída A e B são conectados diretamente a pinos de I/O do microcontrolador e se consumo é de 30mA. Ressalta-se que o canal Z não foi utilizado para esta aplicação, assim, não foi ligado ao circuito.

Figura 31. Pinagem encoder

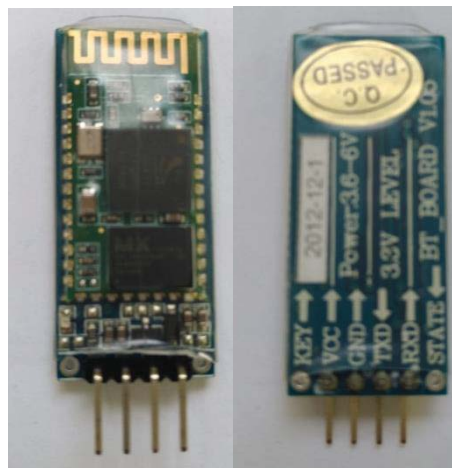


Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.5 Bluetooth

Para transmissão de dados sem fio através da serial, foi utilizado o módulo de comunicação pronto, sendo transmissor e receptor no mesmo encapsulamento. O módulo bluetooth HC-06 pode ser visto na Figura 33.

Figura 32. Bluetooth hc-06 utilizado no projeto



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o módulo entrar em funcionamento foi necessário conectar os pinos de alimentação e os pinos de saída RXD e TXD, sendo que a alimentação provém do microcontrolador pelo fato do mesmo necessitar de alimentação em 3,3V e essa tensão é disponibilizada pelo microcontrolador. As saídas RXD e TXD são conectadas aos pinos do microcontrolador sendo RXD conectado ao TXD do microcontrolador e TXD conectado ao RXD do

microcontrolador. Após foi necessário apenas um computador pessoal com bluetooth interno para fazer o pareamento com a placa.

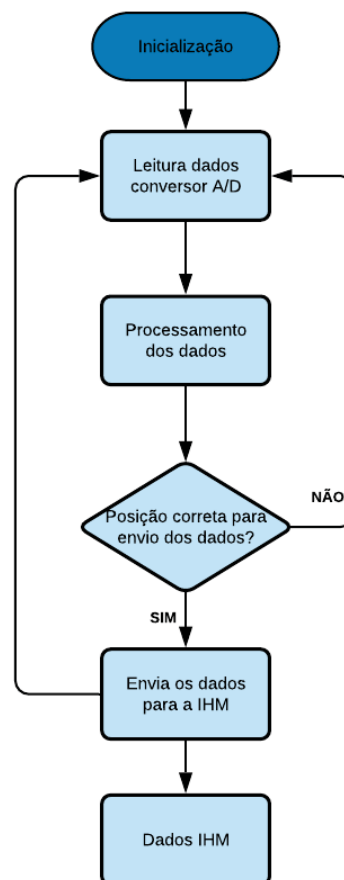
A velocidade de transmissão do bluetooth utilizada para o projeto foi de 115200 baudrate e o consumo de corrente é de 8mA.

Assim, com a relação do consumo de corrente de cada componente, à capacidade de corrente da bateria de LiPo é muito superior da projetada, sendo desta forma a bateria LiPo adequada para o uso.

4.2 FIRMWARE

O microcontrolador é o dispositivo que controla todo o sistema, assim, o fluxograma da Figura 34 representa o *firmware* construído para este projeto, na sequência é descrito os blocos que o compõe.

Figura 33. Fluxograma do firmware



Fonte: Elaborado pelo autor

Na inicialização do sistema que é realizada por um botão de start na IHM que pode ser visualizada na Figura 36, a mesma envia um código para o microcontrolador reconhecer e iniciar as leituras permanentes dos dados do conversor A/D, recebidos através da comunicação I2C, que são os valores da inclinação no eixo direto e transversal, bem como, os pulsos do encoder para saber em que profundidade e posição a sonda se encontra. Após, o microcontrolador receber os dados, seu processamento inicia a conversão de bits para ângulos e posição de profundidade. Os valores que são correspondentes aos pulsos do sensor são processados para indicar em que profundidade a sonda se encontra e se ela está subindo ou descendo dentro do tubo guia.

Os valores de inclinação recebidos do A/D, que são palavras de 16bits, só são aceitos como verdadeiros se estiverem em uma faixa de ± 5 bits em relação ao recebido anteriormente, o valor recebido é convertido para tensão e a cada 6 conversões é feita uma média, o valor da mesma é armazenado em uma variável. Antes do valor de tensão ser convertido para graus é feita uma média móvel, ou seja, pega-se 50% do novo valor de média e 50% do valor de média já armazenado, formando um novo valor. Esse valor é avaliado se está dentro da faixa de tolerância, se estiver o valor é aceito integralmente, senão estiver, é feito um novo cálculo do valor de tensão, para isso, pegasse 40% do valor formado anteriormente pela soma dos 50% do novo valor de média recebido mais os 50% do valor da média armazenado, e 60% do novo valor de média, em seguida, é feita a conversão para graus. Esses processos são necessários para estabilização do valor e para atenuar os efeitos provocados pela aceleração.

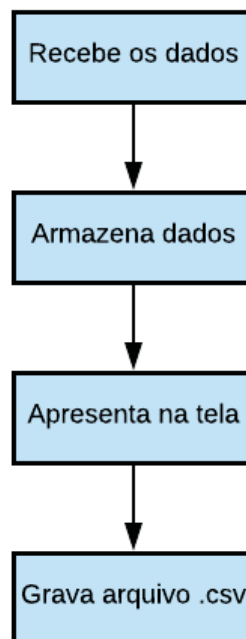
Em paralelo aos cálculos já descritos, o sistema verifica a posição correta para enviar os dados para a IHM, se a posição for a correta, ou seja, a sonda se deslocou 0,25 m em relação a leitura anterior, que equivale a distância entre os rodízios da sonda, o microcontrolador envia os novos dados para a IHM e o processo volta ao seu início. Se a posição não for a correta o processo volta ao início e novas leituras são feitas até chegar à posição correta para envio.

4.3 SOFTWARE

Através de um botão de *Start*, desenvolvido na IHM que dá-se o início do processo. Após o início a IHM fica recebendo através de comunicação sem fio – *bluetooth*, os dados da sonda processados pelo microcontrolador, os mesmos vão sendo atualizados continuamente na tela e a cada 250 mm os dados referentes ao ponto são armazenados. Ao final da medição, os dados

são armazenados em um arquivo “.csv”, o salvamento é realizado através de um botão disponível na IHM, onde o mesmo cria um arquivo para salvar os dados em formato (.csv) referentes as medições do ângulo direto e outro arquivo para o ângulo transversal para posterior manipulação dos mesmos na plataforma do Excel. A ideia do funcionamento segue um fluxo como pode ser visto na Figura 35.

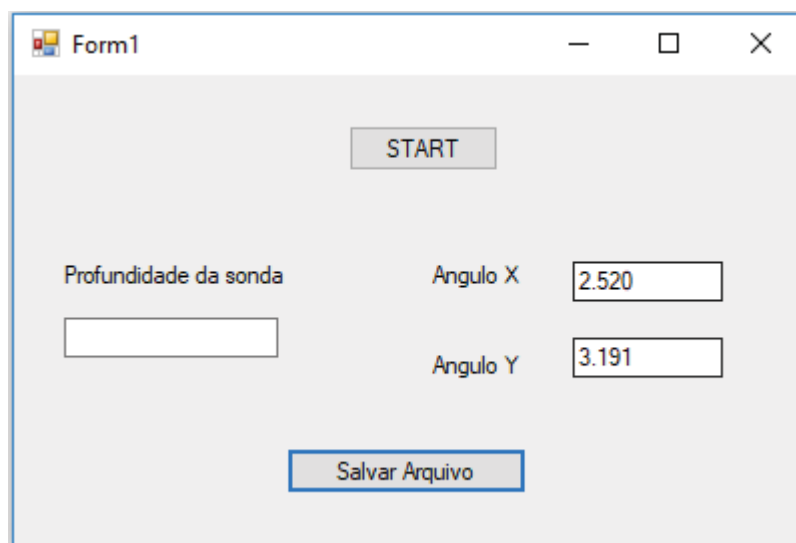
Figura 34. Fluxograma software



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi utilizado para desenvolver a IHM o software Visual Studio 2017, sendo uma aplicação para *Windows* que permite estabelecer ligações a equipamentos via porta serial ou remotamente através do *Telnet* ou *Secure Shel* - SSH. Pode ser visto na Figura 36 a aparência da tela da IHM, o qual monitora profundidade e os ângulos do sensor de inclinação, sendo eixo direto x e eixo transversal y, a cada posição correta detectada. Após finalizada as medições grava os dados em um arquivo (.csv) para análise.

Figura 35. Interface IHM



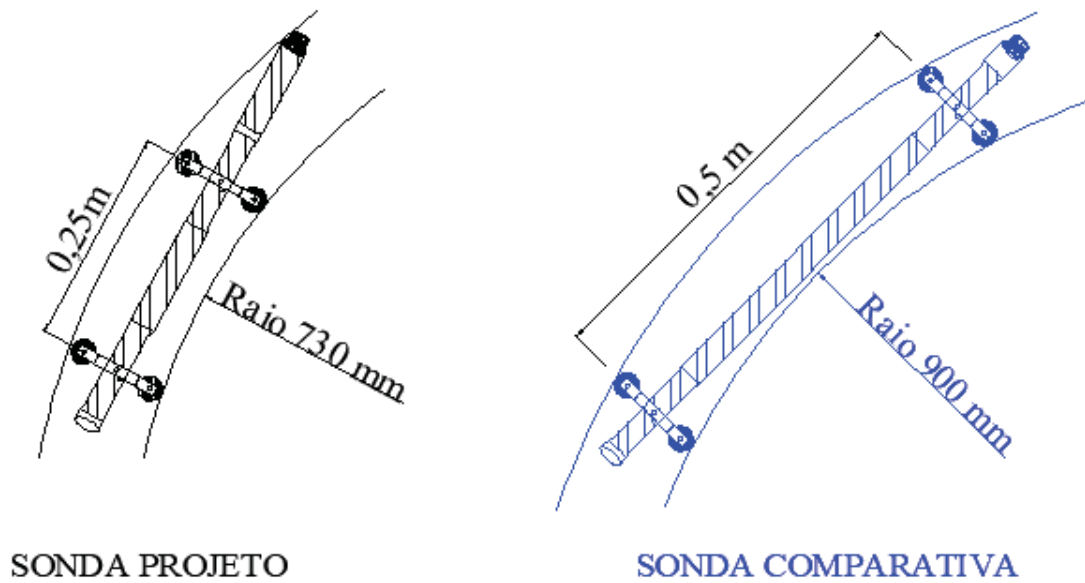
The image shows a software interface window titled "Form1". It features a "START" button at the top center. Below this, there are three input fields: "Profundidade da sonda" (empty), "Angulo X" (containing the value "2.520"), and "Angulo Y" (containing the value "3.191"). At the bottom center, there is a "Salvar Arquivo" button.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 ESTRUTURA MECÂNICA DA SONDA

Uma das propostas do projeto foi diminuir o comprimento entre rodízios da sonda em relação às sondas comerciais que possuem distância entre rodízios superiores, ficando com valores de 0,5 m a 1 m. Para a sonda do projeto a distância entre rodízios é de 0,25 m, a vantagem desta 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 18 onde está condiciona o ideal da medida do “L” da sonda tender a zero, aumentando a resolução do sistema. Ainda, é melhorada a condição de excursão da sonda pelo tubo guia em regiões que sofrem cisalhamento entre as camadas do solo, como é demonstrado na Figura 37.

Figura 36. Comparação entre as sondas na excursão por curvas raios pequenos

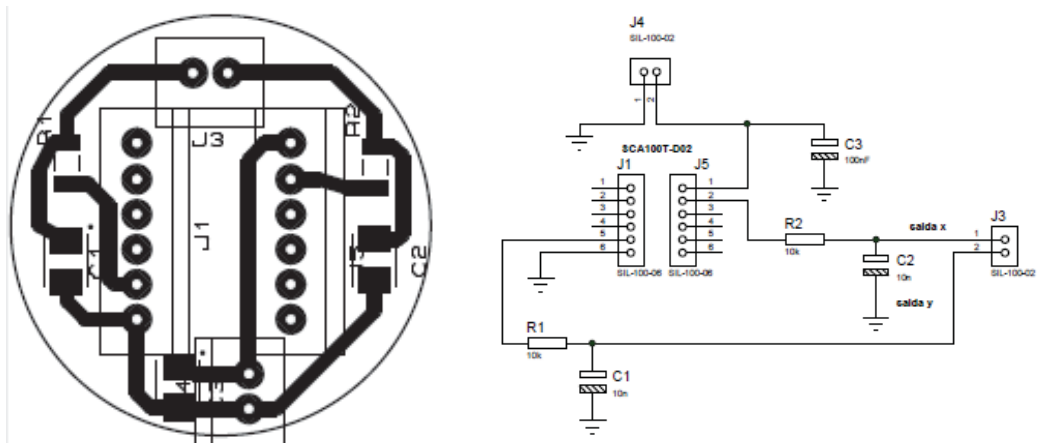


Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação a definição do diâmetro de 32 mm para o corpo da sonda, está ocorrendo pela condição de espaço para alocar os componentes eletrônicos e principalmente o sensor SCA100T-D02, que exige uma ocupação de diâmetro 17,5mm e deve ficar na posição horizontal. Assim, para alocar os componentes eletrônicos dentro da sonda, as placas de circuito impresso foram feitas no formato circular e com diâmetro menor ao diâmetro interno da sonda para encaixarem dentro da mesma.

Na Figura 38 encontra-se apresentado o layout da placa utilizada para alocar os componentes do circuito do sensor de inclinação SCA100TD02.

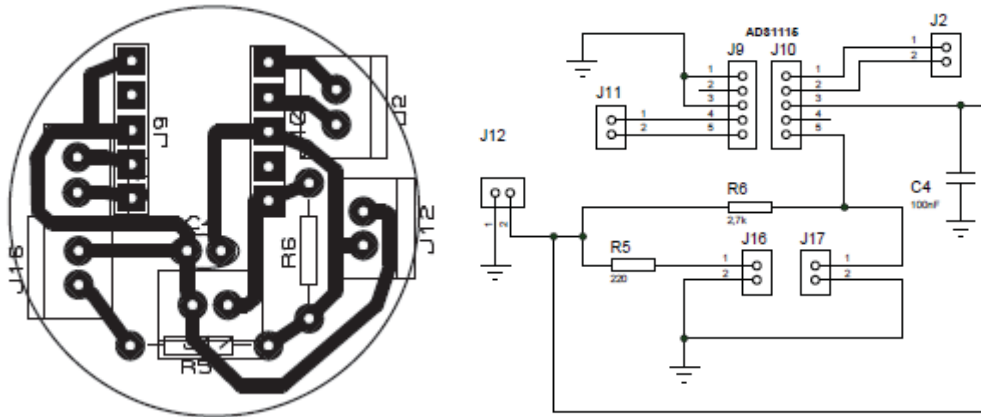
Figura 37. Placa sensor de inclinação SCA100TD02



Fonte: Elaborado pelo autor

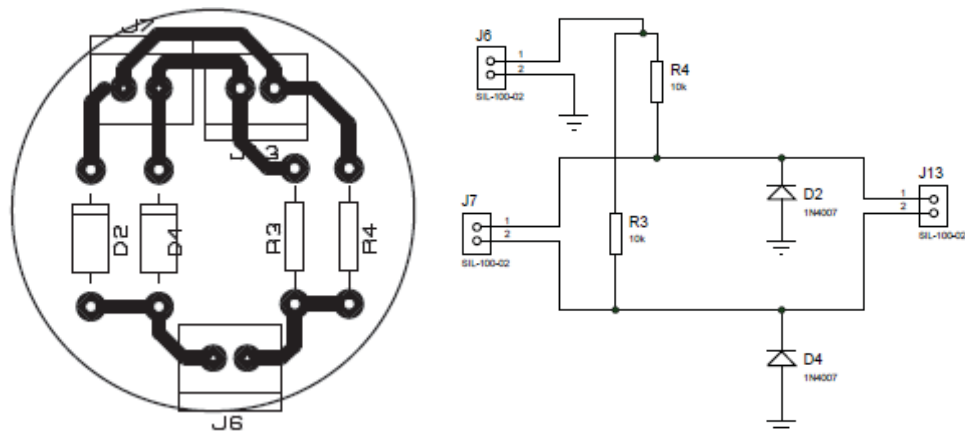
O layout e esquemático utilizado para a montagem da placa do conversor AD pode ser visto na Figura 39 e 40, na Figura 39 tem-se o conversor ADS1115 e os filtros passa baixa, necessários para o mesmo e na Figura 40 tem-se resistores de pull-up e diodos Zener para a proteção das entradas do microcontrolador.

Figura 38. Placa conversor ADS1115



Fonte: Elaborado pelo autor

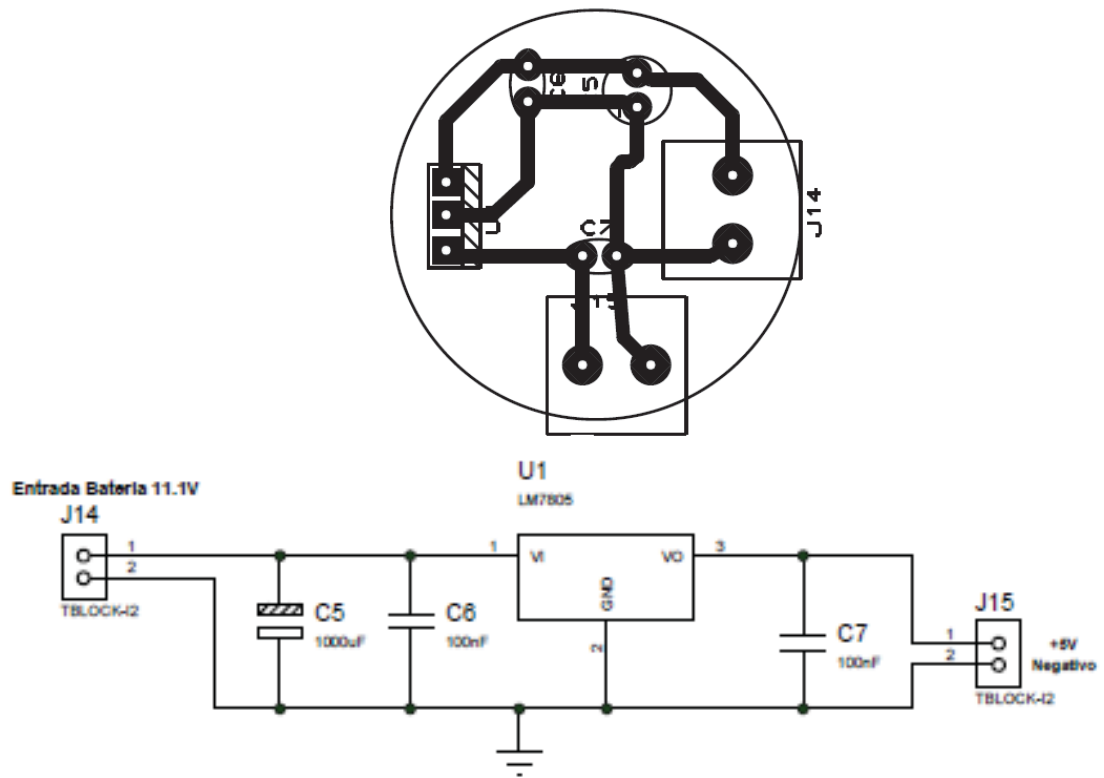
Figura 39. Placa auxiliar conversor ADS1115



Fonte: Elaborado pelo autor

A alimentação de todos circuitos citados nas placas anteriores e o regulador de tensão para 5V, para alimentar os mesmos, podem ser vistos na Figura 41.

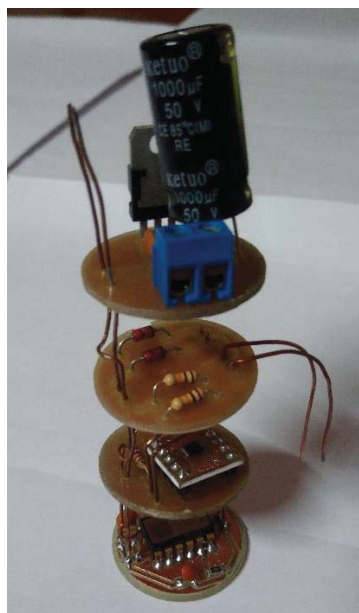
Figura 40. Placa regulador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 42 apresenta-se o protótipo montado das placas, entre elas foi criado um barramento de alimentação e conexões necessárias de uma para a outra.

Figura 41. Placas de circuito impresso



Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final do processo de desenvolvimento e construção, o sistema foi submetido à calibração e ensaios de verificações de suas medições. Primeiramente foi realizado ensaio para comprovar a exatidão e precisão das medidas do encoder. No segundo ensaio foi testada a precisão e exatidão do sensor de inclinação fazendo a calibração do mesmo. No terceiro ensaio testou-se a exatidão e precisão dos valores dos ângulos obtidos juntamente com o acionamento do encoder para obter a profundidade da sonda. No quarto e último ensaio foram provocadas acelerações sobre a sonda, para comprovar se a mesma tem influência sobre os valores dos ângulos medidos.

5.1 ENSAIO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE

Foram realizados dois ensaios para a verificação dos dados obtidos com o encoder, primeiro de exatidão e após de precisão e repetição.

Inicialmente realizou-se o ensaio de precisão, para isso, foi utilizado com referência um cabo com 1m de comprimento. Em posse do cabo com a medida exata de 1m os ensaios foram realizados obtendo os valores da Tabela 1.

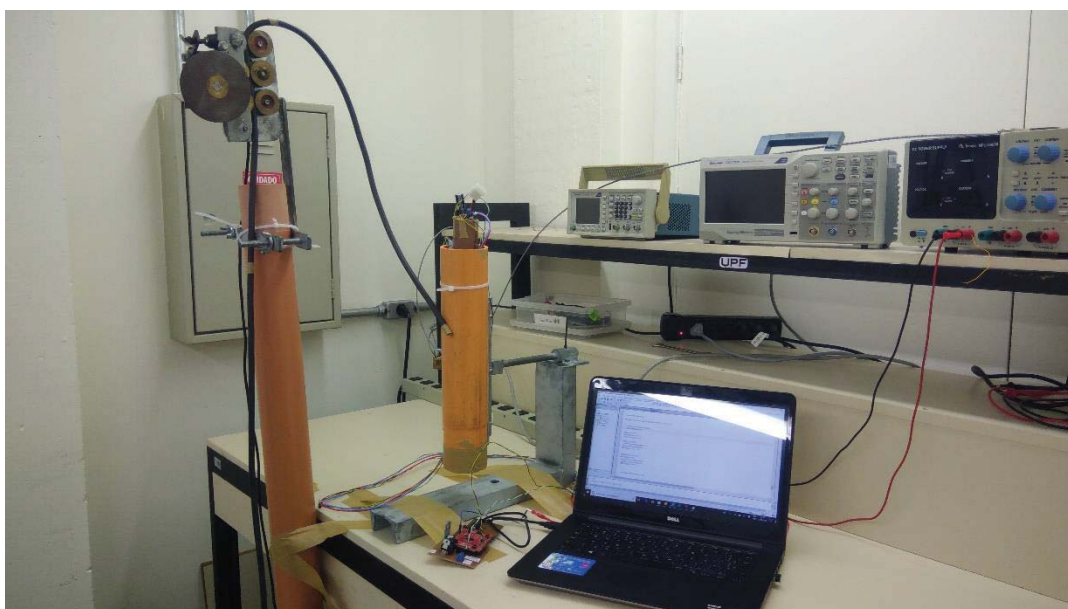
Tabela 1. Valores obtidos no ensaio com encoder

Repetição	Referência (mm)	Valores positivos (mm)	Valores negativos (mm)
1	1000	995	-998
2	1000	995	-996
3	1000	995	-995
4	1000	997	-995
5	1000	997	-998
6	1000	995	-995
7	1000	998	-995
8	1000	995	-995
9	1000	995	-995
10	1000	997	-995

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode ser observado que tanto para valores positivos como para negativos temos um erro de aproximadamente 0,5% nas medidas em relação a referência. Ocorre pelo fato de não possuímos precisamente 1pulso/mm como havíamos considerado inicialmente, pois, a roldana de referência não possui exatamente 10 mm de perímetro. Para obter as medidas precisas foi efetuado um ajuste no firmware a fim de sanar esse erro. Como possuímos 0,5% de erro, para obter 250mm foi preciso programar o firmware para descontasse o valor do erro, ou seja, 250mm reais para o programa são 248,75mm, que são os 250mm descontado o erro de 0,5%. Assim, o erro é sanado vindo este a ser praticamente zero. Na Figura 43 pode ser visto o ensaio para o sistema de medição de profundidade.

Figura 42. Ensaio sistema de medição de profundidade



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO EIXO X E Y

Antes de iniciar a realizações de medições com o projeto, foi necessário fazer o ajuste de orientação da SCA100T-D02 em relação ao corpo da sonda, para que medições realizadas no eixo direto não provoquem variação nas medições do eixo transversal. Além da verificação dos zeros das medições dos eixos, ou seja, ajustar a posição de zero grau do corpo da sonda em relação ao valor de zero grau medido pelo sensor de inclinação.

Para realizar os ensaios de calibração foi utilizado um suporte que possibilita movimentos livres e traváveis nos quatro sentidos possíveis de medição do sensor

SCA100T-D02, o suporte pode ser visto na Figura 44. Como referência de ângulo foi utilizado um nível eletrônico modelo Mitutoyo 950-315 Digital Protractor, que possui alcance de 0° a 360° , resolução de $0,1^\circ$ e uma precisão de $\pm 0,1^\circ$, que pode ser visto na Figura 45.

Figura 43. Suporte para calibração



Fonte: Elaborado pelo autor

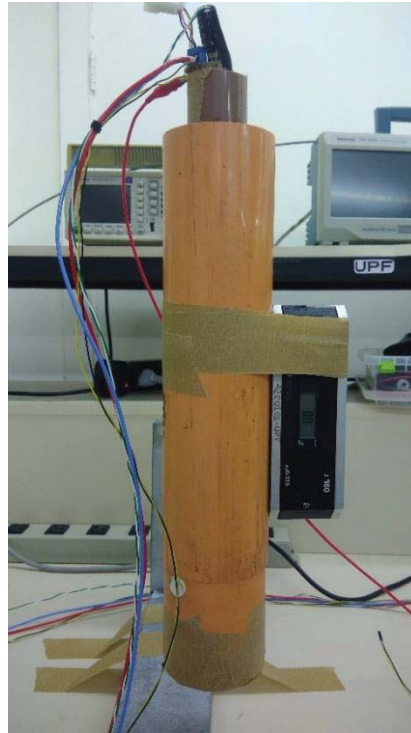
Figura 44. Mitutoyo 950-315 Digital Protractor



Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro ensaio foi realizado com a fórmula ideal e constatado que os valores apresentavam muita diferença em relação ao valor de zero grau apresentado pelo inclinômetro de referência. O ensaio pode ser visto na Tabela 2, onde temos os valores de várias leituras, e na Figura 46 temos o valor de referência.

Figura 45. Suporte de calibração com inclinômetro de referência



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2. Valores para encontrar o ângulo zero no eixo X, utilizando a fórmula ideal.

Valores de ângulo para zero grau, encontrados com a fórmula ideal (°)
-4.725
-4.690
-4.725
-4.725
-4.655
-4.725
-4.655
-4.760
-4.690
-4.690

Fonte: Elaborado pelo autor

A Equação 20, retirada da folha de dados do sensor serve para transformar tensão em ângulos em graus, mas não pode ser usada, pois as condições de idealismo não são satisfeitas, devido à existência de uma diferença de aproximadamente $-4,7^\circ$.

$$\alpha_{ideal} = \frac{V_{out-offset}}{\text{sensibilidade}} \quad (20)$$

- α_{ideal} = ângulo;
- V_{out} = tensão do A/D para zero grau, que é igual a 2.5V;
- Offset = ideal 2.5V;
- Sensibilidade = 35mV/°;

Como foi visto o sistema não é ideal, pois, o valor do ângulo encontrado deveria ser 0° e está em aproximadamente -4,7°. Dessa forma, é necessário fazer uma média dos valores da Tabela 2 e ajustar a fórmula do ângulo, sendo está a Equação 20. A média encontrada foi -4.709. Após o ajuste a nova equação usada para medir o ângulo x ficou conforme Equação 21.

$$\alpha_{ajustado} = \left(\frac{V_{out-offset}}{\text{sensibilidade}} \right) + 4.709 \quad (21)$$

Após o ajuste do zero pode-se observar na Tabela 3 que o valor do ângulo obtido no ensaio é bem mais próximo do valor real.

Tabela 3. Valores do eixo X com ajuste do ponto zero

Valor corrigido para 0° (°)	Valor real (°)
0.018	0
-0.018	0
0.018	0
0.018	0
-0.018	0
0.018	0
-0.018	0
-0.018	0
-0.018	0
-0.018	0

Da mesma forma foi realizado o ensaio para o eixo y, e os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4. Valores para encontrar o ângulo zero no eixo y, utilizando a fórmula ideal.

Valores de ângulo para zero grau, encontrados com a fórmula ideal (°)
-4.410
-4.410
-4.270
-4.270
-4.410
-4.340
-4.340
-4.340
-4.340
-4.340

Fonte: Elaborado pelo autor

Como o sistema não é ideal, pois, o valor do ângulo encontrado deveria ser 0° e está em aproximadamente -4,4°. Da mesma forma, é necessário fazer uma média dos valores da Tabela 4 e ajustar a fórmula do ângulo, sendo está a Equação 20. A média encontrada foi -4,34°. Após o ajuste a nova equação usada para medir o ângulo y ficou conforme Equação 22.

$$\alpha_{ajustado} = \left(\frac{V_{out} - \text{offset}}{\text{sensibilidade}} \right) + 4,34 \quad (22)$$

Após o ajuste do zero podemos ver na Tabela 5 que o valor do ângulo obtido no ensaio é bem mais próximo do valor real.

Tabela 5. Valores do eixo Y com ajuste do ponto zero

Valor corrigido para 0° (°)	Valor real (°)
0.105	0
0.105	0
0.105	0
0.105	0
0.140	0
0.140	0
0.175	0
0.105	0
0.175	0
0.140	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Após realizado o ajuste do zero, foi refeito o ensaio, variando a posição em vários valores de ângulo para x e para y, o resultado obtido pode ser visto nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Variação de ângulo X, comparando inclinômetro de referência em relação ao novo.

Referência (°)	Medida em x (°)
0	-0,228
10	10,797
20	22,173
30	33,303

Fonte: Elaborado pelo autor

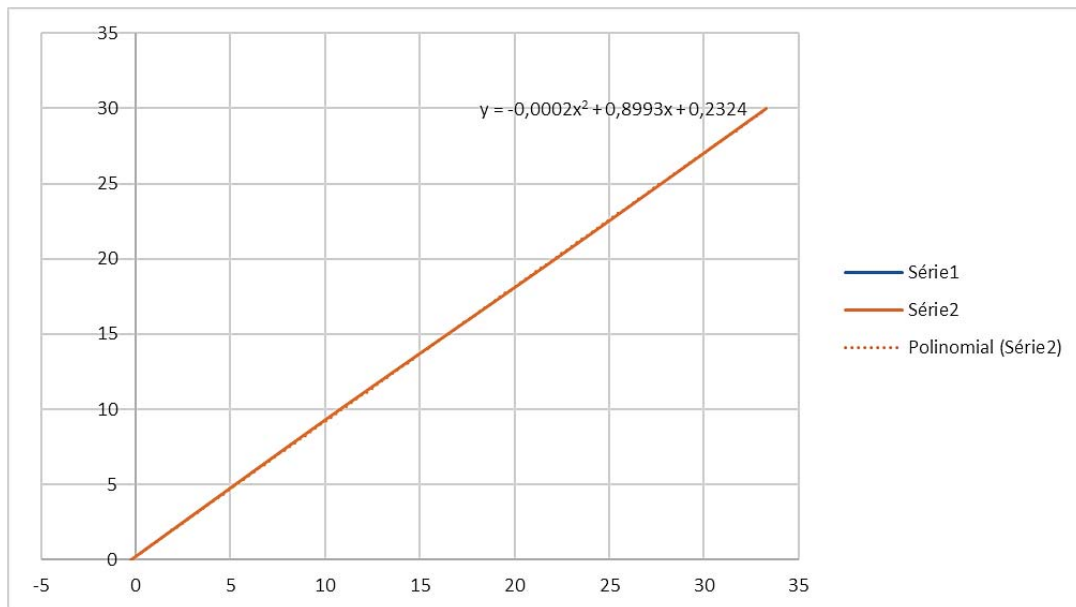
Tabela 7. Variação de ângulo Y, comparando inclinômetro de referência em relação ao novo.

Referência (°)	Medida em y (°)
0	-0,035
10	11,095
20	22,435
30	33,425

Fonte: Elaborado pelo autor

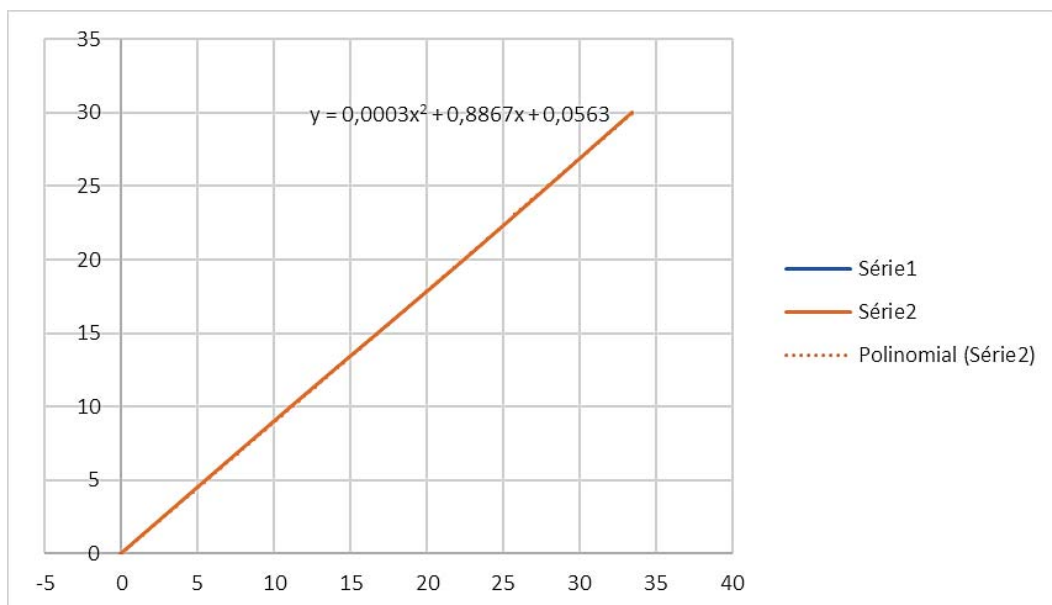
Os novos valores obtidos continuaram apresentando divergência em relação aos valores do inclinômetro de referência. Dessa forma, em virtude da divergência de valores foram gerados dois gráficos de dispersão baseados na curva polinomial de segunda ordem, visando corrigir os valores de ângulo no eixo x e no eixo y. Na Figura 47, pode ser visto o gráfico com a correção para o eixo x, e na Figura 48, a correção para o eixo y.

Figura 46. Curva de dispersão para os valores do ângulo x



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 47. Curva de dispersão para os valores do ângulo y



Fonte: Elaborado pelo autor

Chega-se a duas novas equações de ângulo a partir das Figuras 47 e 48, um para cada sentido de eixo. As mesmas, são demonstradas na Equação 23 e na Equação 24, as quais são utilizadas no programa para fazer os ensaios de variação dos ângulos em x e y. Na Equação 23 para calcular o ângulo em x, e na Equação 24 para calcular o y.

$$\alpha_{final_x} = (-0,0002x^2 + 0,899 + 0,2324) \quad (23)$$

$$\alpha_{final_y} = (0,0003x^2 + 0,8867x + 0,0563) \quad (24)$$

Onde o valor de x na equação representa o valor do ângulo α *ajustado*, proveniente das Equações 23 e 24, para x e y respectivamente.

5.3 ENSAIO DE EXATIDÃO DO INCLINÔMETRO

Após os realizar os ajustes das equações para obtenção do ângulo, passou-se para os testes de exatidão do inclinômetro em comparação a um inclinômetro digital. Os valores da comparação entre o inclinômetro digital e o inclinômetro projetado para o eixo x, podem ser vistos junto a Tabela 8.

Tabela 8. Ensaio de exatidão para o eixo x

Referência (°)	Valor encontrado para x (°)
0	0,027
2	2,106
8	7,984
12	11,997
15	15,065
21,5	21,56
29	28,934
33,1	32,813

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que os ângulos encontrados acompanharam o inclinômetro de referência até o ângulo de aproximadamente 30°, pois os limites estabelecidos de leitura são +30° e -30°. Mas ressalta-se que os valores de erro não estão tão precisos, pois, o inclinômetro que foi utilizado como referência possui apenas uma casa decimal após a vírgula e precisão de $\pm 0,1^\circ$.

O ensaio de exatidão também foi realizado para o eixo y, e os valores encontrados em relação ao inclinômetro de referência podem ser visto na Tabela 9.

Tabela 9. Ensaio de exatidão para o eixo y

Referência (°)	Valor encontrado para y (°)
0	-0,006
5,9	5,904
10,5	10,525
15,9	15,885
18,5	18,589
22,2	22,244
26,4	26,448
31,4	31,299
34,7	34,48

Fonte: Elaborado pelo autor

Os ângulos obtidos para o eixo y, também acompanharam o inclinômetro de referência até o ângulo de aproximadamente 30°, pois os limites estabelecidos de leitura são +30° e -30°.

5.4 ENSAIO DE PRECISÃO E REPETIÇÃO DO INCLINÔMETRO

Com os ensaios de exatidão realizados, e valores comprovados, foi realizado o ensaio de precisão e repetição. O ensaio decorreu com a variação do eixo x, como pode ser visto na Tabela 10, e após variando o eixo y, como pode ser visto na Tabela 11.

Para realizar o ensaio a base foi inclinada para vários ângulos tanto para x como para y, e observado se os valores obtidos obedeciam à referência.

Tabela 10. Ensaio variando x em comparação com o inclinômetro de referência.

Referência (°)	Teste1 eixo x (°)	Teste2 eixo x (°)	Análise do erro (%)
0	0,027	0,027	0
2	2,011	1,954	0,875
8	7,984	7,933	0,518
11,9	11,872	11,878	0,21
15	14,946	14,952	0,34
21,5	21,466	21,442	0,21
29	28,91	28,986	0,179

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11. Ensaio variando y em comparação com o inclinômetro de referência.

Referência (°)	Teste1 eixo x (°)	Teste2 eixo x (°)	Análise do erro (%)
0	-0,006	-0,006	0
5,9	5,966	5,81	0,203
10,5	10,494	10,4	0,504
15,9	15,948	15,948	0,302
18,5	18,589	18,589	0,48
22,2	22,339	22,308	0,439
26,4	26,543	26,48	0,556
31,4	31,458	31,363	0,033

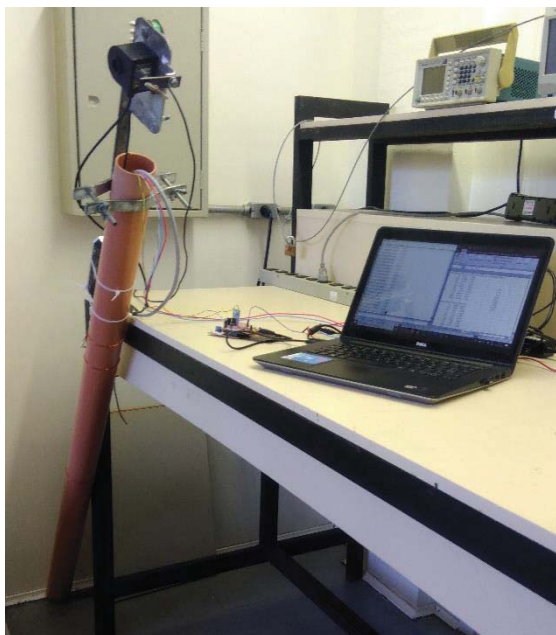
Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação aos valores das Tabelas 10 e 11, pode-se concluir que, os valores encontram-se estáveis e os valores de erro são aceitáveis, pois, como pode ser visto nenhum ultrapassou 1% e o local onde foi fixado o tubo guia de ensaio não apresentava uma perfeita fixação. O teste de exatidão também foi satisfatório, ocorrendo apenas pequenas variações nas medidas, pois, como o inclinômetro de referência possui precisão de $\pm 0,1^\circ$ na segunda repetição a base pode não ter sido ajustada exatamente no mesmo ponto.

5.5 ENSAIO DE INCLINAÇÃO E MEDIDA DE PROFUNDIDADE COM USO DO ENCODER

Neste ensaio o foi montado o sistema de medição de profundidade juntamente com a sonda, para obter os valores de ângulo a cada profundidade desejada da sonda. Para os ensaios, foi adotado realizar a visualização do ângulo a cada 125 mm, pois os cálculos dos mesmos são realizados em todo o tempo do processo. Para realizar o ensaio, a sonda foi alocada dentro de um tubo para inclinômetro, o mesmo foi fixado em apenas um ângulo, pois, os ensaios simularam uma aplicação, mas foram realizados no laboratório. Na Figura 49 pode ser visualizado o sistema montado.

Figura 48. Sistema para simulação real da medição de profundidade e ângulos



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram realizados dois ensaios para obter as medições dos valores de ângulos para x e y, comprovando a exatidão. Primeiramente a sonda foi colocado com os rodízios formando 90° com a inclinação do tubo e em seguida a mesma foi rotacionada ficando com os rodízios paralelos a inclinação do tubo.

Após foram realizadas repetições para comprovar a repetibilidade do sistema. Onde os resultados das medições, com os rodízios da sonda formando 90° com a inclinação do tubo para o eixo x podem ser visualizados na Tabela 12 e na Figura 50.

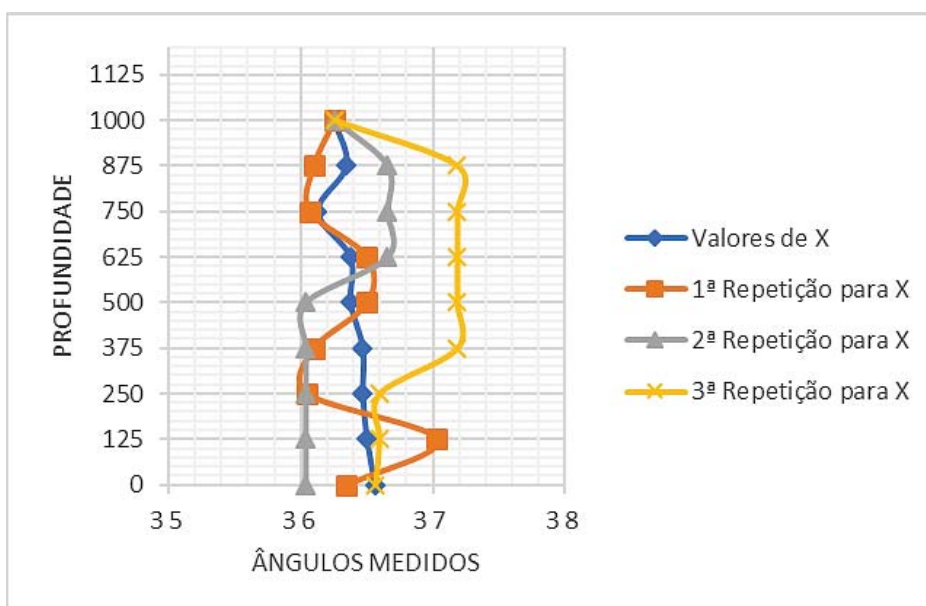
Os valores obtidos para x e y no primeiro ensaio foram realizados a sem movimento da sonda, apenas foi deslocada para as profundidades desejadas e após realizada a medição, para poder ter valores de referência. As repetições foram realizadas com a sonda em movimento, ou seja, de forma dinâmica.

Tabela 12. Valores obtidos para X

Profundidade (mm)	Valores de X (°)	1ª Repetição para X (°)	2ª Repetição para X (°)	3ª Repetição para X (°)	Erro (%)
0	36,253	36,253	36,253	36,253	0
125	36,346	36,097	36,657	37,185	0,826
250	36,128	36,066	36,657	37,185	1,406
375	36,377	36,501	36,657	37,185	1,111
500	36,377	36,501	36,035	37,185	0,541
625	36,470	36,097	36,035	37,185	0,085
750	36,470	36,051	36,035	36,595	0,666
875	36,501	37,030	36,035	36,595	0,143
1000	36,564	36,346	36,035	36,595	0,681

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49. Variação dos valores obtidos para X



Fonte: Elaborado pelo autor

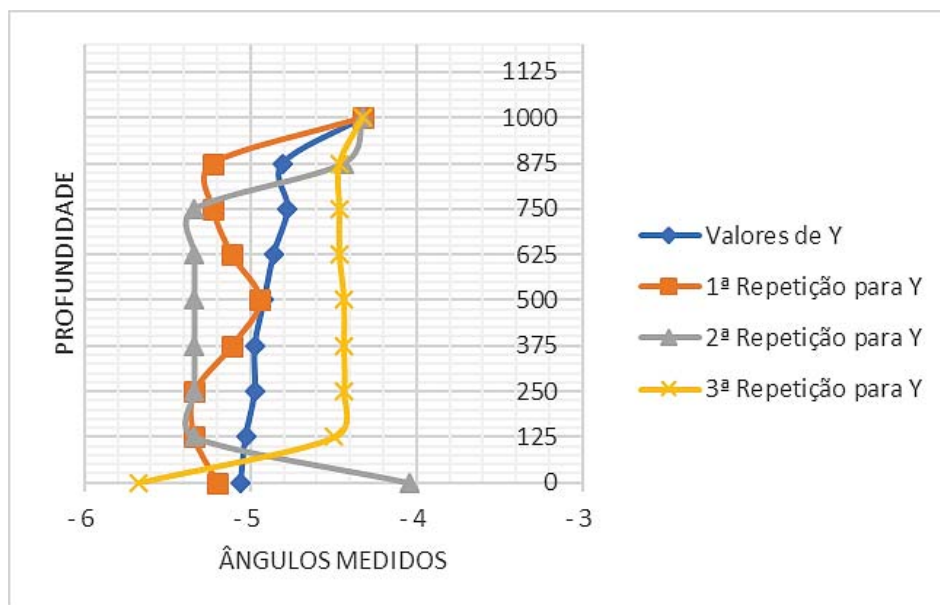
Os resultados das medições, com os rodízios da sonda formando 90° com a inclinação do tubo para o eixo Y podem ser visualizados na Tabela 13 e na Figura 51.

Tabela 13. Valores obtidos para Y

Profundidade (mm)	Valores de Y (°)	1ª Repetição para Y (°)	2ª Repetição para Y (°)	3ª Repetição para Y (°)	Erro (%)
0	-4,325	-4,325	-4,325	-4,325	0
125	-4,803	-5,224	-4,438	-4,466	1,95
250	-4,775	-5,224	-5,336	-4,466	4,894
375	-4,859	-5,112	-5,336	-4,438	2,312
500	-4,915	-4,943	-5,336	-4,438	0,190
625	-4,971	-5,112	-5,336	-4,438	0,181
750	-4,971	-5,336	-5,336	-4,438	1,321
875	-5,027	-5,336	-5,336	-4,494	0,564
1000	-5,055	-5,196	-4,044	-5,671	1,675

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 50. Variação dos valores obtidos para Y



Fonte: Elaborado pelo autor

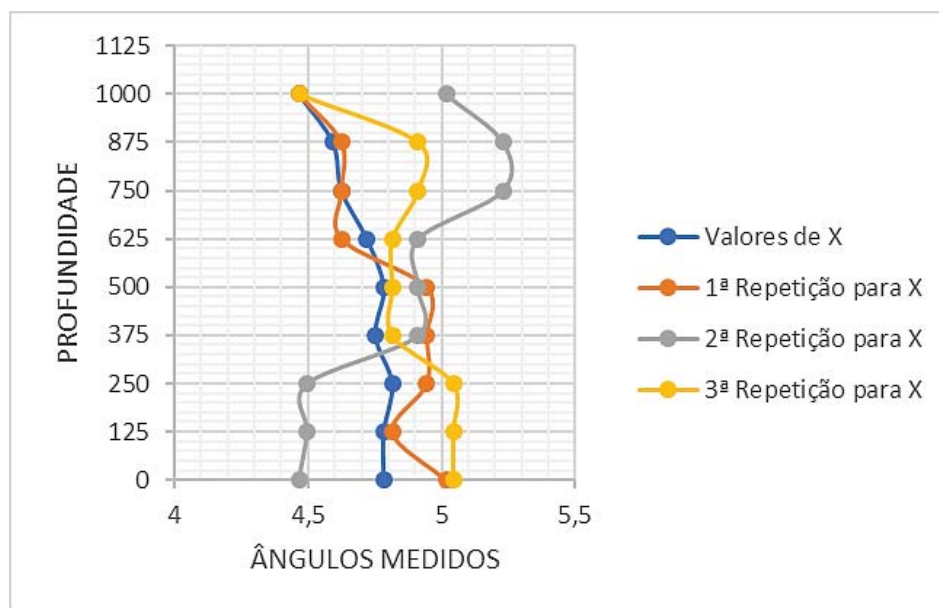
Os valores obtidos com os rodízios da sonda paralelos a inclinação do tubo para o eixo x podem ser visualizados na Tabela 14 e na Figura 52.

Tabela 14. Valores obtidos para X

Profundidade (mm)	Valores de X (°)	1ª Repetição para X (°)	2ª Repetição para X (°)	3ª Repetição para X (°)	Erro (%)
0	4,466	4,466	4,466	4,466	0
125	4,593	4,625	4,498	4,912	1,858
250	4,625	4,625	4,498	4,912	1,153
375	4,721	4,944	4,912	4,816	1,342
500	4,784	4,944	4,912	4,816	2,23
625	4,753	4,944	4,912	5,044	2,896
750	4,816	4,944	5,230	5,044	5,329
875	4,784	4,816	5,230	5,044	5,142
1000	4,784	5,016	5,016	5,044	5,045

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 51. Variação dos valores obtidos para X



Fonte: Elaborado pelo autor

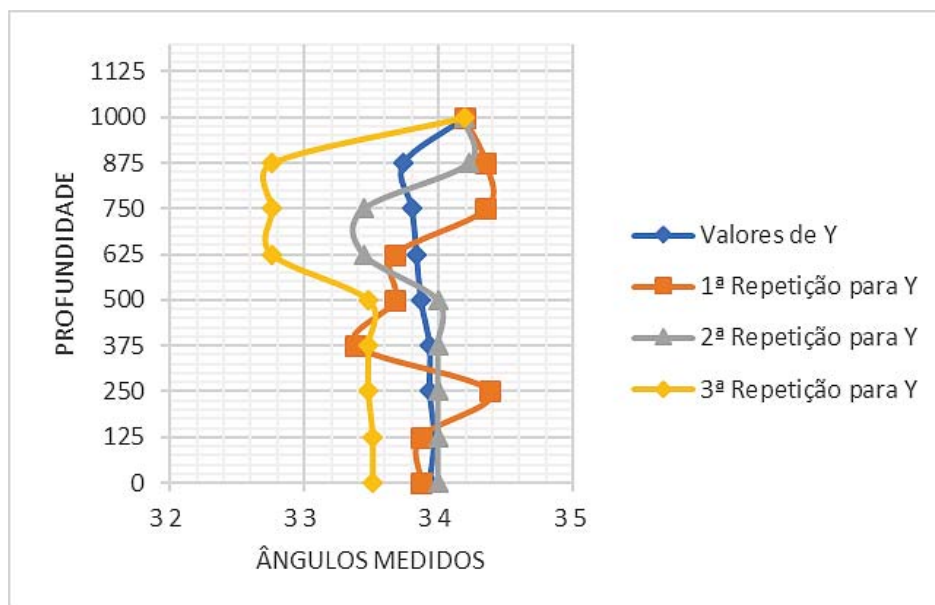
Os valores obtidos com os rodízios da sonda paralelos a inclinação do tubo para o eixo Y podem ser visualizados na Tabela 15 e na Figura 53.

Tabela 15. Valores obtidos para Y

Profundidade (mm)	Valores de Y (°)	1ª Repetição para Y (°)	2ª Repetição para Y (°)	3ª Repetição para Y (°)	Erro (%)
0	34,189	34,189	34,189	34,189	0
125	33,735	34,351	34,222	32,763	0,129
250	33,799	34,351	33,443	32,763	0,828
375	33,832	33,670	33,443	32,763	1,596
500	33,864	33,670	33,994	33,475	0,446
625	33,929	33,384	33,994	33,475	0,918
750	33,929	34,384	33,994	33,475	0,065
875	33,962	33,864	33,994	33,508	0,510
1000	33,929	33,864	33,994	33,508	0,414

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52. Variação dos valores obtidos para Y



Fonte: Elaborado pelo autor

Após os ensaios é possível verificar que as medições apresentam pequenas variações, onde uma das causas é que o protótipo aonde foi realizado não é totalmente instável podendo a vir causar essas pequenas oscilações. Com as medidas realizadas com a sonda introduzida no tubo em dois sentidos, pode-se comprovar que os eixos x e y não possuem cruzamento de valores, pois, os valores das medições se invertem.

Para o sistema proposto as variações apresentadas são tomadas como normais, assim, os valores obtidos nos ensaios realizados são satisfatórios, pois, na maioria dos testes os erros percentuais não ultrapassaram 2%, exceto em alguns casos onde os mesmos podem vir a ocorrer por oscilações na base do protótipo.

5.6 ENSAIO DE COMPROVAÇÃO DE INFLUÊNCIA DA ACELERAÇÃO SOBRE MEDIÇÕES

Com os ensaios realizados, e aplicações bruscas de aceleração sobre a sonda, ou seja, foram produzidas acelerações e desacelerações repetitivas durante a excursão da sonda, para verificação se os mesmos influenciavam nos valores. Podemos afirmar que os valores obtidos dos ângulos praticamente não foram influenciados pela aceleração. Isso ocorre pois, no firmware, foi implementado um filtro média móvel e verificações de taxas de variação para aceitar o valor recebido como verdadeiro, isso, impede que medidas que saem totalmente do percurso que vem sendo obtido à serem tomadas como verdadeiras. Na Tabela 16 e 17 pode ser visualizado os valores do ensaio realizado.

Tabela 16. Valores obtidos para X no ensaio com aceleração

Profundidade (mm)	Valores de X (°)	Valor obtido para X (°)	Erro (%)
0	36,253	36,253	0
125	36,346	36,657	0,856
250	36,128	36,657	1,464
375	36,377	36,657	0,77
500	36,377	36,035	0,94
625	36,470	36,035	1,193
750	36,470	36,035	1,277
875	36,501	36,035	1,277
1000	36,564	36,035	1,447

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17. Valores obtidos para Y no ensaio com aceleração

Profundidade (mm)	Valores de Y (°)	Valor obtido para Y (°)	Erro (%)
0	-4,325	-4,325	0
125	-4,803	-4,466	1,93
250	-4,775	-4,466	1,935
375	-4,859	-4,466	1,919
500	-4,915	-4,438	1,903
625	-4,971	-4,438	1,893
750	-4,971	-4,438	1,893
875	-5,027	-4,494	1,894
1000	-5,055	-5,671	2,122

Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o término do projeto, percebe-se a importância do estudo a respeito de questões ambientais para mostrar como o protótipo auxilia na prevenção de danos futuros. Além de conhecimento agregado abrangendo formas de monitoramento de estabilidade de taludes, sensores de inclinação, além das características dos inclinômetros comerciais.

Após o desenvolvimento do projeto e construção do protótipo, verifica-se que o trabalho atingiu os objetivos traçados, a qual era implementar um sistema de medição de inclinação de solo capaz de realizar as medições através do canal analógico, convertendo este sinal para 16 bits e disponibilizar esses valores visualmente e em arquivo .csv em um PC. O inclinômetro realiza medidas em ângulo nos eixos x e y, com medição automática de profundidade e medições de forma dinâmica.

Apesar das dificuldades na realização de alguns ensaios, pelo fato de o protótipo não ser totalmente estável, por ter sido simulado uma situação real em laboratório e o sistema ser sensível a vibrações ou movimentações. Os ensaios comprovaram de forma satisfatória que a equação de média móvel implementada ficou adequada ao sistema e além desta os cálculos matemáticos para atenuar as possíveis interferências causadas pela aceleração também foram comprovados de forma satisfatória através dos ensaios. Ambos apresentaram alguns valores de erro, mas que para o sistema, os mesmos estão dentro do esperado.

Com base nos resultados obtidos, o protótipo se mostrou adequado para realizar as medidas em ângulo e profundidade. Os resultados mostraram equilíbrio quando comparados ao inclinômetro digital usado como referência. Foi possível comprovar que os cálculos matemáticos realizados no firmware, fazem com que os valores obtidos praticamente não sejam influenciados pela ação da aceleração, além de mostrar através dos ensaios que os valores dos eixos X e Y não possuem cruzamento, ou seja, os valores medidos de X não influenciam os de Y. Por fim, ressalta-se que a resultados que ainda podem ser melhorados, através de refinamento dos cálculos, afim de sanar os erros obtidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO Brasileiro de Desastres Naturais, Brasília, 2014.

BRESSANI, L. A. Instrumentação em obras geotécnicas – taludes e escavações, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobrae/2009-bressani.pdf>>. Acesso em: 12 Setembro 2018, 15:00:52.

CAMARINHA, P. I. M. **Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenários de mudanças climáticas na porção paulista da serra do mar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., v. 2, 1973.

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

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres: desastres naturais**. Ministério da Integração Nacional. Brasília. 2013.

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

EISENBERGER, C. N. **Estudo do comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul - RS**, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3555>>. Acesso em: 09 Outubro 2018, 09:27:35.

GEOKON. **Inclinometer Systems 6000 séries**, 2018. Disponível em: <http://www.geokon.com/content/datasheets/GK-604D_Digital_Inclinometer_System.pdf >. Acesso em: 15 Outubro 2018, 17:22:00.

HALLIDAY, D. **Fundamentos da Física**. 10ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2016.

KRELLING, P. C. L. **CONCEPÇÃO DE UM INCLINÔMETRO FOTO-MECÂNICO PARA CONTROLE GEODÉSICO DE ESTRUTURAS**, Curitiba, 2006. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/7361/TESE%20COMPLETA%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 09 Outubro 2018, 14:30:23.

MENEZES, D. M. J. **Taludes de Rodovias: Orientação para Diagnósticos e Solução de Problemas**. IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica. São Paulo. 2003.

OLIVEIRA, D. G. G. D. ; LEÃO, M.; BRANDT, JOSE R. T. **INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS**, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/303365576_INSTRUMENTACAO_GEOTECNICA_EM_OBRAS_SUBTERRANEAS>. Acesso em: 08 Outubro 2018, 10:13:42.

PENZ, R. S. **Desenvolvimento de um Inclinômetro com Tecnologia MEMS aplicado ao Monitoramento de Obras Geotécnicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2013.

PERRETO, E. C. D. ; COSTA, T. **Inclinômetro Digital de Talude**, 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: 06 Outubro 2018, 01:30:49.

PINHEIRO, R. J. B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/118558>>. Acesso em: 09 Outubro 2018, 09:00:30.

RST Instruments. **Digital Mems Inclinometer System**, 2018. Disponível em: <<https://www.rstinstruments.com/es/Brochures-Spanish/Sistema-inclinométrico-SMEM-digital-ICB0055C.pdf>>. Acesso em: 18 Outubro 2018, 15:35:22.

SILVA, D. C. M. D. **Plano inclinado**, 2018. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/plano-inclinado.htm>>. Acesso em: 22 Outubro 2018, 09:24:00.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS1115**, 2018. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/ADS1115>>. Acesso em: 24 Outubro 2018, 08:00:00.

TODA Matéria, 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/desastres-naturais/>>. Acesso em: 04 Outubro 2018, 09:30:15.

VARGAS, M. T. **Desenvolvimento de um ddata logger aplicado ao monitoramento de encostas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2016.

ANEXO 1 – Datasheet sensor de inclinação SCA100TD02