



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE ACADÊMICA  
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

**Gilmar Gonçalves de Brito**

**MODELO DE MONITORAMENTO DE DESLIZAMENTO DE  
ENCOSTAS POR MEIO DE SENSOR MULTIPARAMÉTRICO**

**RECIFE  
2013**

**GILMAR GONÇALVES DE BRITO**

**MODELO DE MONITORAMENTO DE DESLIZAMENTO DE  
ENCOSTAS POR MEIO DE SENSOR MULTIPARAMÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Modelo de Monitoramento de Deslizamento de Encostas por meio de Sensores.

Orientador: Prof. Dr Sérgio Murilo Maciel Fernandes

Co-orientador: Prof. Dr. Meuse Nogueira Oliveira Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Brandão do Nascimento

**RECIFE  
2013**

Modelo de Monitoramento de Deslizamento de Encostas por Meio de Sensores. Brito, Gilmar Gonçalves. Recife, 2012.

Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. 2012.

1. Deslizamento de encostas, 2. Monitoramento de encostas.

Esta página deve ser reservada à ata de defesa e termo de aprovação que serão fornecidos pela secretaria após a defesa da dissertação e efetuadas as correções solicitadas.

# GILMAR GONÇALVES DE BRITO

## MODELO DE MONITORAMENTO DE DESLIZAMENTO DE ENCOSTAS POR MEIO DE SENSOR MULTIPARAMÉTRICO

Examinadores:

~~Prof. Dr. Sérgio Murilo Maciel Fernandes~~  
Universidade Católica de Pernambuco  
Orientador

~~Prof. Dr. Meuse Nogueira Oliveira Júnior~~  
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Pernambuco  
Co-orientador

~~Prof. Dr. Paulo Sérgio Brandão do Nascimento~~  
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Pernambuco  
Co-orientador

~~Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos~~  
Universidade Católica de Pernambuco  
Avaliador

~~Profa. Dra. Marília Mary da Silva~~  
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Pernambuco  
Avaliadora

Defendida em: 16 de abril de 2013.

Coordenadora: Professora Dra. Alexandra Amorim Salgueiro.

A minha família, professores e amigos, pelo incentivo e valorização deste trabalho; pela compreensão e colaboração

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que me concedeu Humildade, Força, Sabedoria, Perseverança e Paciência para chegar até aqui.

A minha Família: Esposa Mirani, Filhos Lucas Kelvin e Alan Iury, pelo Apoio, Confiança e por Acreditarem em mim.

As instituições que me ajudaram neste projeto, em especial ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - IFPE, na pessoa da Reitora Cláudia Santos Silva.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Estado de Pernambuco - IFPE, Campus Recife na pessoa do Diretor Geral, Professor Valbérico Cardoso, e demais colegas.

A Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, e seu Corpo de Professores e Alunos do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais - DPA, à Professora Alexandra Salgueiro, Coordenadora do Mestrado - DPA, e ao Professor Sérgio Murilo Maciel Fernandes, Meu Orientador.

Aos Meus Coorientadores Professor Meuse Nogueira Oliveira Júnior e Professor Paulo Sérgio Brandão do Nascimento, ambos Professores e Pesquisadores do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Estado de Pernambuco - IFPE.

A Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Departamento de Energia Solar, na pessoa do Professor Francisco Belo e ao Técnico de Laboratório Diógenes Montenegro.

A Companhia Pernambucana de Saneamento Ambiental (COMPESA), pelo fornecimento de equipamentos para realização dos testes.

Aos amigos que contribuíram nas suas diversas áreas de atuação, no desenvolvimento desta Dissertação, Professor Pedro Paulo Marquês, Professora Marília Mary, Analista de Sistemas Carlos Gomes, Analista de Sistemas Jackson

Nunes, Técnico Dionildo da Silva, Professor Antonio Cruz, Mestrando Diogo Lucena, Técnico de Laboratórios Enéias Beserras, Técnico de Laboratório Manoel João, Estagiário Elnatan Lins, Estagiário Rubens Brito, Estagiário Marlon Oliveira, Estagiário Bruno Ribas, Aluno Bruno Rafael, Torneiro Mecânico José Maurílio de Souza (Maninho).

*Se aqui cheguei é porque me apoiei em ombros fortes  
(Issac Newton).*

## SUMÁRIO

1 REVISÃO DE LITERATURA .....	
1.1 Introdução .....	20
1.2 Objetivos do Trabalho de Pesquisa.....	22
1.2.1 Objetivo Geral .....	22
1.2.2 Objetivos Específicos .....	22
1.3 Revisão Teórica Sobre Deslizamento de Solos .....	24
1.3.1 Características dos Deslizamentos de Encostas.....	24
1.4 Exemplos de Modelagens de Solos e Deslizamento.....	30
1.5 Deslizamento de Encostas.....	31
1.5.1 Processo de Ruptura de Solo e Deslocamentos de Massa.....	37
1.5.1.1 Etapa de Pré-Ruptura.....	38
1.5.1.2 Etapa de Ruptura .....	40
1.6 Tecnologias Disponíveis Para O Monitoramento De Encostas .....	42
1.6.1 Características de Sensores .....	48
1.6.2 Escolha de Sensores Individuais para Composição do Sensor Multiparamétrico e Representação Matemática do Sinal de Saída: .....	52
1.6.2.1 Giroscópio .....	60
1.6.2.2 Sensor de Umidade.....	61
1.6.2.3 Sensor Piezoelétrico.....	61
1.6.2.4 Rede de Sensores.....	63
REFERÊNCIAS.....	66
2 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR MULTIPARAMÉTRICO .....	71
2.1 INTRODUÇÃO .....	73
2.2 Modelo de Simulação de Chuva.....	73
2.3 Modelo de Monitoramento.....	74
2.4 Metodologia e Caracterização dos Sensores .....	75
2.4.1 Sensor de Umidade do Modelo Proposto.....	75
2.4.2 Sensor Strain Gage .....	78
2.4.3 Sensor de som .....	81

2.4.4 Sensor acelerômetro .....	84
2.5 Redes de Sensores .....	87
Figura 30 - Modelo de rede implementado. ....	87
2.5.1 Sensor de Ponto de Acesso .....	88
2.5.2 Central de Monitoramento .....	88
2.5.3 Sensor de Encosta .....	89
2.6 Preparação do Ambiente Experimental.....	90
2.6.1 Construção do sensor multiparamétrico .....	90
2.6.2 Construção da rede Ponto a ponto ( <i>peer-to-peer</i> ).....	91
2.6.3 Caracterização do sensor multiparamétrico .....	92
2.7 Resultados dos Experimentos com Deslocamento de Solo em Ambiente de Simulação.....	93
2.8 Conclusão .....	
2.8.1 Contribuições à área de pesquisa .....	98
2.8.2 Trabalhos Futuros .....	98
REFERÊNCIAS .....	100
3 DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR DE CHUVA .....	101
3.1 Introdução .....	103
3.2.1 Objetivo Geral .....	103
3.2.2 Objetivo específico .....	103
3.3 Revisão Bibliográfica .....	103
3.4 Características do Simulador de Chuva .....	106
3.4.1 Material.....	106
3.4.1.1 Hidrômetro.....	106
3.4.1.2 Solenoides.....	107
3.4.1.3 Aspensor .....	107
3.4.1.4 Arduino .....	108
3.4.1.5 Motor elétrico DC.....	109
3.4.1.6 Motor elétrico AC.....	109
3.4.1.7 Estrutura do simulador .....	110
3.4.1.8 Reservatório de água .....	110
3.4.1.9 Manômetro .....	111
3.4.1.10 Tubulações.....	111

3.5 Método .....	111
3.5.1 Medição da Uniformidade da Chuva Simulada .....	111
3.5.2 Determinação do diâmetro das gotas.....	113
3.5.3 Determinação do volume das gotas .....	114
3.5.4 Altura da queda .....	115
3.5.5 Velocidade terminal e tempo da queda das gotas.....	115
3.5.6 Energia cinética da chuva no simulador .....	118
3.5.7 Calculo da intensidade de chuva.....	119
3.5.8 Energia cinética segundo Wischmeier & Smith (1958).....	119
3.5.9 Calibração dos aspersores.....	122
3.5.10 Acionamento das eletroválvulas.....	122
3.5.11 Lógica de acionamento .....	122
3.6 Conclusão .....	125
REFERÊNCIAS.....	126
4 DISPOSITIVO SENSOR DE MONITORAMENTO DE INSTABILIDADE DE SOLOS E ESTRUTURAS POR MEIO DE SENSORES MULTIPARAMÉTRICOS COM REDUNDÂNCIA MODULAR.....	128
Anexo 'A' .....	142

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ensaio de Granulometria do Solo Vermelho Amarelo Podzolico. ....	29
Figura.2 - Ensaio de Granulometria Vermelho Amarelo Latosolo. ....	29
Figura 3 - Modelo de Horizontes de Perfil do Solo. ....	30
Figura 4 - Equação 1.1, Modelo matemático para deslizamento de encostas. ....	31
Figura 5 - Deslizamento de terra destruindo estrada. ....	32
Figura 6 - Deslizamento de encosta na região de Nova Friburgo-RJ em 13 de janeiro de 2011.....	32
Figura 7 - Uma ilustração simples de um deslizamento rotacional que evoluiu para um fluxo solo .....	33
Figura 8 - Modelo hidromecânico de comportamento do solo nas encostas carregadas .....	35
Figura 9 - Deformação desviada e Compressão da base do Talude. ....	36
Figura 10 - Ideia do Processo de escoamento das águas do solo .....	36
Figura 11 - Etapas dos movimentos de massa. ....	38
Figura 12 - Área fraca, área cisalhada e superfície de cisalhamento.....	40
Figura 13 - Representa a faixa de evolução da era dos sensores. ....	43
Figura 14 - Modelo de Sensor baseado na ideia de transdutância: a transformação de um dado tipo de energia em um sinal (energia) elétrica.....	44
Figura 15 - Sistema de Previsão de Deslizamento baseado em detecção de vibrações de solo.....	47
Figura 16 - Representação do Grafo GMPS(t) onde cada nó é representado por um nó sensor mutiparamétrico. Observe que o grafo é completo, mas apenas algumas arestas são representadas para evitar o congestionamento da figura. ....	55
Figura 17 - Modelo de estensômetro ou strain gage. ....	57
Figura 18 - Modelo de ponte de Wheatstone. ....	58
Figura 19 - Representação da estrutura interna do acelerometro. ....	59
Figura 20 - Mecânica dos cristais que originam a formação de bipolo.....	62
Figura 21 - Sequência de eventos naturais em que a natureza emite frequencia infrasônica. ....	63
Figura 22 - Modelo de rede para implementação em campo – trabalhos futuros.....	65

Figura 23 - Simulador de Chuva Desenvolvido. ....	74
Figura 24 - balança de precisão, fonte ajustável de 0 a 30V, multímetro e cuba de porcelana.....	76
Figura 25 - sendo a primeira com umidade a 0%, e a segunda 100%. ....	77
Figura 26 - Sequência de medição de tensão como respostas ao percentual de umidade do solo. ....	77
Figura 27 - Interação com os equipamentos no Processo de análise do solo. ....	81
Figura 28 - Espectro de frequência sonora. ....	81
Figura 29 - Detalhe da altura em que os pesos foram deixados cair. ....	83
Figura 30 - Modelo de rede implementado.....	87
Figura 31 - Tela do PC registrando os dados do software PLX-DAQ.....	89
Figura 32 - Sensor de encosta encravado em uma amostra e o detalhe da fixação do strain gage. ....	90
Figura 33 - Sensor Multiparamétrico .....	91
Figura 34 - Na primeira figura o transceptor recebendo sinais dos sensores e enviando para o transceptor.....	92
Figura 35 - Primeiro experimento: a) Tempo 0 b) Após 2 horas e c) Após 4 horas. ....	93
Figura 36 - Segundo experimento: a) Tempo 0 b) Após 2 horas e c) Após 4 horas. ....	94
Figura 37 - Terceiro experimento: a) Tempo 0 b) Após 2 horas e c) Após 4 horas. ....	96
Figura 38 - Simulador de chuva .....	106
Figura 39 - Hidrômetro .....	107
Figura 40 - Conjunto de eletroválvulas.....	107
Figura 41 - Conjunto de aspersores do modelo SX-180. ....	108
Figura 42 - Arduino duemilanove e seus pinos. ....	109
Figura 43 - Demonstra o reservatório de água, filtro, motor elétrico e a direção do fluxo da água.....	110
Figura 44 - Manômetro.....	111
Figura 45 - Copos em base de madeira para determinar a lamina de água e determinar o CUC.....	112

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados da relação da energia cinética com a pluviometria. ....	120
Quadro 2 - Diâmetro das gotas / número de gotas. ....	121
Quadro 3 - Relação diâmetro gotas x Energia cinética (MJ há <sup>-1</sup> ). ....	121
Quadro 4 - Exemplo de classificação da chuva segundo Horner & Jens. ....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos Movimentos de Massa (VARNES, 1978, <i>apud</i> CRUDEN; VARNES, 1996). .....	25
Tabela 2 - Tipos de Movimentos de Massa Segundo Varnes (1978), a partir de Cruden e Varnes, (1996). .....	25
Tabela 3 - Resultado de ensaio de caracterização do solo. ....	28
Tabela 4 - Strain Gage com Relação ao Peso Deixado Cair a 25cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida. ....	79
Tabela 5 - Strain Gage com Relação ao Peso Deixado Cair a 50cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida .....	80
Tabela 6 - Sensor de Som com Relação ao Peso Deixado Cair a 25cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida.....	82
Tabela 7 - Sensor de Som com Relações do Peso Deixado Cair a 50cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida.....	83
Tabela 8 - Valores da Distribuição das Gotas de Água no Solo.....	112
Tabela 9 - Característica do diâmetro da gota (mm) em função da chuva simulada de: .....	114
Tabela 10 - Volume das gotas de chuvas (mm <sup>3</sup> ) em função das pluviometrias. ....	115
Tabela 11 - Coeficiente de atrito ( $\mu$ ) da gota com a água em função da pluviometria. ....	116
Tabela 12 - Relação do diâmetro (mm) com Tempo de queda das gotas de chuvas (seg). ....	117
Tabela 13 - Velocidade de impacto das gotas de chuva simulada (ms <sup>-1</sup> ). ....	117
Tabela 14 - Energia cinética das gotas de chuva simulada ao cair no solo em Joule.....	118

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Representa os resultados do Strain Gage, com peso caindo a 25cm de altura na amostra. ....	79
Gráfico 2 - Representa os resultados do Strain Gage, com peso caindo a 50cm de altura na amostra. ....	80
Gráfico 3 - Sensor de Som com Relação ao Peso Deixado Cair a 25cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida. ....	82
Gráfico 4 - Sensor de Som com Relação ao Peso Deixado Cair a 50cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida ....	83
Gráfico 5 - Resposta do acelerômetro aos impacto de um peso de 10g deixados cair a uma altura de 25cm.....	84
Gráfico 6 - Resposta do acelerômetro aos impacto de um peso de 20g deixados cair a uma altura de 25cm.....	85
Gráfico 7 - Resposta do acelerômetro aos impacto de um peso de 30g deixados cair a uma altura de 25cm.....	85
Gráfico 8 - Série de resultados com pesos de 40g batendo no lado direito da amostra. ....	86
Gráfico 9 - Representação dos sinais do sensor multiparamétrico num processo de deslizamento de encostas. ....	87
Gráfico 10 - Representação dos sinais do sensor multiparamétrico num processo de deslizamento de encostas. ....	93
Gráfico 11 - Sinais da amostra do solo compactado. ....	94
Gráfico 12 - Demonstrando as variações antes, durante e depois do desabamento da amostra 02.....	95
Gráfico 13 - Demonstrando o pico da variação após um evento.....	96
Gráfico 14 - Resultado do 3º experimento.....	97
Gráfico 15 - Registro da uniformidade da Distribuição das gotas do simulador. ....	113
Gráfico 16 - Relação diâmetro das gotas em função da pluviometria. ....	114
Gráfico 17 - Volume das gotas de chuvas (mm <sup>3</sup> ) em função das pluviometrias. ....	115
Gráfico 18 – Relação diâmetro (mm) com Tempo de queda das gotas de chuvas (seg).....	117

Gráfico 19 - Velocidade de impacto das gotas de chuva simulada (ms-1).....	118
Gráfico 20 - Energia cinética das gotas de chuva simulada ao ciar no solo em Joule.....	119
Gráfico 21 - Relação do crescimento da energia cinética com a pluviometria. ....	120
Gráfico 22 - Relação diâmetro gotas x Energia cinética (MJ há-1). ....	122

## RESUMO

Fenômenos de deslizamentos de encostas ocorrem em todo o mundo em diversas condições climáticas e de terrenos, custando bilhões de dólares e produzindo milhares de mortes, agravando problemas ambientais, econômicos e políticos. Um problema sério que se associa à questão dos deslizamentos de encostas é o crescimento populacional e a ocupação desordenada das encostas, caracterizando os deslizamentos como uma questão geopolítica e econômica. Ações para mitigar os problemas decorrentes desses fenômenos de deslizamentos incluem o Monitoramento Ambiental das áreas de maior susceptibilidade e o Manejo da População, quando submetidas a elevado risco de deslizamento. Os processos de monitoração consistem na coleta de um conjunto de sinais e parâmetros, provenientes do solo das encostas, que possam ser usados para o reconhecimento das dinâmicas dos solos. Combinando os sinais provenientes do solo e parâmetros que reflitam os fatores climáticos e antrópicos, causadores de desestabilizações e deslizamentos, torna-se possível utilizar estes dados combinados em modelos de avaliação de risco para realizar a Predição de Deslizamentos. No Contexto Brasileiro, existe uma forte relação entre chuvas intensas e deslizamentos de encostas, devido aos fenômenos de escoamento de águas infiltradas no solo e na erosão decorrente, sendo, portanto, o monitoramento preditivo das primeiras camadas do solo um importante recurso para a detecção das áreas de eminente risco de deslizamento. Diversas abordagens para a monitoração dos solos foram apresentadas internacionalmente, sendo estas abordagens baseadas em diversas tecnologias, como exemplos podem ser citadas as técnicas de ondas acústicas no solo, detectores de umidade relativa e pluviometria seletiva. Essas abordagens podem tirar proveito do recente paradigma de Redes Sensores, baseados em dispositivos computacionais móveis de baixo consumo, movidos a baterias, que podem formar redes de trocas de dados baseadas em redes sem fio, permitindo a conexão de diversos sensores de solo, espalhados ao longo das encostas, formando um sistema de coleta destes dados de sensores em tempo real para posterior processamento e avaliação de riscos. Frente ao exposto, este trabalho propõe um sistema de monitoramento baseado em rede sensores, capaz de estimar o risco eminente de deslizamento. O sistema proposto considerou quatro dimensões do problema de desenvolvimento e prototipação do sistema de monitoramento: (1) Proposição de um Ambiente de Simulação Física, a partir da criação de um ambiente de testes em laboratório utilizando escala reduzida; (2) Reconhecimento tecnológico e refinamento de propostas de sistemas pré-existentes, que tenham a mesma finalidade, já descritos na literatura, sejam eles projetos acadêmicos ou sistemas já comercialmente disponíveis; (3) Desenvolvimento de um Sensor Inteligente Multiparamétrico; (5) desenvolvimento de uma Rede de Monitoramento para coleta de dados vindos da encosta e processamento local. Este trabalho apresenta, como contribuição técnico-científica principal, um ambiente de simulação e monitoração, sendo este ambiente relevante para estudos das dinâmicas dos deslizamentos, bem como para a prototipação de redes de monitoração para aplicações em ambientes reais, para geração de informação sobre os riscos de deslizamento, úteis para as atividades de contingenciamento dos defeitos de deslizamento por parte da Defesa Civil.

**Palavras chave:** Deslizamento, Encostas, Monitoramento, Modelagem de Risco, Rede Sensores.

## ABSTRACT

Landslides occur around the world, in various conditions of weather and terrain, costing billions of dollars, causing thousands of deaths and worsening environmental, economic and political problems. A serious question associated with landslides is the disordered of human occupation - characterizing a geopolitical and economic issue. Actions to mitigate the problems arising from this phenomenon include environmental monitoring of the areas of greatest susceptibility for managing the higher risk population. The monitoring processes consist of recognizing soil dynamics and climatic factors, responsible for causing destabilization and landslides. In the Brazilian context, there is a strong relationship between heavy rains and landslides, since the phenomenon of runoff water infiltrated the soil and produces erosion. Therefore, a predictive monitoring of the first soil layers is an important feature for detecting areas of imminent risk of slippage. Several approaches for monitoring were presented internationally, they are based on different technologies, such as acoustic waves in the soil; detectors of relative humidity and rainfall selective analysis. All these approaches are anchored in the paradigm of remote sensing and smartsensor networks. Based on that, this paper proposes a model to estimate the imminence of of landslides risk. The proposed model is built on four pillars: (i) proposing a physics simulation environment, from the creation of a laboratory scale test environments, (ii) recognizing the technology and refinement of pre-existing models, (iv) developing of multiparametric smart sensor and (v) developing of a peer-to-peer network of sensors. This study aggregates to the scientific and technical contribution a framework for monitoring, useful for studying of landslides dynamics. Such framework is crucial for prototyping monitoring networks to be used by civil defense.

Key words: Slip, slopes, monitoring, modeling, logical network.

## **1 REVISÃO DE LITERATURA**

## 1.1 Introdução

Muitas cidades brasileiras sofrem com a ocorrência do fenômeno de deslizamento de encostas, durante o período de chuvas. Em alguns casos. Estes deslizamentos são induzidos por causa da realização de cortes irregulares nas encostas, feitos para a implementação de moradias irregulares (AMARAL, 1996). Os deslizamentos, assim como os processos de intemperismo e erosão, são fenômenos naturais que transformam constantemente a paisagem da superfície terrestre, aliada aos efeitos produzidos pela ação antropomórfica do homem. Para Rosa Filho *et. al* (2010), os eventos associados a deslizamento no Brasil vêm aumentando e se caracterizam por produzir graves acidentes geológicos. Eles ocorrem em muitos municípios, destacadamente em áreas urbanas, provocando danos materiais e perdas, inclusive de vidas humanas.

No caso da cidade do Recife, a formação geológica foi fruto de dois processos. O primeiro processo geológico corresponde à formação da planície costeira e o segundo processo geológico corresponde a formação dos morros que esta associado a formação de sedimentos terciário da formação barreira, com idade em torno da 2 milhões de anos (ALHEIROS *et al*, 1995). No início da década de 80, a Zona Norte do Recife, formada por vários morros, foi atingida por uma sucessão de escorregamentos que causaram milhares de desabrigados e mais de 50 vítimas fatais, em decorrência da ocupação desordenada das suas encostas pela população de baixa renda, sob a forma de invasões (GUSMÃO FILHO *et al.*, 1996). Devido à insegurança que atinge as populações que moram nessas áreas, se faz necessária a geração de previsões de ocorrência de deslizamento, com o intuito de prevenir a ocorrência de acidentes que atinjam estas populações.

Nos últimos anos estão sendo realizados importantes estudos baseados na literatura geomorfológica e geotécnica, nacional e internacional. As previsões de eventos de deslizamento de encostas, com base em modelos matemáticos de predição, alimentados diretamente com informações sobre os fatores condicionantes envolvidos nestes fenômenos, pode ser um grande aliado para que possam ser evitadas as ocorrências catastróficas de deslizamentos de terra, tanto no que diz respeito aos prejuízos materiais e ambientais, como no que diz respeito às possíveis perdas de vida humanas.

O Sistema de Monitoramento deve combinar informações capturadas das encostas e veiculadas através de uma rede de sensores, conectados via wireless, formando um sistema computacional distribuído para a previsão de riscos de deslizamento. Este trabalho de dissertação propõe um sistema de monitoramento, baseado na instalação na encosta de um conjunto de sensores multiparamétricos, capazes de produzir informações úteis a respeito do comportamento dinâmico das encostas, fornecendo previsões de riscos de deslizamento nos momentos antes da sua ocorrência, sendo escolhido como ambiente natural para a realização dos experimentos de monitoração a Cidade do Recife no Bairro da Guabiraba, na Zona Norte da Cidade, ao lado da BR 101.

O uso da Tecnologia de Rede Sensores, apesar de ser um fato recente, já é uma prática usada em várias partes do mundo, podendo ser utilizada como fonte de informação para prever determinados fenômenos, inclusive no processo de movimentos de massas de terra (deslizamento). A Tecnologia de Rede de Comunicação e Sistemas Embarcados, utilizando componentes de hardware e software, permite a integração de dados provenientes dos sensores, distribuídos ao longo da encosta, que serão enviados a uma Estação de Monitoramento, concebida como um sistema capaz de gerar dados históricos acumulados a respeito do comportamento dinâmico das encostas, sendo estas informações úteis para a geração de avaliações estatísticas de risco. Para permitir a avaliação de risco, faz-se necessário analisar aspectos referentes à estabilidade das encostas, por meio de modelos matemáticos como, por exemplo, o Modelo Shaltab Ramos *et al.* (2002) que permite avaliar as incertezas inerentes ao Sistema de Previsão de Eventos de Deslizamento e associadas aos parâmetros relevantes para a dinâmica do solo, a depender do caso em questão.

Esta dissertação está organizada do seguinte modo: seu primeiro capítulo dos itens a seguir: i) revisão bibliográfica dos movimentos de massa (deslizamento) e caracterização dos solos da região; ii) conceitos de modelagem; iii) processo de ruptura dos deslocamento de massa e suas fases; iv) tecnologias relacionadas aos deslocamento de massa; v) conceitos e características de sensores; vi) Simuladores de chuvas; vii) caracterização e características das chuvas; viii) utilização dos sensores na prevenção dos deslizamentos; ix) características das ondas sonoras; x) rede lógica .

Como parte da construção do modelo experimental, no segundo capítulo será procedido ao desenvolvimento de um simulador de chuva, que será utilizado para execução das análises de deslocamento de solo, por meio da geração de simulação de chuva no laboratório, Para tal foi executado as etapas como: i) caracterização do simulador de chuvas; ii) materiais e método; iii) resultados.

No terceiro capítulo serão tratados os itens: i) construção do equipamento para o monitoramento das encostas por meio de múltiplos sensores (sensor multiparamétrico); ii) caracterização dos sensores empregados no sensor multiparamétrico; iii) resultados encontrados; iv) conclusão.

O quarto capítulo apresentado nesta dissertação é o registro da patente do sensor miltiparamétrico como conclusão dos resultados.

## **1.2 Objetivos do Trabalho de Pesquisa**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O Objetivo Geral deste Trabalho de Pesquisa é o desenvolvimento de uma Proposta de Sistema de Monitoramento, baseado em tecnologia de sensores, dispositivos embarcados e rede sensores, capaz de gerar informações (sinais) provenientes dos fenômenos geodinâmicos que acontecem na encosta, gerando dados uteis para a análise e previsão de eventos de deslizamento de encostas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

No Âmbito deste Projeto de Pesquisa foram estabelecidos os seguintes Objetivos Específicos:

- 1) Realizar a revisão bibliográfica sobre os modelos das encostas e as relações existentes entre os fatores climáticos e as dinâmicas de desestabilização dos solos, disponíveis na literatura a ser levantada.
- 2) Estudar as características dos diversos tipos de sensores existentes, capazes de detectar sinais relevantes oriundos dos processos de deslizamento de encostas e definir um conjunto mínimo de sensores e sistemas de comunicação, utilizando componentes de hardware e software, para o monitoramento de encostas e avaliação de riscos e previsão de deslizamento;

- 3) Construir um ambiente experimental, por meio de um simulador de chuvas e de uma réplica do morro em escala reduzida, composta por amostras de solo real, removidas das regiões reais de risco, na forma de talude, que permita a geração de resultados experimentais, com a colocação do conjunto mínimo de sensores na réplica do morro, para realização de testes e ensaios experimentais, no sistema de simulação resultante em escala reduzida. O sistema resultante deve permitir, por meio de simulação/emulação do ambiente real, a construção e validação do sistema proposto, prevendo-se a geração de protótipos virtuais, utilizando simulações computacionais baseadas em modelos matemáticos dos processos de deslizamento e simulação estatística, como o modelo Monte Carlo;
- 4) Gerar um Modelo de Implementação de Sistema que incorpore o conjunto mínimo de sensores necessários para o monitoramento, determinando os requisitos funcionais e não funcionais para estes sensores, a partir das características dos fenômenos de deslizamento que serão monitorados.
- 5) Gerar resultados experimentais com o objetivo de produzir um conjunto de dados históricos, dos sinais vindos dos sensores, que permita validar o sistema de monitoramento proposto, associando estes sinais aos eventos geomorfológicos e geodinâmicos que ocorrem na encosta, permitindo a caracterização destes sensores com relação a sua capacidade de representar, através dos seus sinais de resposta, os eventos que antecedem os deslizamentos de solo. Os resultados experimentais deverão ser utilizados para a geração de conhecimentos sobre as características de resposta para o sistema proposto, permitindo a classificação de padrões de sinais para a construção de um sistema automático de reconhecimento de padrões, baseado em técnicas de inteligência artificial, para a detecção em tempo real dos eventos internos do solo associados à dinâmica de deslizamento;
- 6) Documentar os resultados obtidos, por meio da geração de relatórios técnicos, publicações científicas e por meio da construção e publicação da dissertação associada a este trabalho de pesquisa.

Esta dissertação documenta a contribuição alcançada com o cumprimento do Objetivo Geral, bem como detalha os resultados específicos da pesquisa, que tentam cumprir os resultados traçados nos objetivos específicos.

### **1.3 Revisão Teórica Sobre Deslizamento de Solos**

#### **1.3.1 Características dos Deslizamentos de Encostas**

Os deslizamentos de encostas ocorrem, basicamente, quando as forças de tração produzidas pela atuação hidrológica e pela gravidade, sob o efeito da declividade do terreno, superam as forças de resistências do solo, principalmente as forças de atrito. A principal força de tração que causa movimentos de massas é a força de cisalhamento, quando esta força supera o atrito, ocorre o movimento descida do solo (MONTGOMERY, 1992). Em termos genéricos, os deslizamentos de terra são fenômenos naturais caracterizados por movimentos de descida de solo, rochas e materiais orgânicos, em função dos efeitos da gravidade e da composição e formação geológica destes materiais, (SILVA, 2007).

Esses deslizamentos podem ser classificados em diferentes categorias, em função das falhas relacionadas em taludes e das características e das propriedades geológicas destas falhas. Bandeira (2003) constata que a classificação de movimentos de massa proposta por Varnes (1978) ainda é uma das mais utilizadas em todo mundo, sendo considerada a classificação oficial da *International Association of Engineering Geology – IAEG*.

A classificação proposta por Bandeira (2003) é simples e baseia-se no tipo de movimento e no tipo de material transportado pelas encostas. Os materiais são classificados como rocha (*rock*), solos (*earth*) e detritos (*debris*), enquanto os movimentos são classificados em quedas (*falls*), tombamentos (*topples*), escorregamentos (*slides*), espalhamentos (*spreads*), corridas/escoamentos (*flows*). Segundo Cruden e Varnes (1996), as corridas/escoamentos são subdivididas de acordo com a velocidade e o conteúdo de água dos materiais mobilizados. A tabela 1 apresenta os tipos e as classificações dos movimentos proposta por Varnes (1978).

Tabela 1 - Classificação dos Movimentos de Massa (VARNES, 1978, *apud* CRUDEN; VARNES, 1996).

TIPO DE MOVIMENTO:	TIPO DE MATERIAL:		
	ROCHA:	SOLO:	
		Predominante Grosso:	Predominante Fino:
Queda	Queda de rocha ( <i>FALL</i> )	Queda de detritos (debris)	Queda de solo
Tombamento ( <i>Topple</i> )	Tombamento de Rocha	Tombamento de detritos (debris)	Tombamento de solo
Escorregamento ( <i>Slide</i> )	Escorregamento em rocha	Escorregamento de detritos (debris)	Escorregamento de Solo
Espalhamento ( <i>Spread</i> )	Espalhamento de Rocha	Espalhamento de detritos (debris)	Espalhamento de solo
Corrida/Escoamento ( <i>Flow</i> )	Corrida de rocha	Corrida de detritos (debris)	Corrida de lama

Fonte: (SILVA, 2007).

Na tabela 2 são mostradas as características dos principais tipos de movimentos de massa.

Tabela 2 - Tipos de Movimentos de Massa Segundo Varnes (1978), a partir de Cruden e Varnes, (1996).

TIPO DE MOVIMENTO:	CARACTERÍSTICA DO MOVIMENTO:
Quedas ( <i>falls</i> )	Os materiais, rocha ou solo, se desprendem das encostas pela ação da gravidade. O movimento é do tipo queda livre ou de rolamento, com velocidade muito rápida (m/s) que pode atingir grande distância. Nas encostas íngremes o movimento geralmente é em queda livre e nas encostas com declividade 1:1 o movimento é de rolamento de matacões.
Tombamentos ( <i>topples</i> )	O movimento se dá a partir da rotação de um bloco da encosta em torno de um eixo. Este movimento está condicionado a existência de planos de fraqueza.
Escorregamentos ( <i>slides</i> )	É o movimento que ocorre geralmente através de uma superfície de ruptura. Os primeiros sinais podem ser observados através de fissuras na superfície do solo. Eles são divididos em rotacionais e translacionais.
Espalhamento ( <i>spread</i> )	Ocorre em materiais mais rígidos sobrejacentes a camadas menos resistente, formando fissuras e fraturas transversais à direção do movimento. O movimento é repentino e se dá pela perda de resistência da camada subjacente, devido a ação da água, como o efeito da liquefação das areias; e pode também ocorrer devido o escoamento plástico como nas argilas sensíveis. O material sobrejacente pode sofrer movimentos de subsidência, translação, rotação, desintegração ou escoamento.
Corridas/escoamento ( <i>flows</i> )	São formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico, provocado pela perda de resistência do material, devido o excesso de água. A massa se desloca semelhante a um líquido viscoso.

Fonte: (SILVA, 2007).

Apesar de ocorrer vários tipos de movimentos de massa este trabalho de pesquisa se deterá nos escorregamentos de solo que são tipicamente chamados, na Cidade do Recife, de deslizamentos, fenômenos bastante frequentes em período de chuvas intensas nesta cidade.

Deslizamentos de encostas ocorrem por todo o planeta, sob condições adversas de solos e climas, nos quais um número considerável de vidas é perdido todos os anos. Paralelamente, os custos monetários podem atingir cifras elevadas, trazendo problemas econômicos e sociais imediatos. Os deslizamentos de terra afetam de forma significativa as populações e o meio ambiente. A história recente do Brasil vem registrando vários deslizamentos de encostas. Exemplos destes deslizamentos são os episódios registrados em Santa Catarina em 2008, Angra dos Reis e Morro do Bumba em 2010, e em Teresópolis e Petrópolis em 2011 e 2012. Tais eventos demonstram que muitas medidas ainda precisam ser tomadas para instrumentalizar a gestão pública, tornando-a capaz de realizar as medidas de contingenciamento adequadas para a minimização dos problemas causados pelos deslizamentos, de forma que a gestão pública aumente o seu nível de conhecimento, compreensão dos processos desencadeadores dos eventos de deslizamentos de encostas e possa responder com a velocidade necessária na prevenção e mitigação dos eventos e seus danos, minimizando os problemas gerados para a população e para o meio ambiente.

Os mecanismos desencadeadores dos fenômenos de deslizamento são as adversidades climáticas, as atividades humanas (antrópicas) que correspondem a ações relativas a presença do homem e suas intervenções no ambiente, tais como abertura de estradas, escavações para construção de residências, sem as devidas orientações dos órgãos fiscalizadores. Em adição, eventos naturais como terremotos e outros tipos de vibrações de altas intensidades podem contribuir de forma significativa para a ocorrência dos fenômenos de deslizamento Cunha Filho (2012).

Segundo Lima (2002) as chuvas atuam como principal agente físico na deflagração de escorregamentos no Brasil. Os grandes acidentes registrados, relacionados a esses processos, ocorreram durante períodos chuvosos, cujas características variam de região para região. A água da chuva, infiltrada no solo, aumenta os valores do peso próprio do solo e da pressão da água reduzindo a resistência do mesmo. A chuva é um dos fatores responsáveis pelas variações dos

níveis dos lençóis freáticos e é uma das causas, em grande parte, dos deslocamentos de encostas no Brasil. Partindo deste princípio, percebe-se a importância da compreensão dos parâmetros hidrológicos e pluviométricos como fatores condicionantes dos fenômenos de deslizamento. Uma grande parte da literatura, referente à temática da estabilidade das encostas, enfatiza os parâmetros geotécnicos que foca nas características dos solos e parâmetros topográficos referentes à geomorfologia local. Fernandes *et al.* (2001) sustenta a tese de que o monitoramento dos processos hidrológicos representa etapa fundamental, quando se visa à compreensão dos mecanismos capazes de determinar os prováveis momentos de ruptura das encostas, permitindo, em última análise, o desenvolvimento e o efetivo uso de modelos de previsão de deslizamentos de encostas, sendo estes modelos inferidos a partir das séries de dados históricos gerados pelo monitoramento.

Segundo Anderson e Pope (1984) a definição das escalas temporais e espaciais é de grande relevância para os problemas de monitoramento dos sinais provenientes do comportamento dinâmico das encostas. Entretanto, a definição destas escalas, no escopo deste projeto de pesquisa, vai depender das características dos fenômenos de deslizamento observados em campo e nos experimentos de simulação. A Natureza destes fenômenos determina as escalas das componentes de frequência observáveis, dos sinais monitorados, e os intervalos de tempo de observação necessários, para que seja possível a determinação de padrões dos sinais que permitam o reconhecimento dos tipos de fenômenos no solo que podem ser indicativos de possíveis eventos de deslizamento. Da mesma forma, é preciso, a partir da observação experimental dos sinais obtidos no monitoramento, no caso específico dos deslizamentos das encostas, especificar a distribuição espacial dos sensores ao longo das encostas, determinando a quantidade de sensores necessários e o seu espaçamento, de modo a cobrir e monitorar a região efetiva de risco de deslocamento de solo. Algumas questões devem ser consideradas tais como: que processos hidrológicos devem ser mensurados; quais as propriedades dos solos que devem ser caracterizadas; que instrumentos são mais adequados para o monitoramento; que quantidade e distância entre os instrumentos devem ser utilizadas; qual o intervalo de tempo ideal, a ser utilizado entre as amostragens dos sinais dos sensores. Tais questões, embora de

fundamental importância, nem sempre são abordadas com a devida atenção em outros trabalhos disponíveis na literatura.

Para Silva (2007) a formação dos solos é resultante da ação combinada de 3 fatores:

- (1) O clima que condiciona, principalmente, a ação da água da chuva e da temperatura;
- (2) Materiais de formação do solo, condicionados, entre outros fatores, pela circulação interna da água, composição e conteúdo mineral;
- (3) Organismos, vegetais e animais que entre outros fatores interferem no microclima, formando elementos orgânicos e minerais e modificando as características físicas e químicas do solo.

Neste trabalho de Pesquisa considera-se a premissa de que não existe um modelo padrão aplicável na formação do solo das encostas dos morros e nem um modelo que descreva a sua modificação ao longo do tempo, sobre o efeito dos diversos fatores que determinam a sua formação. Deste modo, uma grande quantidade de configurações de solos é possível. Na prática isto exige uma modelagem específica para cada região a ser investigada. No caso específico dessa dissertação foram coletadas amostras do solo podzólico vermelho amarelo argissolo e latossolo amarelo em um corte da BR 101 Norte, no bairro da Guabiraba na Região Metropolitana do Recife. As análises das amostras realizadas no Laboratório de Geotecnia da UNICAP, indicam os resultados que são descritos na Tabela 3 e nos gráficos das figuras 1 e 2.

Tabela 3 - Resultado de ensaio de caracterização do solo.

<b>Amostra:</b>	<b>Pedra (%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>LL* (%)</b>	<b>LP** (%)</b>	<b>IP*** (%)</b>	<b>DENSIDA DE REAL DOS GRÃOS</b>
VERMELHA AMARELA PODZOLICO	2	20	14	64	52	28	24	2,65
VERMELHA AMARELA LATOSSOLO	1	64	6	28	38	17	21	2,63

\* (LL) Limite de Liquidez

\*\* (LP) Limite de Plasticidade

\*\*\* (IP) Índice de Plasticidade

Figura 1 - Ensaio de Granulometria do Solo Vermelho Amarelo Podzólico.

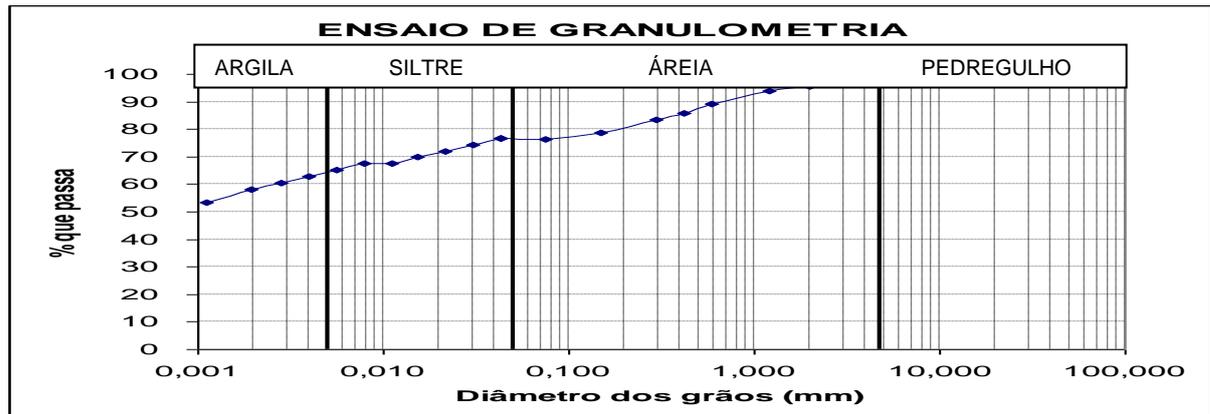
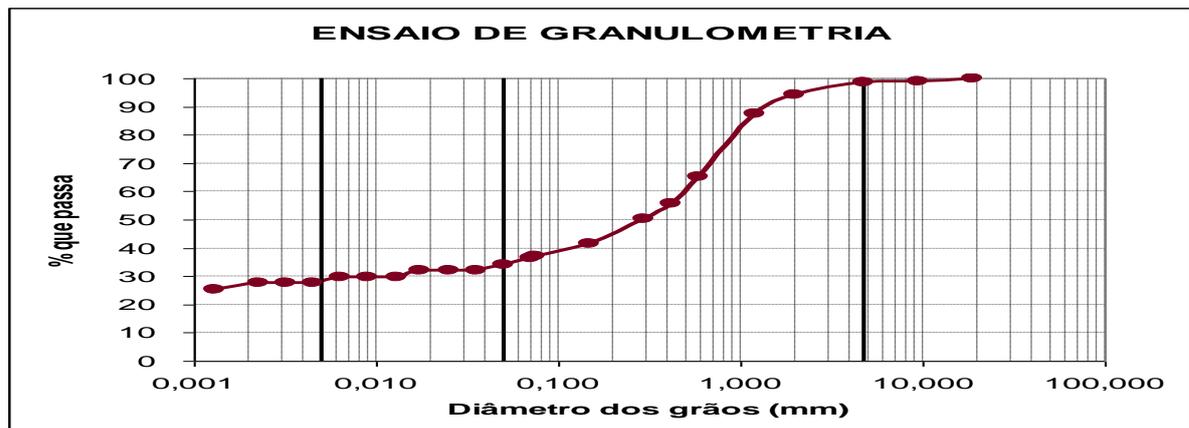
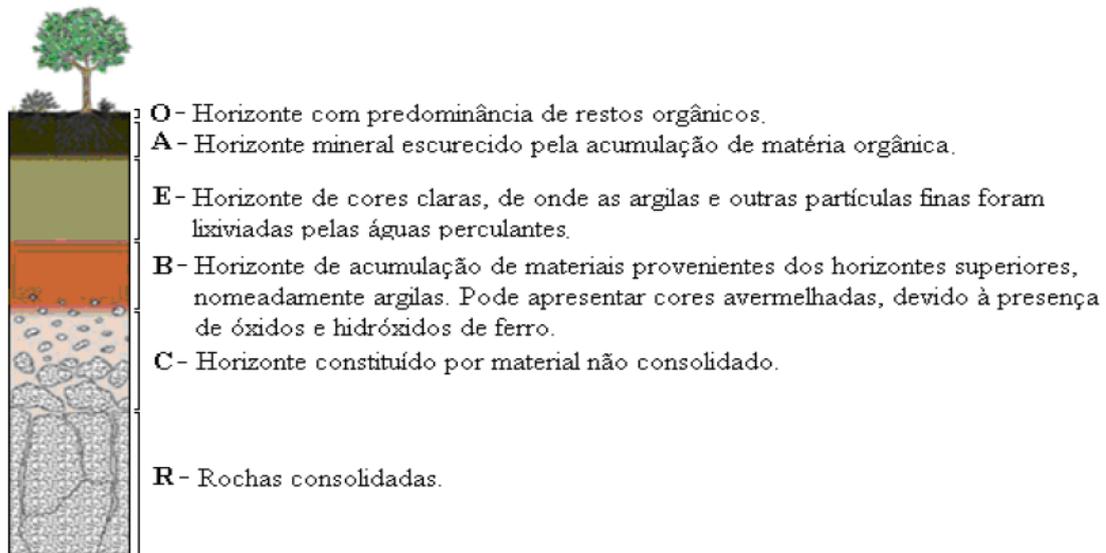


Figura.2 - Ensaio de Granulometria Vermelho Amarelo Latosolo.



Segundo Coelho Netto (2009) os solos são constituídos por milhões de partículas de diferentes composições mineralógicas e diversos tamanhos, entre cascalho, areias, siltes ou argilas, parte destas partículas tem estrutura de grãos simples ou múltiplos grãos agregados por matéria orgânica ou argila. Os espaços vazios entre as partículas de solos são denominados de poros e podem estar parcialmente ou totalmente preenchidos de água. Os solos se encontram organizados em extratos bem definidos, que se estabeleceram ao longo do processo de sua formação, estruturando-se em camadas que podem ser representadas pelo modelo hipotético ilustrado na figura 3.

Figura 3 - Modelo de Horizontes de Perfil do Solo.



Fonte: (LEROUEIL, *et al.* 1996).

A estrutura exata do solo, definida pela presença ou não de cada horizonte, pela estrutura de cada camada e suas espessuras, pela inclinação com relação ao campo gravitacional terrestre e pela composição físico-química, vai depender de cada região específica a ser monitorada.

#### 1.4 Exemplos de Modelagens de Solos e Deslizamento

Apesar da complexidade do problema de modelagem dos solos, existem diversos trabalhos disponibilizados na literatura que oferecem modelos matemáticos capazes de descrever a dinâmica do solo e que podem vir a ser úteis no levantamento das probabilidades de ocorrência de deslizamentos.

Um modelo bem difundido para previsão de deslizamento de solos rasos é o modelo matemático Shalstab (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998). Este modelo combina fatores hidrológicos e um modelo de estabilidade de encostas, cuja função é definir as áreas sujeitas a escorregamento, determinando os locais do relevo mais susceptíveis para a ocorrência de escorregamentos translacionais.

O Modelo Shalstab é um modelo determinístico que resulta na expressão matemática apresentada na Figura, Equação 1.1, que prevê a chuva crítica ( $Q_c$ )

necessária para a ruptura da encosta, resultando no deslizamento do solo (GUIMARÃES, *et al.* 2003).

Figura 4 - Equação 1.1, Modelo matemático para deslizamento de encostas.

$\frac{Q_c}{T} = \frac{\sin \theta}{\left(\frac{a}{b}\right)} \left[ \frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$ <p>(Equação 1.1)</p>	<p><math>Q_c</math> – chuva crítica necessária para a ruptura  <math>T</math> – transmissividade do solo (produto entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura do solo).  <math>a</math> – área de contribuição,  <math>b</math> – comprimento da área de contorno  <math>C'</math> – coesão efetiva do solo  <math>\theta</math> – declividade local,  <math>\rho_w</math> – densidade da água,  <math>g</math> – aceleração da gravidade,  <math>z</math> – espessura do solo,  <math>\rho_s</math> – densidade global do solo saturado  <math>\phi</math> – ângulo de atrito do solo,</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Ramos *et al.* (2002)

Neste trabalho, considera-se que os modelos matemáticos pré-existentes podem ser considerados como referências para a determinação da chuva crítica, mas pretende-se desenvolver um sensor e ambiente experimental para a determinação de novos modelos para a previsão de deslizamentos.

## 1.5 Deslizamento de Encostas

Geólogos, engenheiros e outros profissionais sempre se apoiam em definições de deslizamentos específicos com pequenas diferenças entre si. Essa diversidade de definições reflete a complexidade da natureza que envolve muitas disciplinas de estudo, associadas aos fenômenos de deslizamento. Para Crozier (1986), os deslizamentos de encostas são processos que diferentemente da erosão laminar, ravinas e voçorocas, caracterizam-se pelo movimento gravitacional, descendente e para fora da encosta, carreando materiais sempre com a ajuda de água corrente que atua como agente de transporte.

No escopo deste trabalho de pesquisa, deslizamento será um termo genérico, usado para descrever o movimento de massa na forma de solos, rochas ou

materiais orgânicos, sob o efeito de fenômenos hidrológicos. O termo deslizamento é também usado para descrever a formação geológica final resultante de dos movimentos de terra. Existem outros termos que são usados alternativamente ao termo “deslizamento”, dentre os quais: movimento de massa e ruptura do talude, sendo comum ver estes termos aplicados a todos os tipos e tamanhos de deslizamento.

Nas figuras 5 e 6, são mostrados exemplos de deslizamentos de encostas, com soterramento de estradas e casas. Em ambos os casos, as construções afetadas estavam localizadas próximas a encostas de alto risco.

Figura 5 - Deslizamento de terra destruindo estrada.



Fonte: (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Figura 6 - Deslizamento de encosta na região de Nova Friburgo-RJ em 13 de janeiro de 2011.

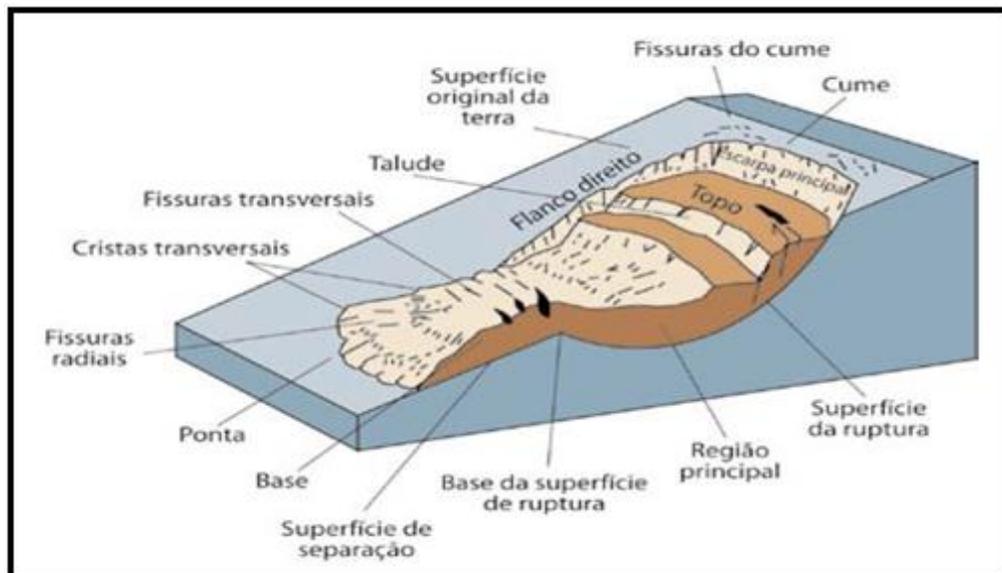


Fonte: (REDAÇÃO, 2013).

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), o deslizamento de encostas é caracterizado como um movimento de descida de rocha, solo, ou ambos, em declive, que ocorre na ruptura de uma superfície. Essa ruptura pode ser do tipo: (1) ruptura curva (escorregamento rotacional) ou (2) ruptura plana (escorregamento translacional), na qual a maior parte do material move-se como uma massa coerente ou semicoerente com pequena deformação interna.

Para o tipo translacional de movimento de solo, o modelo Shalstab é aplicável no caso de solos rasos. Deve-se observar que em alguns casos os deslizamentos podem envolver outros tipos de movimentos, tanto no desencadeamento da ruptura como nos eventos posteriores a ele, se as propriedades do solo forem alteradas durante o movimento do material (MICHEL, 2011). Na Figura 7 temos um corte de um solo que sofreu um processo de deslizamento do tipo rotacional.

Figura 7 - Uma ilustração simples de um deslizamento rotacional que evoluiu para um fluxo solo



Fonte: (HIGHLAND, 2008).

Quando ocorrem deslizamentos sempre há riscos e Segundo Kobiyama (2011) e Goerl *et al.* (2011) existe risco quando são caracterizadas probabilidades de perdas socio-ambientais resultantes da interação entre os perigos naturais e os sistemas humanos ou prejuízos ao ambiente e perdas materiais. As expressões a seguir representam o risco sobre as populações da seguinte forma:

$$R = f(H, Pop, V) - \text{Equação 1.2}$$

Onde:  $R$  é o risco sobre a população  $Pop$ ;  $H$  é o perigo,  $V$  é vulnerabilidade e  $Pop$  é população. O Perigo  $H$  representa eventos, ou fenômenos, ou processos naturais que potencialmente causam danos socioambientais, a vulnerabilidade  $V$  é a capacidade que grupos ou indivíduos têm de lidar com perigos naturais, com base em suas posições dentro da sociedade e no espaço físico, social, cultural e ecológico (GOERL, *et al.* 2011).

Com base na estimativa do risco  $R$  é possível planejar as medidas específicas para amenizar os efeitos danosos dos deslizamentos de encostas, avaliando a velocidade potencial do movimento, a extensão no espaço onde os efeitos do deslocamento de massa produzem danos e avaliando o volume de deslocamento de massa. A forma exata das variáveis  $R$ ,  $Pop$ ,  $H$  e  $V$  e a determinação das unidades usadas para estas variáveis, vai dependente tanto do tipo de ambiente natural quanto da população envolvida, dos mecanismos de contingenciamento utilizado, entre outros fatores.

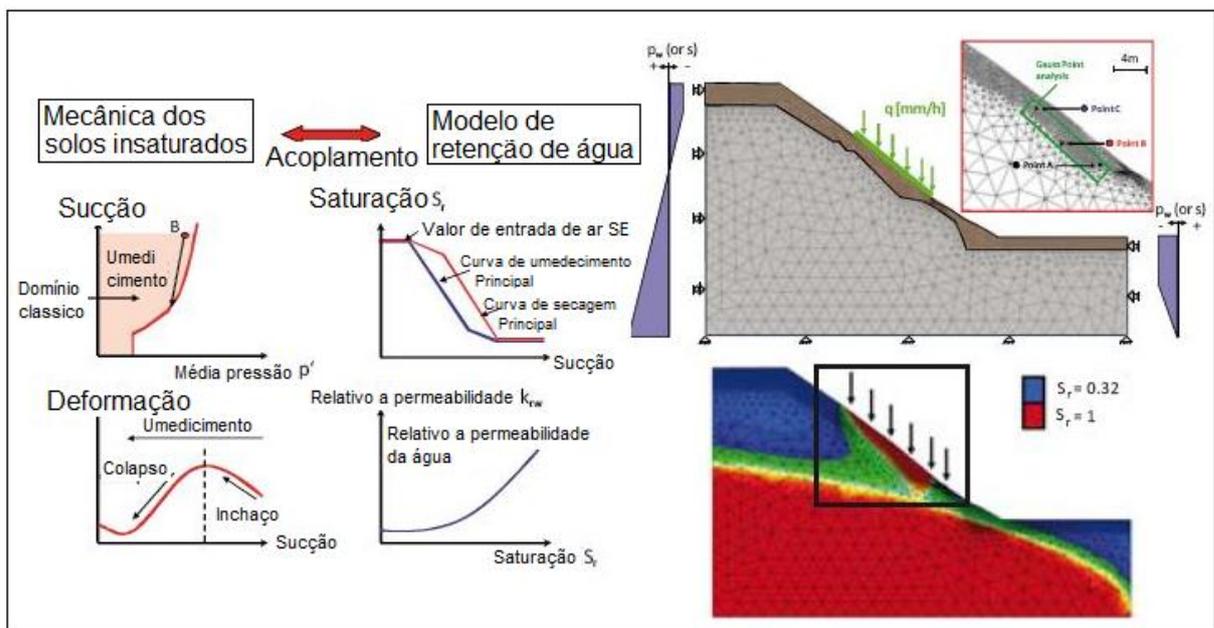
Não é objetivo deste trabalho de pesquisa produzir uma definição formal para a função  $f$ , dada pela Equação 1.2, e para as suas variáveis. Entretanto, esta definição depende de muitas especificidades locais das encostas e o objetivo central do trabalho de pesquisa, aqui apresentado, é desenvolver um sistema de monitoramento genericamente definido, por meio da construção dos sensores multiparamétricos e da construção de um ambiente experimental de coleta de dados do ambiente real, combinado com um ambiente de simulação em escala reduzida, simulação e análise computacional dos dados gerados pelo monitoramento, formatados como séries históricas.

Deste modo, o trabalho de pesquisa aqui desenvolvido tem um cunho essencialmente experimental, gerando um volume de dados de monitoramento suficiente para a compreensão integral do fenômeno de deslizamento e seu desdobramento nos efeitos internos da dinâmica do solo, sem partir da utilização de modelos matemáticos complexos dos processos geodinâmicos. Portanto, o solo deve ser tratado como um sistema de “caixa preta” e a descoberta do comportamento dinâmico do solo deve ser feita por meio do uso de técnicas de reconstrução da dinâmica interna da encosta, através do uso de ferramentas

matemáticas que permitam obter estas dinâmicas pela análise da relação estímulo-resposta, observada durante o processo de desestabilização das encostas.

Alguns exemplos encontrados na literatura são apresentados em Ricardo Alvim (2011) nesta referência modelos constitutivos e de elementos finitos são apresentados, com o intuito de prever o ponto crítico de deslizamento de solos insaturados, sobre condições de permeabilidade e infiltração de chuva, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Modelo hidromecânico de comportamento do solo nas encostas carregadas

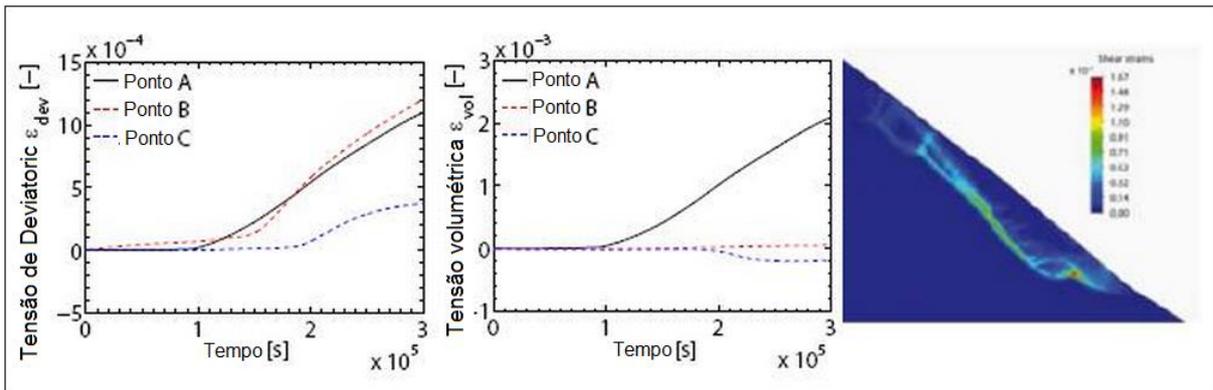


Fonte: Ricardo Alvim (2011).

Deformações desviadas do padrão considerado indicador de estabilidade da encosta são apresentados na figura 9 abaixo. Estas deformações são observadas na iminência do colapso, com compressão das regiões no montante da massa de solo deslocada e na parte inferior da zona colapsada. Isto permite buscar zonas de interesse para monitoração a partir dos modelos simulados.

Conforme cita Highland (2008) é importante considerar que a saturação de água do solo pode contribuir para o deslizamento e para o aumento dos riscos associados, devido ao aumento do peso da camada de solo e a redução da resistência ao cisalhamento nas superfícies de ruptura, definidas entre as camadas de solo, resultado do aumento da pressão da água.

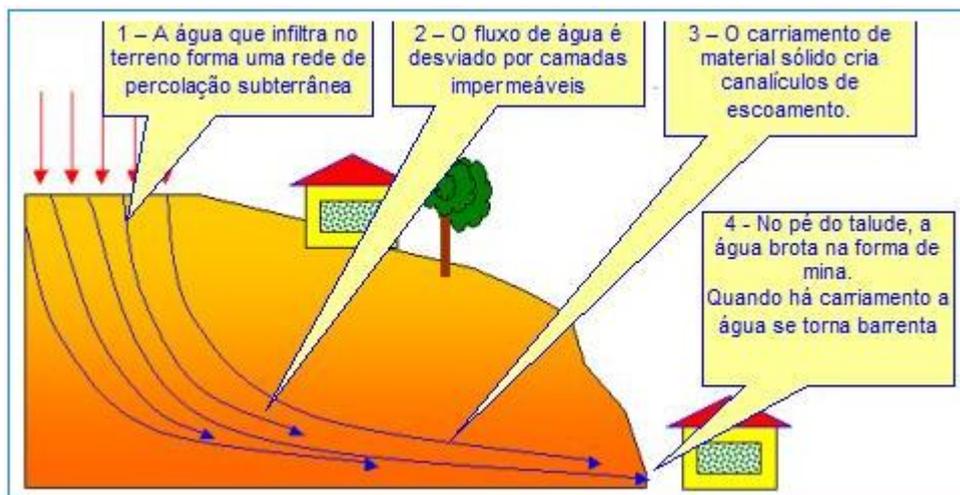
Figura 9 - Deformação desviada e Compressão da base do Talude.



Fonte: (ELVIM, 2011).

As constatações acima descritas são reforçadas por estudos realizados por Ricardo Alvim (2011), estabelecendo que as características de saturação por água e drenagem do solo são decisivas para o controle e prevenção dos deslizamentos, servindo como indicativos da possibilidade de colapsos. Com isto, conclui-se que elementos sensores devem ser incluídos no sistema proposto nesta dissertação para a mensuração da quantidade e distribuição de água no solo. As informações destes sensores poderão ser utilizadas para a caracterização dos escoamentos de água que ocorrem na estrutura interna do terreno. A figura 10 ilustra a dinâmica de escoamento de águas no solo.

Figura 10 - Ideia do Processo de escoamento das águas do solo



Fonte: Defesa Civil Duque de Caxias (2011)

Tendo em vista a inexistência de modelos genéricos que possam descrever de forma unificada todos os tipos de terrenos e processos de desestabilização,

deverão ser realizados estudos iniciais sobre a classificação dos diversos tipos de configuração dos solos das encostas (morros), processos de deslizamento e fatores envolvidos, de modo a permitir, de forma criteriosa, a escolha dos tipos que serão usados como objetos de estudos iniciais, com os seus respectivos modelos de descrição da dinâmica de deslizamento, estas afirmações são confirmadas por Ricardo Alvim (2011).

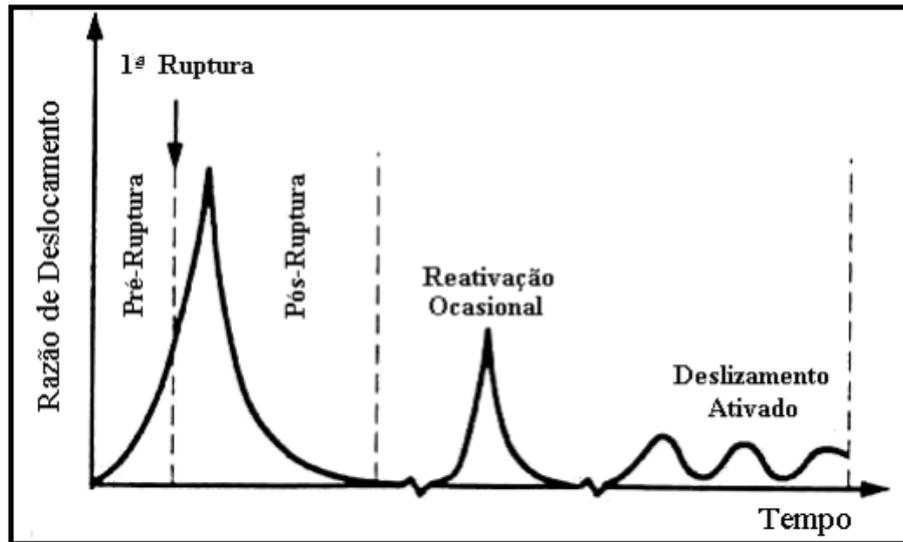
A Defesa Civil do Estado de São Paulo afirma que as ocorrências de deslizamento de encostas coincidem com os períodos de chuvas intensas e prolongadas, visto que as águas escoadas e infiltradas são fatores marcantes do processo de desestabilização das encostas, os terrenos são sempre inclinados e, quando a água penetra no solo, pode acontecer um deslizamento com a consequente destruição das construções, que estão no campo de atuação do processo de deslocamento do solo. Desse modo, o sistema de sensoriamento deve escalonar, de forma adequada, a sua operação, em função dos períodos de pico de intensidade de chuvas, que podem caracterizar os períodos de maior necessidade de monitoramento, com a maior necessidade de geração de dados. Assim, deve-se prever um arranjo de elementos sensores com uma lógica de escalonamento de atividades, em função de fatores climáticos, de modo a minimizar a necessidade de geração contínua de dados, conforme indica Cunha Filho (2012), Silva (2007), Bandeira (2003), Denise (2010).

#### 1.5.1 Processo de Ruptura de Solo e Deslocamentos de Massa

Leroueil *et al.* (1996), pressupõe que os movimentos de massa se organizam em quatro etapas, representada na figura 11 abaixo. As etapas do movimento de massa são:

- (1) Pré-ruptura,
- (2) Ruptura,
- (3) Pós-Ruptura,
- (4) Reativação.

Figura 11 - Etapas dos movimentos de massa (LEROUEIL *et al.*, 1996).



Fonte: LEROUEIL *et al.* (1996), SILVA (2007).

#### 1.5.1.1 Etapa de Pré-Ruptura

A primeira etapa refere-se ao momento da pré-ruptura, incluindo-se todo o processo de deformação que conduzem a ruptura. Esta etapa se caracteriza pela combinação de fatores tais como: (1) deformações elasto-plásticas, acompanhada pelas mudanças nas tensões efetivas do solo e por pequenas razões de deslocamento de massa, associando a ruptura progressiva. (2) Aumento da velocidade de deslocamento, ao se aproximar do instante de ruptura, tendo como consequência uma gradual formação e propagação da zona de cisalhamento na massa deste solo Silva (2007).

As evidências dos escorregamentos em taludes precariamente estáveis nas etapas de pré-ruptura estão presentes em argilas moles, em argilas rijas e até mesmo em massas de rocha. O tempo de duração das etapas de pré-ruptura depende essencialmente das características do solo e do estado de tensão inicial, que pode ser extremamente variável. Outra característica dos movimentos de massa, associados aos escorregamentos, é a variação sazonal da velocidade de deformação, conforme Terzaghi (1950) citado por Fonseca (2006).

A ruptura progressiva pode ocorrer em solos com diferenças entre a resistência de pico e a resistência de pós-pico do solo. As tensões que provocam o cisalhamento geralmente não são uniformes, porem, se as tensões cisalhantes no local alcançam a resistência de pico do material, isso promove uma ruptura

localizada. Como consequência disto os elementos de solo rompido passam a suportar uma menor tensão cisalhante e terão um aumento de deformação. Quando a parcela da tensão cisalhante não é mais suportada pelos elementos rompidos, esta parcela é repassada para os elementos de solo vizinhos, que podem romper em seguida. A transferência de cargas cisalhantes continuará até que o somatório das tensões na superfície de ruptura supere o valor de resistência do solo e, neste momento, ocorrerá uma ruptura generalizada. Em seguida à ruptura generalizada, uma parte do solo atinge a resistência de pico e outra parte fica submetida a grandes deformações ou grandes modificações da resistência residual (SILVA, 2007), (LEROUEIL *et al.* 1996).

Para o surgimento de uma ruptura progressiva é necessária a presença de algumas características a saber:

- (1) A fragilidade dos solos (“*brittleness*”)
- (2) a não uniformidade na distribuição das tensões cisalhantes,
- (3) tensões cisalhantes locais que excedam a resistência de pico do solo.

Pode haver algum equilíbrio em um determinado momento no processo de ruptura progressiva. Para isto é necessário que o processo de ruptura se modifique ou reinicie. Os elementos que podem levar a essa situação estão relacionados a uma variação na geometria do problema da dinâmica dos e variações das tensões cisalhantes, como exemplo:

- (1) Erosão no pé do carregamento ou no topo do talude,
- (2) Diminuição da tensão normal efetiva, com consequente diminuição no pico de resistência do solo;
- (3) Variação na resistência residual (escavação durante período de equilíbrio de poro-pressões)
- (4) Diminuição dos parâmetros de resistência (decréscimo da envoltória de resistência de pico devido ao escorregamento, fadiga ou Intemperismo), LEROUEIL (2004) citado por SILVA (2007).

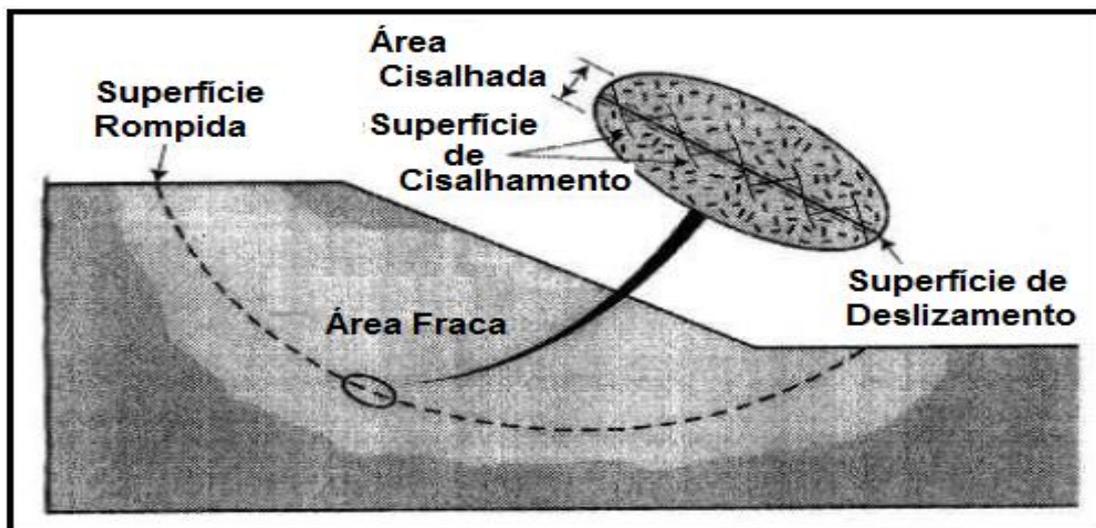
### 1.5.1.2 Etapa de Ruptura

A etapa de ruptura é caracterizada pela formação de uma área ou superfície de cisalhamento na massa de solo ou rocha. Este processo geralmente é complexo e resultante de um conjunto de fatores, sendo geralmente caracterizado pela envoltória de tensões efetivas cisalhantes. Elas são influenciadas pelos efeitos da:

- (1) Velocidade de deformação;
- (2) Efeito de ruptura progressiva e descontinuidades.

Existe uma zona de cisalhamento que é definida como a camada de solo em torno da superfície de cisalhamento e que perde suas características durante o processo de ruptura, conforme figura 12.

Figura 12 - Área fraca, área cisalhada e superfície de cisalhamento



Fonte: (SILVA, 2007; LEROUEIL, 2004).

Neste processo, primeiro ocorre a formação da área cisalhante e em seguida se desenvolve a superfície de cisalhamento. Alguns autores, como Skempton-Pettley (1967) e Picarelli (1991), estudaram a formação da área de cisalhamento e observaram três áreas distintas sendo elas:

- (1) Área Fraca, onde o solo atinge a ruptura local e geralmente torna-se desestruturado,
- (2) Área Cisalhante que é adjacente à superfície de cisalhamento com espessura variando de poucos centímetros a poucos decímetros,

geralmente amolgada, dependendo do material e dos deslocamentos envolvidos,

- (3) A superfície de cisalhamento em si, ao longo da qual existe a possibilidade de orientação de partículas.

O mecanismo que caracteriza a formação inicial de superfícies de cisalhamento simples e isoladas é comandado pela resistência de cisalhamento dos solos que participam no processo de escorregamento, principalmente os que compõem a zona cisalhante, segundo Silva (2007).

A primeira etapa se refere ao momento da pré-ruptura, incluindo-se todo o processo de deformação que conduzem à ruptura. A ruptura se caracteriza pela combinação dos seguintes fatores:

- (1) Deformações Elasto-Plásticas, acompanhadas pelas mudanças nas tensões efetivas e por pequenas razões de deslocamento de massa, associadas à ruptura progressiva.
- (2) Aumento da velocidade de deslocamento, ao se aproximar do ponto de ruptura, tendo como consequência uma gradual formação e propagação da zona de cisalhamento na massa deste solo (LIMA, 2007).

No fator (2), citado acima, a energia potencial armazenada é liberada, convertendo-se para a forma de energia cinética. Neste momento, uma onda sônica propaga-se pelo solo e esta onda poderá ser percebida por um conjunto de sensores acústicos. Dento em vista esta possibilidade de detecção acústica, o sistema de monitoramento, proposto nesta dissertação, deverá incluir um sensor acústico piezo-elétrico, capaz de detectar tais sinais sônicos. Estes sinais serão um dos componentes de informação detectado pelo sensor multiparamétrico proposto e será utilizado para o reconhecimento dos momentos que precedem o deslizamento, antes que ele de fato aconteça.

O Sistema de Monitoramento deve ser especificado e dimensionado para ser capaz de perceber o momento em que ocorre a primeira pré-ruptura associada às deformações que ao longo do tempo vão conduzir a ruptura principal, onde a resistência ao cisalhamento vence a resistência do solo em colapso.

O sistema proposto neste trabalho também prever a captura de outros sinais, constituindo um Ambiente de Monitoramento multiparamétrico, onde um

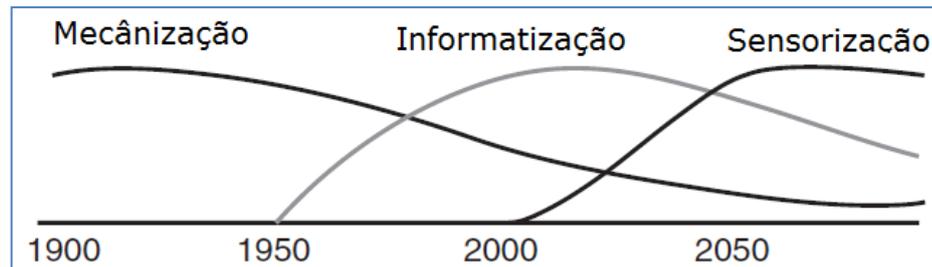
conjunto de sensores de tipos diferentes reforçara a detecção dos eventos de deslizamento, gerando redundância de informação. Se considerarmos um conjunto de  $N$  sensores, que geram informação ao longo do tempo  $t$ , poderemos imaginar o sinal do sensor como um vetor  $N$ -dimensional  $\vec{S}(t) \in R^N$  e a trajetória deste sinal no espaço  $R^N$  ao longo do tempo  $t$  poderá ser analisada, segundo modelos de reconhecimento de padrões e modelos estatísticos e probabilísticos de previsão de riscos para que seja possível avaliar os riscos para a ocorrência de deslizamentos.

O objetivo central desta dissertação de mestrado e a definição dos  $N$  sensores que devem compor o sensor multiparamétrico e a construção do Ambiente de Simulação que vai permitir a geração de dados históricos correspondentes ao sinal  $\vec{S}(t)$ . Não é pretensão deste trabalho de pesquisa definir os padrões de reconhecimento dos sinais, associando-os a eventos específicos da geodinâmica de desestabilização das encostas, mas sim construir uma proposta inicial de sensor multiparamétrico e demonstrar a capacidade deste tipo de sensor de gerar informações sobre os eventos de solo, com grande sensibilidade na geração dos sinais mesmo no caso de eventos no solo de baixa amplitude. Para isto, o trabalho de pesquisa também pretende desenvolver um ambiente de simulação e coleta de dados de monitoramento. Em trabalhos posteriores, pretendemos analisar a massa de dados gerados experimentalmente para inferir a dinâmica de desestabilização dos solos e a, partir desta dinâmica levantada dos dados de monitoração, inferir modelos de predição de deslizamento.

## 1.6 Tecnologias Disponíveis Para O Monitoramento De Encostas

Atualmente existe uma tendência para o uso de Sistemas Digitais Microeletrônicos Embarcados que indica o aumento crescente de aplicações de sensoriamento em diversas áreas, com a intensificação do uso de redes sensores, inclusive no monitoramento ambiental. Esta tendência é ilustrada na figura 13.

Figura 13 - Representa a faixa de evolução da era dos sensores.



Fonte: (MEIJER, 2008).

Podemos ver que o início do crescimento das redes sensores, coincide aproximadamente com o pico de desenvolvimento da informatização, com a disponibilização de dispositivos computacionais compactos, como poder razoável de processamento local e capacidade de participação em redes de comunicação sem fio, movidos a baterias ou fontes alternativas de energia, como células solares de pequeno porte.

A figura 13, acima, confirma a tendência a utilização crescente da sensorização, apresentando o gráfico de evolução das tecnologias, cujo foco em 1900 era a mecanização, com o surgimento da tecnologia da informação em 1950, com o seu pico evolutivo se estabelecendo entre 2000 e 2010. Conforme o gráfico, a expansão do uso de redes sensores tem início partir do ano 2000, sugerindo uma nova revolução tecnológica, que tem como base o aperfeiçoamento da capacidade de detecção de diversos tipos de sensores disponibilizados pela tecnologia, com uma previsão de pico evolutivo ocorrendo por volta do ano 2050 (MEIJER, 2008).

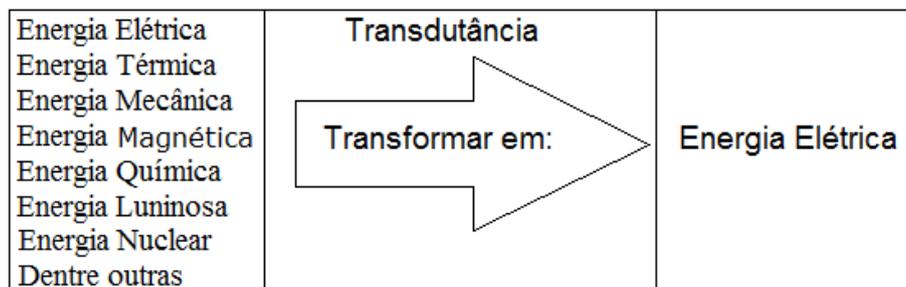
Um exemplo da evolução dos sistemas de sensorização, pode ser representado através dos sistemas automáticos de controle de voo, das modernas aeronaves, que possuem em sua estrutura uma grande quantidade de sensores, cuja finalidade é o monitoramento do funcionamento de diversos componentes da aeronave, determinação de variáveis de trajetória do avião e de condições ambientais, garantindo a operação segura de um complexo sistema, com um elevado número de variáveis, e permitindo o controle com grande precisão dos movimentos aerodinâmicos de voo e precisão de navegação.

Neste trabalho é proposto um sistema de monitoramento de encostas, por meio de sensores e rede lógica de dados, com o objetivo de obter dados históricos

sobre o fenômeno de deslizamento de solo, que possam ser usados em análises matemáticas e computacionais, aumentando o conhecimento dos processos envolvidos a respeito destes fenômenos e permitindo a construção de modelos de previsão e um sistema de alerta capaz de avisar, com antecedência temporal, a eminência de um evento de deslizamento ocorrer.

Fraden (2004) define sensor como um dispositivo que responde a um estímulo com um sinal elétrico. Wilson (2005) define sensores como dispositivos que transformam sinais oriundos de diferentes domínios de energia para o domínio elétrico. Para Meijer (2008), sensor é um dispositivo que converte um fenômeno físico num sinal elétrico. No contexto deste trabalho de pesquisa, entendemos um sensor como um transdutor, Ferreira (2004), capaz de converter sinais que o excitam em diversos domínios de energia para um sinal elétrico de saída com sensibilidade e precisão adequada para o estudo dos fenômenos de interesse, que são fontes das diversas formas de energia de excitação. Esta definição é ilustrada na figura 14.

Figura 14 - Modelo de Sensor baseado na ideia de transdutância: a transformação de um dado tipo de energia em um sinal (energia) elétrica.



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa).

Tais sensores representam parte da interface entre o mundo físico e o mundo dos dispositivos elétricos e eletrônicos, sendo estes últimos responsáveis pelo processamento dos sinais produzidos pelos sensores. O estímulo é a propriedade de ativação ou a condição de uma reação (*stress*) que pode ser convertida em sinal elétrico. O objetivo de um sensor é responder a algum tipo de estímulo ou uma propriedade física de entrada, e converter a saída em um sinal elétrico. Pode ser comparado a um transdutor para o domínio elétrico, conforme foi ilustrado na figura 14, o que significa que o sinal de saída pode ser amplificado e modificado por

dispositivos eletrônicos.

O sinal de saída do sensor pode ser descrito em termos dos seus atributos de amplitude e suas variações ao longo do tempo (domínio de representação temporal) ou a partir da sua composição espectral no domínio da frequência e fase (domínio de representação espectral).

O conjunto de características reveladas pelos sinais de sensores, em ambos os domínios de representação, temporal e espectral, podem revelar grande quantidade de informações úteis a respeito dos fenômenos geradores das energias de excitação que chegam ao sensor, na forma de sinais variantes ao longo do tempo. Portanto, um sensor tem propriedades de entrada (de qualquer natureza), porém, as propriedades de saída ficam restrita ao domínio elétrico Fraden (2004), permitindo a construção de tecnologias padronizadas de sistemas embarcados, que combinam a Eletrônica Analógica e Digital para realizar a conversão dos sinais de saída do sensor para o domínio digital (Condicionamento e Conversão Analógico/Digital (AD) dos sinais) e o posterior processamento computacional destes sinais, já no domínio digital, para a extração de informações úteis no estudo dos fenômenos de interesse.

Uma lista de tipos de sensores é apresentada por Leão *et. al* (2007) usando a conceituação destes dispositivos como transdutores, citando alguns exemplos temos:

- (1) Os termopares e os Termistores: são transdutores que convertem temperatura em tensão elétrica, cuja finalidade é medir temperatura.
- (2) Os sensores de Pressão a base de silício: são transdutores que convertem pressão em sinal elétrico, neste caso para medir pressão.
- (3) As células de carga: são transdutores que convertem força ou pressão em variação de resistência elétrica e posteriormente em tensão elétrica, para medir força ou pressão na temos exemplos de transferência de energia.
- (4) Sensores de umidade do solo: Sensores resistivos que tomam por base a variação da resistência elétrica do solo à passagem de corrente elétrica, sensores capacitivos que usam as propriedades do solo como o dielétrico do capacitor.

As novas tecnologias de sensores utilizam-se dos desenvolvimentos da

microeletrônica moderna e da nanotecnologia para produzir componentes de pequenas dimensões, baixo custo, alta confiabilidade, resposta em tempo real e facilidade de instalação e manutenção. Neste trabalho de pesquisa, consideramos fundamental, para a construção de um sistema de monitoramento de encostas, que seja utilizado uma rede sensor como meio integrador das informações, oriunda dos diversos sensores espalhados pelas encostas. Estas redes sensores serão compostas, localmente, por microprocessadores acoplados aos sensores e a uma rede wireless, gerando capacidade de processamento distribuído ao longo da área a ser monitorada, ficando estes microprocessadores instalados no próprio local monitorado e acoplado a um conjunto de sensores capazes de capturar informação local dos fenômenos de deslizamento e processar localmente estas informações para a detecção de eventos no solo e envio destes eventos pela rede sensor, utilizando protocolos de comunicação adequados. Estas redes sensores, do tipo wireless, devem integrar em seus requisitos não funcionais, um baixo custo e mínimo consumo de energia. (VANACÔR, 2006).

Tanto os sensores quanto os sistemas de processamento do tipo rede de sensores devem ser especificados de forma adequada para o tipo e ambiente da aplicação.

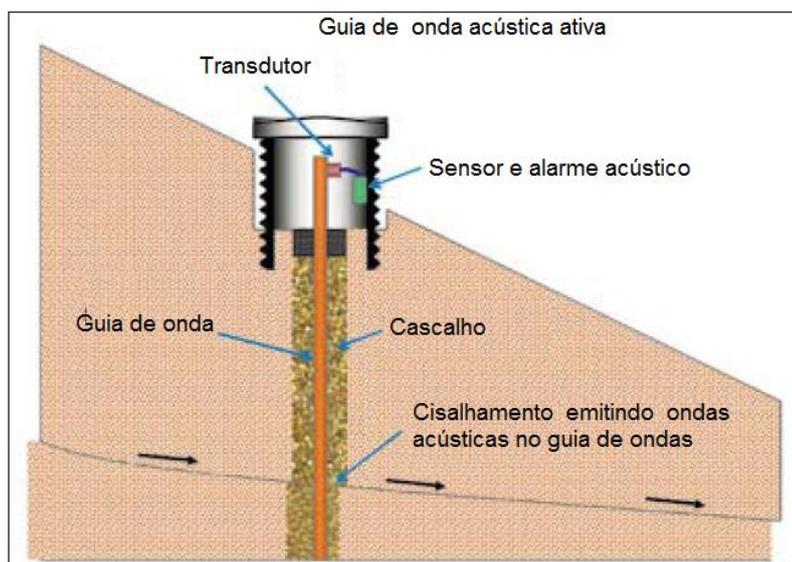
Não pretendemos, neste trabalho de pesquisa, gerar uma especificação da rede sensor em se, tendo em vista que sua especificação depende fortemente da natureza dos dados trafegados, que por sua vez vai depender da natureza e complexidade dos fenômenos de deslizamento a serem monitorados. A especificação da rede deve ser realizada posteriormente, a partir dos estudos dos fenômenos de deslizamento, por meio do monitoramento de encostas reais na natureza, e do monitoramento de simulações das encostas em escala reduzida, no laboratório e simulações computacionais. Este trabalho de pesquisa, foca, portanto, no desenvolvimento de um sensor multiparamétrico para a captura de sinais de interesse na encosta e no desenvolvimento de um ambiente de simulação, em laboratório, para a geração de conhecimentos sobre os fenômenos de deslizamento, usando modelos em escala reduzida.

No caso do monitoramento de encostas, os sistemas devem ser alimentados por baterias, com grande autonomia, com gerenciamento de consumo de energia e condicionamento para resistir às agressões ambientais promovidas pela exposição

dos dispositivos ao ar livre. A importância dos requisitos para sensores e rede de sensores, bem como o processo de decisão de escolha dos componentes sensores, processadores e topologias de ligação para a composição do sistema, Highland e Bobrowsky (2008), foram objetos de análise nesta dissertação. Existem diversos tipos de sensores, já disponíveis, e em desenvolvimento, capazes de medir variáveis importantes do solo, como teor de água, deformações e tensões, e variáveis climáticas como temperatura e precipitação pluviométrica ou escoamento das águas e que podem ser incorporados no sensor proposto.

Um exemplo de sistema de sensores em desenvolvimento é o sistema descrito e desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Loughborough e do Serviço Britânico, Baleiro (2008), cuja ideia central é detectar a eminência de deslizamento de terras por meio da análise dos ruídos no solo, gerados pelos deslocamentos iniciais entre as camadas de solo, que antecedem um deslizamento catastrófico. A solução sugerida pelos pesquisadores é a detecta movimentos de terra sob a superfície que aumenta gradativamente, conforme a inclinação se torna instável. A detecção do som associado ao movimento relativo entre camadas de solo é obtida através de um sistema de guia de onda na forma de haste metálica, que conduz as vibrações da região de fragilidade do solo, onde se inicia o deslizamento, até um elemento detector que captura as vibrações e as envia para um sistema de processamento. Na figura 15 o sistema sensor é ilustrado.

Figura 15 - Sistema de Previsão de Deslizamento baseado em detecção de vibrações de solo.



Fonte: (DIXON, 1981).

Outra técnica de monitoramento utiliza sensores que enviam sinais acústicos ao terreno e recebem de volta as reflexões destes sinais, produzidas pelas diversas interfaces existentes entre as diferentes camadas de solo. Estes sinais refletidos são então processados, segundo modelos adequados de propagação, para revelar a umidade do solo, os processos de cisalhamento e outros fatores úteis para a detecção de eventos ou probabilidades de eventos de escorregamento (ALHEIRO, 2003). Uma alternativa para este sistema seria o uso de sensores de aceleração que podem ser empregados para detectar os deslocamento/inclinação do solo e as primeiras vibrações dos momentos de desabamentos.

O parâmetro central, no que diz respeito à avaliação de risco de deslizamento, é o teor de água acumulada no solo. Este fato torna importante a escolha de sensores adequados para o monitoramento da umidade do solo, que determinam uma variável fundamental para avaliação da suscetibilidade ao deslizamento. Como já foi mencionado, existe uma grande disponibilidade de sensores de umidade comerciais que apresentam diversas características. Estes sensores utilizam vários métodos de medição, sendo os principais:

- (1) Método tensiométrico,
- (2) Métodos nucleares por moderação de nêutrons e atenuação gama,
- (3) Métodos baseados em constante dielétrica, reflectometria no tempo e sondas capacitivas,
- (4) Métodos resistivos, resistência elétrica de sensores porosos,
- (5) Métodos baseados em condutividade térmica,
- (6) Métodos baseados em condutividade elétrica do solo,
- (7) Métodos baseados em ondas eletromagnéticas.

#### 1.6.1 Características de Sensores

Dentro das necessidades e das características e condições das aplicações, Fraden (2004), Wilson (2005) e Meijer (2008) definem algumas características dos sensores que devem ser consideradas quando esses são especificados para determinado tipo de aplicação. Estas características são:

- (1) Função de Transferência:

A função de transferência é a relação matemática entre os sinais de entrada e

os sinais de saída do sensor. Esta relação é representada, geralmente, no tempo, na forma de equações diferenciais que podem ser transladadas para formas de representação no domínio da frequência, usados ferramentas matemáticas como as Transformadas de Laplace, Transformadas de Fourier e Transformas Z para o os sinais no domínio discreto (digital). Entretanto, para reduzir a complexidade matemática, as funções de transferência podem ser derivadas das suas representações matemáticas clássicas para a foram de gráficos da relação de entrada e saída e funções de transferências que representam curvas linearizadas.

#### (2) Sensibilidade:

A sensibilidade é definida como a relação entre a intensidade da grandeza de entrada e a intensidade do sinal elétrico de saída do dispositivo. É geralmente definida como a razão entre uma pequena variação do sinal físico de entrada do sensor e a variação resultante no sinal elétrico de saída. Esta razão de variação, entre o sinal de entrada e o sinal de saída, pode ser matematicamente determinado, usando a operação matemática de derivação sobre a função de transferencia do sensor.

#### (3) Faixa Dinâmica:

É a faixa em que os sinais físicos podem ser convertidos pelo sensor em sinais elétricos, mantendo uma precisão adequada. É a faixa de melhor atuação do sensor. Os sinais fora desta faixa causam grandes imprecisões e em geral não são uteis para a análise dos fenômenos monitorados.

#### (4) Precisão e Incerteza:

A precisão diz respeito a quantidade de dígitos decimais com que pode ser representado o sinal elétrico de saída do sensor, mantendo os dígitos com significado para a medição da grandeza física de interesse. Os dígitos a partir dos quais não é mais possível confiar como representativos da medição do sinal de excitação de entrada, geram incerteza de medição. Mas não se deve confundir a Precisão com a Incerteza. A Incerteza é geralmente definida como o maior erro produzido pelo sensor na avaliação do sinal de entrada. Este erro esta associado não unicamente a Precisão, mas também à diversos fatores que interferem no processo de transdução da energia de excitação na entrada do sensor e o seu sinal

elétrico resultante, pois diversas interferências, de diversos fatores, que atingem o processo de transdução levam a incertezas de medida.

#### (5) Histerese e Resposta em Frequência:

A Histerese (significa efeito de seguir atrás) é um efeito que ocorre com um sinal elétrico de saída do sensor, quando este sinal não consegue acompanhar as variações rápidas do sinal de excitação de entrada, devido a presença de termos inerciais com derivadas de 2ª ordem, ou superiores, nas equações diferenciais que governam a resposta temporal do sensor. Estes efeitos inerciais estão associados a elementos com capacidade de armazenar energia na estrutura interna do transdutor, produzindo respostas reativas do elemento sensor, as excitações de entrada. Em geral, o efeito de histerese pode ser levantado a partir da própria resposta em frequência do elemento transdutor.

Na escolha dos transdutores, para uma dada aplicação, é interessante que se escolha um dispositivo que tenha a região plana de resposta de frequência cobrindo completamente a região do espectro do sinal de excitação de interesse, proveniente do fenômeno de deslizamento, de modo que não sejam perdidas componentes de informação importantes para a análise posterior dos sinais, para a compreensão dos fenômenos monitorados.

#### (6) Ruído:

Os ruídos são sinais com um padrão temporal aleatório que são produzidos por fontes diversas e distintas da fonte de excitação de entrada de interesse para o monitoramento. O efeito do ruído introduzido pelos sensores e pelos circuitos eletrônicos de tratamentos dos sinais de saída podem gerar erros intoleráveis. O ruído é geralmente distribuído em todo o espectro de frequência, afetando de maneira diferente os diversos componentes frequenciais do sinal de interesse produzido pelo sensor. Para a escolha de um sensor adequado para aplicação, devemos determinar os níveis de ruído aceitáveis dentro do espectro de frequência de interesse e verificar a possibilidade de eliminação destas componentes de ruído por meio de técnicas de filtragem adequadas. Assim o critério de seleção de sensores para o monitoramento deve considerar a capacidade de separação dos componentes indesejáveis de ruído do sinal de interesse.

#### (7) Resolução:

A resolução de um sensor é definida como a variação mínima do sinal de excitação de entrada necessária para produzir uma variação observável no sinal elétrico de saída. Pode acontecer que para uma excitação com variação de amplitude muito pequena, o efeito de variação do sinal elétrico tenha um amplitude muito menor que a intensidade do sinal de ruído inerente ao sensor, na região de frequência do sinal de excitação. Isto pode fazer o sinal ficar completamente misturado como ruído e sem poder ser discriminado com relação a este. Assim, a qualidade de relação sinal ruído para um dado sensor pode ser um fator importante para a determinação da resolução do sensor.

A resolução também está relacionada com a natureza da medição, a ser realizada, e com as relações de linearidade entre as amplitudes dos sinais de excitação de entrada do sensor e a resposta de saída na forma de sinal elétrico. Na escolha de sensores para o monitoramento de encostas, deve-se considerar, fundamentalmente, em cada faixa de amplitude de resposta do sensor, o valor mínimo de variação do sinal que represente informação significativa a respeito dos fenômenos de deslizamento. Assim, a escolha dos sensores é muito dependente da natureza dos fenômenos e assim, a princípio, fica difícil a escolha do sensor mais adequado, sem um conjunto de sinais historicamente registrados para que possam ser extraídas informações a respeito da resolução e outras propriedades importantes dos sensores.

Neste trabalho de pesquisa, as escolhas de parâmetros de especificação dos sensores serão realizadas a partir de escolhas iniciais destes parâmetros e da avaliação da qualidade de resposta dos sensores, a partir dos dados empiricamente obtidos em simulações. A partir da análise de respostas destes sensores em laboratório, a especificação dos sensores, para compor o sensor multiparamétrico, proposta neste trabalho de pesquisa, poderá ser refinada.

#### (8) Largura de banda:

A largura de banda do sensor representa a faixa de frequências do sinal de excitação de entrada na qual o sensor possui uma resposta plana, sem distorções de fase e amplitude do sinal que promovam perdas significativas de informação.

Esta banda é definida por duas frequências limite designadas de  $f_{min}$  para a frequência inferior e  $f_{max}$  para a frequência superior. A largura de banda  $BW$  é definida como a diferença entre os dois limites de frequência, de modo que  $BW = f_{max} - f_{min}$ .  $BW$  pode ser interpretada como uma medida da capacidade do sensor de converter informações presentes no sinal de entrada para o domínio elétrico, representado uma medida da quantidade de informação que pode ser capturada pelo senso. A determinação da banda necessária para um dado sensor, a ser utilizado para o monitoramento de encostas, deve ser feita a partir da investigação da composição espectral dos sinais originados na encosta, durante os processos que levam a sua desestabilização. Desta forma, deve-se escolher um sensor tal que a menor componente de frequência presente no sinal de excitação de entrada seja maior que  $f_{min}$  e para o qual a componente de maior frequência seja menor que  $f_{max}$ .

#### 1.6.2 Escolha de Sensores Individuais para Composição do Sensor Multiparamétrico e Representação Matemática do Sinal de Saída:

Neste tópico vamos descrever o conjunto de sensores que foram escolhidos para a construção do sensor de encostas multiparamétrico. Estes sensores foram selecionados a partir de uma escolha inicial, com base nas grandezas que se deseja observar no fenômeno de deslizamento de encostas. As seguintes grandezas foram inicialmente eleitas para a monitoração:

- (1) Umidade Local do Solo,
- (2) Deformação do Solo,
- (3) Ondas Acústicas produzidas no Solo,
- (4) Acelerações da região de solo onde está localizado o sensor.

A composição de todas estas grandezas resulta no sinal multiparamétrico  $SMPS_i$  onde  $i$  é um indexador que serve para identificar um sensor específico no solo. Podemos matematicamente definir o sinal  $SMPS_i$  do seguinte modo:

Primeiro consideramos as posições iniciais de instalação dos sensores definida pelo vetor espacial  $R_i = (x_i, y_i, z_i)$ , que são as coordenadas espaciais do sensor identificado com o índice  $i$ . Cada um dos sensores indicados para compor o sensor multiparamétrico  $i$  devem gerar os seguintes sinais elétricos de saída:

- (1) Sinal  $s_i(t)$  que corresponde ao sinal acústico presente no solo, no local de instalação do sensor, capturado por um elemento sensível piezo-elétrico,
- (2) Sinal  $d_i(t)$  que corresponde a uma medida de deformação do solo capturada por um sensor do tipo strainage,
- (3) Sinais de aceleração local  $A_i = (a_{ix}(t), a_{iy}(t), a_{iz}(t))$  que corresponde a três acelerações nas direções dos três eixos espaciais  $x, y, z$ , sendo estes sinais gerados por elementos sensores que combinam um acelerômetro com um giroscópio para determinar a orientação espacial de cada eixo,
- (4) Sinal  $u_i(t)$  que corresponde ao teor de umidade local do solo, detectada por um sensor construído no trabalho de pesquisa que usa o princípio de medição de resistividade do solo para a determinação das variações de umidades locais ao longo do tempo.

Quando os sinais produzidos pelos sensores indicados acima, são combinados com o vetor de posicionamento espacial do sensor  $R_i$ , temos um Vetor de Sinais designados o Sinal Multiparamétrico de Solo definido pela expressão:

$$SMPS_i(t) = (R_i(t), A_i(t), s_i(t), d_i(t), u_i(t)) \in \mathbb{R}^9 \quad (4)$$

Este é um vetor 9-dimensional, cuja variação no tempo deve refletir o comportamento dinâmico localmente observável da encosta monitorada, no ponto  $R_i$  onde o sensor  $i$  é instalado. Se  $N$  sensores são instalados ao longo da encosta e enumerados de  $i = 1, 2, 3, \dots$  até  $N$ , então, o conjunto de todos os sensores produzirá um conjunto de  $9N$  variáveis de monitoramento, produzindo o objeto matemático, neste trabalho designado por  $NS$ , que é o vetor composto por todos os sinais definidos segundo a expressão (4) acima. Deste modo,  $NS$  também é um vetor que representa todos os sinais coletados por todos os sensores espalhados pela encosta, podemos escrever:

$$NS(t) = (SMPS_1(t), SMPS_2(t), SMPS_3(t), \dots, SMPS_N(t)) \in \mathbb{R}^{9N} \quad (5)$$

A Hipótese Fundamental que é considerada neste trabalho de pesquisa é que o vetor  $NS(t)$  carrega, ao longo do tempo, informações sobre o comportamento geodinâmico do solo, suficiente para que seja possível a partir do comportamento da trajetória do vetor  $NS$  em  $\mathbb{R}^{9N}$ , realizar avaliações consistentes sobre o risco de

deslizamento. Entretanto, não está no escopo deste trabalho de pesquisa propor um modelo matemático que relacione o objeto matemático definido em (5) e as probabilidades de deslizamento. Para isto, seriam necessárias séries históricas de dados, correlacionando o comportamento temporal de NS com as ocorrências de deslizamento. Porém, não existe disponibilidade destes dados, pois eles precisam ser gerados experimentalmente. Por outro lado, não existe tempo suficiente, dentro do período disponibilizado para a pesquisa, que permita a geração confiável destas séries históricas.

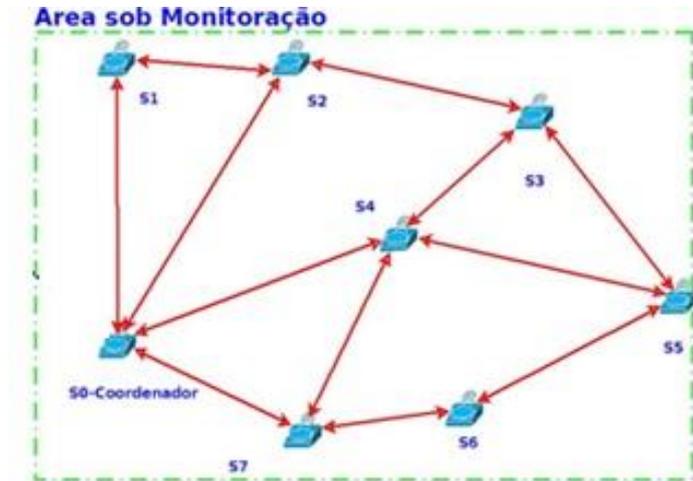
Deste modo, este trabalho de pesquisa se limita a construção do sensor multiparamétrico de solo, representado pela expressão (4), e da especificação inicial da rede integrada de sensores que agrega os dados dos diversos sensores espalhados pela encosta, para gerar o conjunto de dados representado pelo vetor NS definido em (5).

Finalmente, podemos definir uma representação matemática da encosta como um grafo matemático, onde as informações sobre o posicionamento relativos dos diversos sensores são associadas a arestas do grafo. Este grafo é chamado, neste trabalho, de Grafo Multiparamétrico de Solo e definido conforme a expressão abaixo:

$$GMPS(t) = (V=\{SMPS_i(t)\}, E = V \times V, DA: E \rightarrow R) \quad (6)$$

Onde  $V$  é o conjunto dos vértices do grafo que representa os sensores, através dos vetores  $SMPS_i(t)$ , enumerados e espalhados ao longo da encosta e  $E$  é o conjunto completo de arestas do grafo.  $DA(a)$  é definida como uma função que mapeia uma aresta  $a$  em um número real pertencente ao campo dos números reais  $R$ . Podemos fazer uma analogia do grafo  $GMPS(t)$ , definido em (6), considerando este objeto matemático como um análogo de uma fotografia da encosta, contudo no caso do  $GMPS(t)$  esta imagem da encosta carrega, segundo a nossa hipótese central de trabalho, toda a informação relevante para a previsão de deslizamento. Uma ilustração mostrando um típico grafo  $GMPS(t)$  pode ser visto na figura 16.

Figura 16 - Representação do Grafo GMPS(t) onde cada nó é representado por um nó sensor mutiparmétrio. Observe que o grafo é completo, mas apenas algumas arestas são representadas para evitar o congestionamento da figura.



Fonte: (esquema desenvolvido pelo autor da pesquisa)

Uma consideração final, de importante relevância para este trabalho, diz respeito à complexidade computacional envolvida.

Se considerarmos um conjunto razoável de arestas, para termos uma resolução espacial razoável, como por exemplo: 16 arestas ( $N=16$ ), a dimensão do vetor NS, definido em (4), será  $9 \times 16 = 144$ . Portanto, o vetor NS é um objeto que se move em um espaço real  $R^{144}$  de grande dimensão.

Considerando a complexa dinâmica dos processos de desestabilização do solo, concluímos que o tratamento global de uma estrutura de dados que represente o vetor NS poderá ter um custo computacional muito alto devido ao seu tamanho. Portanto, no projeto global da rede sensor, consideramos que deve ser levada em conta a possibilidade de processamento local dos sinais dos sensores individuais, de modo a reconhecer eventos localmente, a partir do processamento digital dos sinais e reconhecimento de padrões de sinais.

Se cada nó da rede sensor for capaz de reconhecer os eventos que são realmente significativos para a previsão dos deslizamentos, este nó só precisará informar por meio da emissão de pacotes na rede, sobre a ocorrência dos eventos reconhecidos, evitando que tenhamos na rede um fluxo intenso de dados. Isto, por

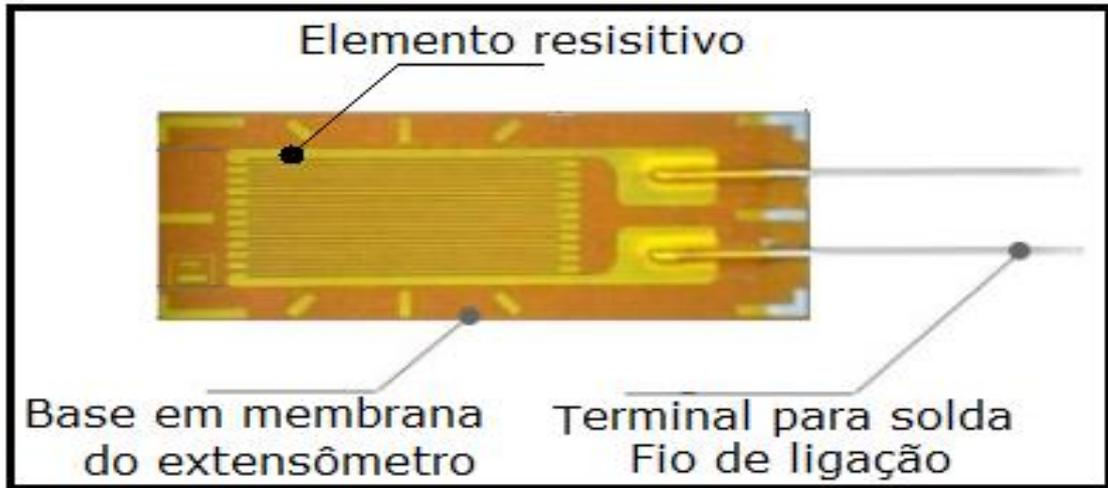
sua vez, reduz a largura de banda necessária, reduzindo o custo, permitindo uma redução do consumo de energia elétrica, por permitir que o sistema rádio transmissor e receptor possa ser desativado em boa parte do tempo do sistema, nos intervalos de tempo em que não existe a ocorrência de eventos.

A seguir vamos fazer uma descrição dos sensores individuais que foram escolhidos para a construção do sensor multiparamétrico de encostas. Estes sensores foram respectivamente escolhidos para a medição de deformação (straingage), medição dos vetores de aceleração nas três direções do espaço (acelerômetro e giroscópio), sensor de ondas acústicas (sensor piezo-elétrico) e o sensor de umidade (sensor de resistência do solo). As descrições são as seguintes:

(1) Straingage:

O Straingage é um sensor baseado em um elemento resistivo  $R_g$ , construído sobre um suporte plástico deformável, que pode se fixado na superfície de um corpo sólido. Quando o corpo sólido é submetido a uma força externa ele sofre uma deformação, dentro do seu limite de elasticidade, esta deformação promove a deformação do Straingage, que varia sua resistência elétrica  $R_g$ , a deformação sofrida pelo material sólido e conseqüentemente pelo Straingage, desta forma pode ser utilizado para medir as deformações sofridas pelo corpo sólido, a variação é proporcional a força aplicada ao corpo sólido, desta forma pode se concluir que pode calcular a força externa que foi aplicado ao corpo sólido, segundo Malerba *et al* (2008). Conforme figura 17.

Figura 17 - Modelo de estensômetro ou strain gage.



Fonte: (MALERBA *et. al*, 2008).

O strain gage deve ser colado na superfície do corpo que irá ser submetido a deformação para tanto deve seguir corretamente o processo de colagem. Quando uma força é aplicada a um corpo este sofre deformação que é respondida pela Strain Gage dentro da mesma proporcionalidade obedecendo à lei de Ohm conforme Equação 1.3:

$$R = (\rho \cdot L / A) \quad \text{Equação 1.3}$$

Onde:

$\rho$  = Resistividade do material;

$L$  = Comprimento do fio, e

$A$  = Área da seção transversal do condutor.

Um parâmetro que deve ser levado em consideração é o fator Gage ou fator K que indica a sensibilidade do strain gage sendo definida pela Equação 1.4 (COSTA 2001), fator este fornecido pelo fabricante:

$$FG = (\Delta R / R) / (\Delta L / L) \quad \text{Equação 1.4}$$

Onde:

$FG$  = Fator Gege;

$\Delta R$  = Variação da Resistência elétrica;

$R$  = Resistência elétrica do strain gage;

$\Delta L$  = Variação do comprimento da resistência elétrica;

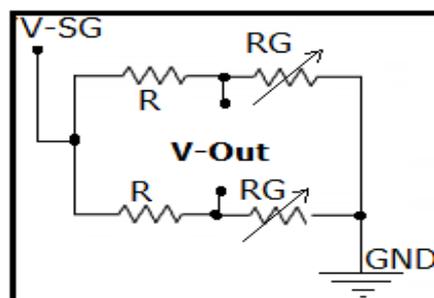
$L$  = Comprimento da resistência elétrica.

Outro parâmetro a ser considerado é o da temperatura, a qual faz o material sofrer uma dilatação, cuja variação de tamanho causa uma variação de sua resistência, como se fosse uma variação de uma tensão sobre o material que influencia no processo de medição e gera, por conseguinte, um falso positivo. Este fator não será considerado neste trabalho, pois se sabe como ele pode fornecer informações da temperatura do solo e informações dos movimentos internos, em função do amplificador e dos filtros no circuito de transdutância.

A ponte de Wheatstone, mostrada na Figura, é utilizada para converter a variação da resistência elétrica em variação de tensão elétrica na mesma proporcionalidade da força aplicada ao material. Esta ponte de Wheatstone, retirada do circuito de aquisição, apresenta os seguintes parâmetros: RG= resistores Strain Gauge, R= resistores que complementam a ponte, GND referencial zero, V-SG tensão de alimentação da ponte de Wheatstone e V-out a tensão de saída. A ponte de Wheatstone foi utilizada no circuito de aquisição de dados para melhorar a percepção das variações internas do solo.

A ponte de wheatstone revelada na Figura, é utilizada para converter a variação da resistência elétrica em variação de tensão elétrica na mesma proporcionalidade, cuja variação é proporcional à força que é aplicada ao material. Esta ponte de Wheatstone retirado do circuito de aquisição, onde RG= resistor Strain Gage, R= reistires que complementam a ponte, GND referencial zero, V-SG tensão de alimentação da ponte de Wheatstone e V-out a tensão de saída. neste caso foi trabalhado no circuito de aquisição da dados para melhorar a percepção das variações interna no solo.

Figura 18 - Modelo de ponte de Wheatstone.



Fonte: Gilmar Brito (2013)

### 1.6.2.1 Acelerômetro

Equipamento destinado para medir acelerações, os acelerômetros usam como princípio de funcionamento as duas primeiras leis de Newton: a primeira lei garante que todo corpo permanece em repouso até que uma força externa haja sobre ele (lei da inércia); a segunda lei afirma que uma força é o produto da massa pela aceleração, conforme a Equação 1.5.

$$F = m \cdot a \text{ (N)}$$

Equação 1.5

Onde:

$F$  = Força;

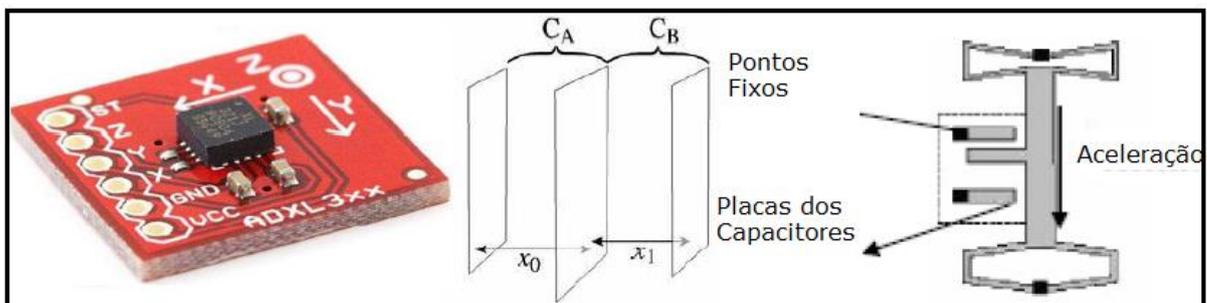
$m$  = Massa

$a$  = Aceleração

$N$  = Unidade de força.

A figura 19 representa um processo de estrutura interna de um acelerômetro como uma gangorra, ou pêndulo, a base de cristal de silício.

Figura 19 - Representação da estrutura interna do acelerômetro.



Fonte: Santos *et. al* (2012).

São vários os fabricantes e os tipos de acelerômetros, de diversas tecnologias, cada qual com aplicações diversas apresentando vantagens e desvantagens. Os acelerômetros mecânicos são os mais comuns e usam tecnologias do tipo capacitivo, piezoelétricos e piezoresistivos. Tais componentes foram substituídos por nova tecnologia da microeletrônica (MEMS) que utiliza silício como matéria prima e que explora suas propriedades mecânicas. São dispositivos capazes de detectar movimentos nos três eixos (x, y e z) com alta precisão e custo baixo, podendo monitorar diversas variáveis ao mesmo tempo, de forma confiável

rápida e automatizada Santos *et al.* (2012). O acelerômetro escolhido para este projeto foi o ADXL 321.

### 1.6.2.3 Giroscópio

Segundo Neisy (2010) e Oliveira, Silva e Barbosa (2013), giroscópio é um dispositivo que permite medir a velocidade de rotação de um objeto em torno do centro de rotação, que é conhecido como velocidade angular. A velocidade angular pode ser integrada em relação ao tempo, para determinar a posição angular do objeto. Dependendo da orientação, a rotação é medida em relação a um dos três eixos. A montagem de um sensor em determinada orientação permitirá escolher o eixo de medida, assim uma montagem múltipla de três estruturas permite analisar as medidas nos três eixos.

Continuando a afirmativa de Neisy (2010) e Oliveira, Silva e Barbosa (2010) de maneira geral, giroscópios de fabricação com tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) baseam-se do efeito de Coriolis, em que ocorre a transferência de energia entre dois modos principais de oscilação pela combinação de um movimento oscilatório de uma massa e a rotação do sistema que, pelo efeito de Coriolis, esse efeito parte do princípio que considere um objeto de massa  $m$  que se move a uma velocidade  $\mathbf{V}$  com relação a um sistema de referência fixo (plataforma), se esta plataforma gira a uma velocidade angular ( $\Omega$ ), o objeto experimentará uma força, denominada de força de Coriolis, e como consequência á aceleração de Coriolis, conforme as equações 1.6 e 1.7.

$$F_c = 2mv\Omega, \quad \text{Equação 1.6}$$

$$a_c = 2v\Omega, \quad \text{Equação 1.7}$$

Onde:

$F_c$  = Força de Coriolis;

$a_c$  = Aceleração de Coriolis;

$m$  = Massa;

$v$  = Velocidade;

$\Omega$  = Velocidade angular.

O princípio de funcionamento que detecta o deslocamento provocado na massa oscilante é conhecido como massa inercial ou massa de prova, em função da força de Coriolis ao ocorrer uma rotação ortogonal (para osciladores lineares) à oscilação.

#### 1.6.2.2 Sensor de Umidade

Para se medir o teor de umidade do solo pode-se utilizar processos diretos e/ou indiretos. Nos processos diretos o solo úmido é extraído de uma amostra e conduzido ao laboratório na qual se usam diferentes métodos de análise. O mais comum é o método da estufa em que a massa da amostra é aferida antes e depois da retirada da umidade por aquecimento. Nos métodos indiretos as medidas de umidade do solo são feitas em função das propriedades do solo relacionadas ao seu nível de umidade, por exemplo, sua condutividade. Um sensor de umidade, que opera por condutividade, mede a condutividade do solo e o apresenta como um parâmetro elétrico de saída. Os sistemas de transdução inferem o valor da umidade presente na amostra com base na intensidade da saída do sensor.

#### 1.6.2.3 Sensor Piezoeletrico

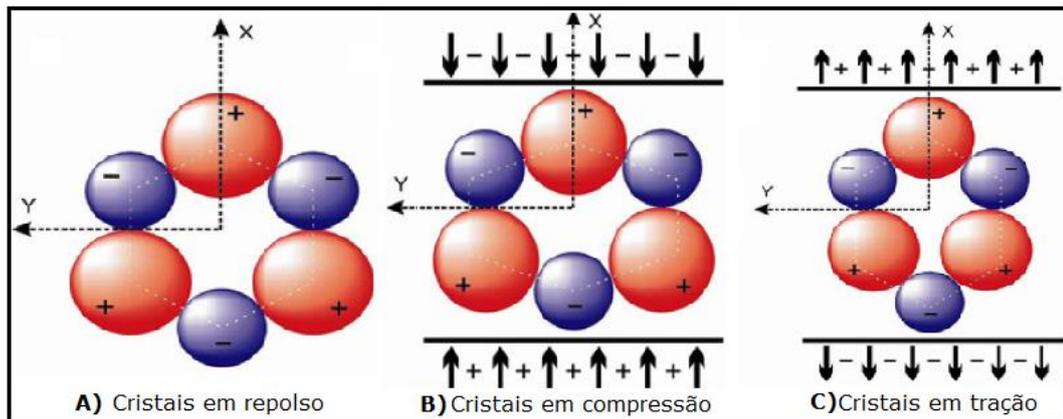
O efeito de piezoeletricidade foi descoberto pelos os irmãos Pierre e Jaques Curier, cujo primeiro trabalho foi defendido em 1880. O efeito piezoeletricidade é uma característica básica da maioria dos cristais, polímeros e cerâmicas, podendo ser definido comumente como: um material piezoeletrico é aquele que ao se aplicar uma tensão mecânica causa no seu interior uma movimentação eletrônica. Essa movimentação eletrônica interna se manifesta por meio de uma polarização elétrica ou através do surgimento de cargas elétricas na superfície do material. Portanto, pode-se dizer que o efeito piezoeletrico está intrinsecamente relacionado com a simetria dos cristais, sendo uma condição primordial para o seu surgimento é a de que os materiais das classes cristalinas não apresentem centro de simetria (ABEL; LUIZ, 2010).

Na figura 20 tem-se a exemplificação da mecânica dos cristais na qual na parte A, os cristais estão em repouso, na B, eles sofreram deformação e na C, houve um processo de tração. Isso mostra que o centro das simetrias das cargas

elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um bipolo.

O processo de contração e retração do material gera energia elétrica cuja aplicação de uma tensão elétrica possibilita a conversão em energia mecânica.

Figura 20 - Mecânica dos cristais que originam a formação de bipolo.



Fonte: (PEREIRA, 2010).

Para Pereira (2010), todo material possui propriedades, principalmente se for usado em tecnologias, com relação ao piezoelétrico temos: i) constante de carga piezoelétrica  $d$  (m/V ou C/N) - proporção entre a variação dimensional do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada em volts, ou entre a geração de cargas elétrica (em coulombs) e a força aplicada no material (em Newton); ii) constante de tensão piezoelétrica (V.m/N) - proporção entre a diferença de potencial gerado (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para o comprimento de um metro; iii) coeficiente de acoplamento  $K$  (adimensional) - mede a eficiência do material na transdução por conversão de energia elétrica em energia mecânica ou de energia mecânica em energia elétrica; iv) fator de qualidade mecânica  $Q$  (adimensional) - mede as perdas mecânicas (amortecimento) do material; v) temperatura de Curie  $T_C$  (°C) - temperatura em que a estrutura dos cristais sofre uma transição de fase podendo perder as propriedades piezoelétricas.

O sensor sônico usado nesta dissertação parte do princípio da piezoelétricidade dos quais são demonstraram resultados dentro da faixa que compreende as frequências menores que 20hz, chamadas de infrassônica ou subsônica, e não são capturadas pelos ouvidos humanos, embora possam ser

ouvidos por alguns animais, segundo Neli *et. al* (2006). Estes sons são de grande importância no processo de monitoramento de encostas e eventos sísmicos, como: i) erupção vulcânica, ii) movimento de placas tectônicas iii) movimento de massa, principalmente nos movimentos internos, antes do evento de maior potencial, por exemplo nos deslocamento de encostas. Portanto o sensor multiparamétrico deverá também ser capaz de trabalhar dentro do espectro de frequência subsônica. E consequentemente podendo contribuir no processo mitigatório na predição eventos como os descritos acima. A figura 21 representa uma sequência de eventos que imitem ondas infra-som, antes e durante o acontecimento tais como: i) estrada destruída por abalos sísmicos, ii) erupção vulcânica e iii) deslizamento de encostas.

Figura 21 - Sequência de eventos naturais em que a natureza emite frequência infrasônica.



Fonte: 1º e 2º (foto da esquerda para direita); Neli e Cavaleiro (2006); 3º foto (REDAÇÃO, 2013).

Neste projeto foi usado um sensor piezoelétrico cujos cristais polarizam ou sofrem deformações em função das vibrações mecânicas emitidas pelo solo, transformando-os em tensão elétrica. Posteriormente este sinal passa por um processo de amplificação e tratamento para ser então convertido em informações digitais e enviado por meio de rádios, assim como os sinais dos demais sensores aplicados desta dissertação.

#### 1.6.2.4 Rede de Sensores

Para Loureiro *et al.* (2003), ao longo dos últimos anos, com o avanço da microeletrônica, foram colocados a disposição no mercado diversos dispositivos móveis de computação que integram de forma compacta a capacidade local de

processamento, capacidade de comunicação em rede sem fio, capacidade de interface para diversos dispositivos sensores (com características de baixo consumo de energia), facilidade de programação e alta confiabilidade. Estes dispositivos permitem a construção das chamadas redes sensores que constituem sistemas embarcados onde cada elemento é posicionado em um ambiente utilizando fonte própria de alimentação, como bateria ou célula solar, sem a necessidade de redes físicas de conexão para a comunicação de dados e transmissão de energia para o seu funcionamento, segundo Beatrys *et al.* (2004).

Os grandes desafios na construção destes sistemas são: i) comunicação eficiente e segura dos dados até os pontos de tratamento; ii) consumo de energia otimizado para garantir que as fontes de alimentação, como baterias, possam ser utilizadas por períodos longos o suficiente para a viabilidade de aplicação.

O desafio acima citado tem sido enfrentado com o desenvolvimento de tecnologias de hardware e software para sistemas embarcados que englobam:

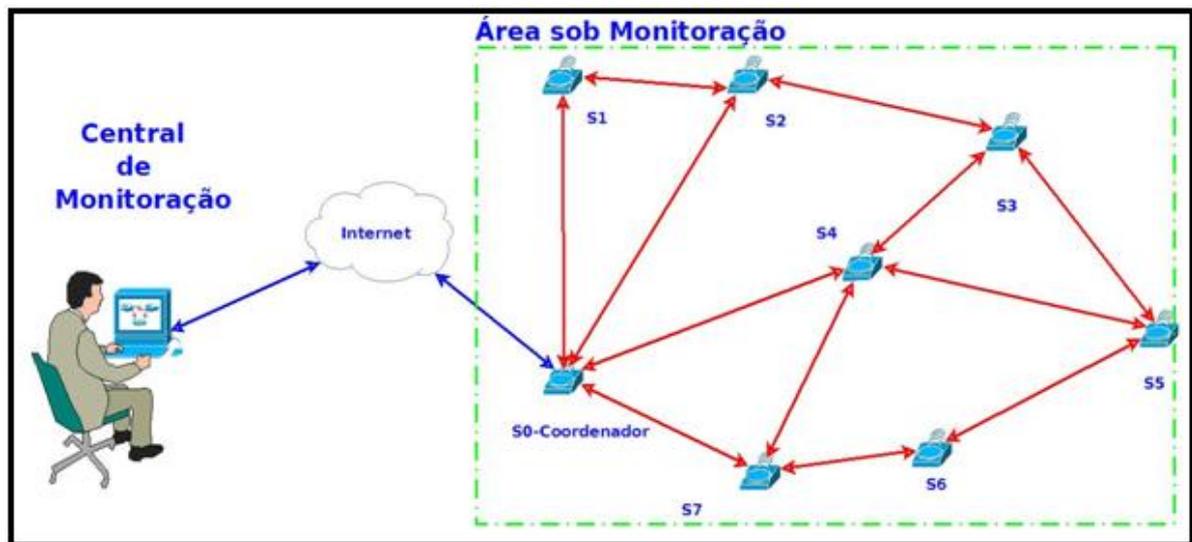
- i) componentes eletrônicos, sensores, processadores, memórias e interfaces de baixo consumo elétrico;
- ii) sistemas operacionais compactos e modulares que possam ser eficientemente configurados para a aplicação em questão, de preferência de domínio público;
- iii) protocolos de comunicação que visam aplicações “*low power*” (baixo consumo de energia);
- iv) esquemas de escalonamento da atividade de componentes integrantes do sistema sensor para que estes só consumam a energia no momento em que forem de fato necessários (FERNANDES; RAJA; ANTONY, 2001).

As tecnologias listadas no parágrafo acima já estão disponíveis e tornam estes dispositivos adequados em aplicações a qual o ambiente apresenta dificuldade para a construção de uma rede física de acesso ou distribuição de energia e dados para instalação dos elementos. Este é o caso do monitoramento das encostas na obtenção das informações que possam ser úteis no estudo e previsão de desabamento.

O modelo de monitoramento proposto quando em operação (em campo) deverá seguir uma estrutura de rede *ad hoc*, conforme ilustrada na figura 22. Em tal estrutura que cada sensor opera como um roteador possibilitando que a rede possua grande adaptabilidade as diferentes condições de propagação e que cada sensor

opere transmitindo em potência mínima, garantindo grande autonomia e baixo custo de energia (baterias). Os sensores de monitoramento de deslizamento do propósito final<sup>1</sup> (*End Device*), identificados na figura 21, como sendo os sensores de S1 a S7, integram uma rede auto roteada que encaminha os dados pela melhor rota até o sensor S0, que opera como ponto de acesso<sup>2</sup> (*AccessPoint*) à uma central de monitoração remotamente estabelecida – por definição em um centro de operações.

Figura 22 - Modelo de rede para implementação em campo – trabalhos futuros.



Fonte: (esquema desenvolvido pelo autor da pesquisa)

A tecnologia de roteamento está comercialmente consolidada em protocolos livremente disponibilizados pelos fabricantes de dispositivos, como a *Microchip* e a *Texas Instruments*. Existem, contudo, complexidades a serem mitigadas que fogem ao escopo deste trabalho é que melhor se adequam a trabalhos futuros desta pesquisa. Algumas dessas complexidades serão citadas no capítulo de conclusão.

<sup>1</sup> Dispositivos com função unicamente de sensoriamento.

<sup>2</sup> Dispositivo que cumpre além da função de sensoriamento a função de porta de comunicação (*gateway*) entre a rede e a central de monitoração.

## REFERÊNCIAS

ABEL, Ana Maria da Silva; LUIZ, Sandro Galisteu. **Sensores e Atuadores Piezoelétricos**. Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de Lorena – EEL. SP, 2010.

ALHEIROS, M.M.; FERREIRA, M.G.V.X.; LIMA FILHO, M.F. **Mapa geológico de Recife. Escala 1:25.000 com sinopse geológica**. Convênio Carta Geotécnica da Cidade do Recife. Finep-fndct/Isi-ufpe. 1995.

ALVIM, RICARDO. **Tecnologias para prevenção de deslizamentos de terra**. Blog oficial do curso de engenharia civil, da Universidade Estadual de Santa Cruz Departamento de Ciências Exatas e Tecnologias. 2011. Disponível em: <<http://engenhariacivildauesc.blogspot.com.br/2011/01/tecnologias-para-prevencao-de.html>>.

AMARAL, C. P. **Escorregamento em Encosta no Rio de Janeiro: Inventário, condicionantes Geológicos e Programa Para Redução dos Acidentes a Associados**. Departamento de Engenharia Civil, PUC – RJ, 230p. 1996.

ANDERSON, M. G.; POPE, R. G. **The incorporation of soil water models into geotechnical studies of landslide behaviour**. 4th Int. Landslide Symposium, Toronto: 349-353. 1984.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações e Deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro - Janeiro de 2011**. Disponível no site: [http://www.integracao.gov.br/pt/c/document\\_library/get\\_file?uuid=74dde46c-544a-4bc4-a6e1-852d4c09be06&groupId=10157](http://www.integracao.gov.br/pt/c/document_library/get_file?uuid=74dde46c-544a-4bc4-a6e1-852d4c09be06&groupId=10157)

BANDEIRA, ANA PATRICIA NUNES. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe-PE**. Tese de mestrado em engenharia civil, UFPE, Recife –PE, 233p. 2003.

BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe-PE**. Mestrado de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2003.

COELHO NETTO, A.L; AVELAR, A.S; LACERDA, W.A. Landslides and Disasters and Disasters in Southeastern and Southern Brazil”. In: Edgardo Latrubesse (Org.). **Natural hazards and human- exacerbated disasters in Latin America**. 1 ed. Amsterdam: Elsevier, v. 13, p. 223-243. (2009)

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. “Landslide Types and Processes”. In Landslides Investigation and Mitigation. A. Keith Turner, Robert L. Schuster, editors. Special

Report / Transportation Research Board, **National Research Council**, 247. Washington. p.36-75. 1996.

CUNHA FILHO, A. C. **Modelo Experimental Baseado na Declividade da Encosta para a Avaliação de Risco de Deslizamento**. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco, UNICAP. 2012.

DEFESA CIVIL DUQUE DE CAXIAS. **Redução de Desastre**. 2011. Disponível no site: Disponível em: <<http://defesacaxias.blogspot.com.br/2011/12/chuvas-de-verao-fique-ligado.html>> Acesso em: 14 dez. 2011.

DENISE M. S. Gerscovich. **Resistência ao Cisalhamento**. Faculdade de engenharia, Departamento de Estrutura e Fundações. Rio de Janeiro. 2010.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D.R. SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. **National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement, Technical Report**: 26p. (1998).

DIXON, Neil. Novos Sistemas de Alerta Preveem Deslizamentos de Terra e Chuvas Intensas. **Revista Fundações & Obras Geotécnicas**. 1981. Disponível em: [www.revistafundacoes.com.br/pdf/revista%2008/FOG8\\_oqhadenovo.pdf](http://www.revistafundacoes.com.br/pdf/revista%2008/FOG8_oqhadenovo.pdf). Acesso às 19:21 em: 12 abril, 2013.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; Greenberg, H. M. **Condicionantes eomorfológicos dos deslizamentos na encostas: Avaliação de metodologias e aplicação de modelos de previsão de áreas susceptíveis**. Revista Brasileira de Geomorfologia, 2 (1): 51-71. (2001)

FERREIRA, AURÉLIO BUARQUE DE HOLANDA. Verbetes: **sensor**. Mini aurélio: Minidicionário da língua portuguesa. Editora Positivo. 6 ed. Curitiba-PR. ISBN 978-85-7472-416-4. 896p. 2004.

FOLHA ON LINE. **Terremoto no Japão mata cinco e deixa 600 feridos**. 2007. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/mundo/ult94u312161.shtml>>. Acesso em: jan. 2013.

FONSECA, A. P. **Análise de mecanismo de escorregamento associados a voçorocamento em área da Bacia do Bananal (SP/RJ)**. Programa de Pós-graduação Eng. Civil COPPE/ UFRJ. 2006.

FRADEN, Jacob. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. Third Edition San Diego EUA –3rd ed. 589p. 2004.

GOERL, R. F. *et al.* **Elaboração e Aplicação de Índices de Fragmentação e Conectividade da Paisagem para Análise de Bacias Hidrográficas.** *Rev Brasileira de Geografia Física*, v. 05, p. 1000-1012, 2011.

GUIMARÃES, R.F. *et al.* **Parametarization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding:** application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, Amsterdam, v.69, p. 99-108, 2003.

GUSMÃO FILHO, J. A. *et al.* Parâmetros Geomecânicos dos Solos dos Morros de Olinda. In: **VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações** - COBRAMSEF, Vol. 1, pp 199-210. Porto Alegre-RS, 1996.

HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, Peter. **The Landslide Handbook - A guide to understanding landslides:** Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129p. 2008.

KOBIYAMA, Masato. **Metodologias de Mapeamento das Áreas de Riscos de Desastres Hidrológicos (inundações e escorregamentos).** Lab. de Hidrologia Dep. Eng. Sanitária e Ambiental Centro Tecnológico Univ. Federal de Santa Catarina EPAGRI Florianópolis. 2011.

LEÃO, Raimundo A. de O. *et al.* **Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de Sensores de umidade do solo.** *Eng. Agríc*, Jaboticabal, v.27, n.1, p.294-303, jan./abr. 2007.

LEROUEIL *et al.* Geotechnical characterization of slope movements. In: **International symposium of Landslides**, 7. Trondheim, 1996, Balkema, v.1, 74p. 1996.

LEROUEIL, S. *et al.* **Geotechnical characterization of slope movements. Invited Lecture**, 7th International Symposium on Landslides, Trondheim. Vol.1, p. 53-74. 1996.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife.** Dissertação de Mestrado. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife-PE. 2002.

LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife.** Dissertação de Mestrado. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife-PE. 2002.

MALERBA, P.C.C.; GUARNIERI, F.L.; BARROS, J. Aplicação da extensometria através do strain gage: Elaboração de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados computadorizado. Curso de engenharia elétrica- FEAU/UNIVAP, Instituto de Pesquisa e desenvolvimento-IP&D, UNIVAP, Empresa Brasileira de Aeronáutica EMBRAER, **XII encontro Latino de Americano de**

**iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de pós Graduação- Universidade do Vale do Paraíba (XII INIC, VIII EPG e II INIC Jr.) 2008.**

MEIJER, Gerard C.M. **Smart Sensor Systems**. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 78-0-470-86691-7. 411p. 2008.

MICHEL, Gean Paulo. **Estudo de Escorregamento na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC com os Modelos Shalstab e Inmap**. Curso de Graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. 2011.

MONTGOMERY, C.W. **Environmental geology**. 3 ed. Dubuque: Wm. C. Brown Publishers, 465p. 1992.

NEISY, Amparo Escobar Forhan. **Giroscopios MEMS**. Ministério de ciências e tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisa espaciais. INPE-16671-RPQ/848. 2010.

NELSON F. FERNANDES, RENATO F. GUIMARÃES, ROBERTO A. T. GOMES, BIANCA C. VIEIRA, DAVID R. MONTGOMERY e HARVEY GREENBERG. **Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis**. Revista Brasileira de Geomorfologia, Volume 2, Nº 1. 51-71. (2001).

OLIVEIRA, José Lopes de Oliveira. SILVA, Flávio Rogério da.; BARBOSA, Luis Filipe Wiltgen. Dispositivo inercial baseado em giroscópio para aplicação em robótica. **XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**. Universidade do Vale do Paraíba. 2013.

PEREIRA, Antônio Henrique Alves. **Cerâmicas Piezoelétricas: funcionamento e propriedades RT-ATCP-01**. São Carlos. Revisado e publicado, online em 1º março de 2010.

PICARELLI, L. **Discussion on the paper “The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks”** by Leroueil and Vaughan. Géotechnique, 41(2): 281–284. 1991.

RAMOS, Verônica Moreira et al. Aplicação do modelo shalstab, em ambiente arcview, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do quadrilátero ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 49-67, 2002. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/espacoegeografia/index.php/espacoegeografia/article/view/14/13>>. Acesso em: jan. 2013.

RICARDO LUIS BALEIRO. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para aquisição via internet de dados de dispositivos de campus em um ambiente *fieldbus***. Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo-SP. 2008.

ROSA FILHO, A.; CORTEZ, A. T. C. **A Problemática Socioambiental da Ocupação Urbana em Área de Risco de Deslizamento da "Suíça Brasileira"**. Revista Brasileira de Geografia Física 03. UFPE, p 33-40. 2010.

RUIZ, Lennyer Beatrys. **MANNA: Uma Arquitetura para Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio**. Tese de doutorado do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

SANTOS, Antonio Fernando Moura. et al., Aplicação de acelerômetros de baixo custo em sistemas automatizados de medição. **Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia**, 2012.

SILVA, MARILIA MARY DA. **Estudo Geológico - Geotécnico de uma Encosta Com Problemas de Instabilidade no Município de Camaragibe – PE**. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2007.

SKEMPTON, A.W., PETTLEY, D.J. The strength along structural discontinuities of stiff clays. **Geotechnical Conference**, v.2, pp,29-46. Oslo. 1967.

TERZAGUI, K. **Mecanismo de escorregamento de terra**. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1967, 41 p., il. (1950)

VANACÔR, Roberto Numes. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao processamento das áreas susceptíveis a movimento de massa na região nordeste do estado Rio Grande do Sul**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul centro estadual de pesquisa em sensoriamento Remoto e meteorologia, Pós graduação em sensoreamento remoto. Porto Alegre-RG. 2006.

VARGAS, Jr. E., COSTA FILHO e PRADO CAMPOS, L. E., **A Study of the Relationship Between the Stability of Slopes in Residual Soils and Rain Intensity**. International Symposium on Environmental Geotechnology, Leigh, pp.491-500. (1986).

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In Special Report 176: Landslides: **Analysis and Control**, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp. 11-33. 1978.

WILSON, Jon S. **Sensor Technology Handbook**, editora Newnes is an imprint of Elsevier. Arizona EUA. V ISBN: 0-7506-7729-5. 691p. 2005.

## **2 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR MULTIPARAMÉTRICO**

## **RESUMO**

Desenvolvimento e caracterização de um sensor multiparamétrico composto por uma haste de aço inoxidável na qual foram introduzidos os seguintes sensores: i) sensor Strain Gage; ii) sensor piezoelétrico; iii) sensor acelerômetro de três eixos, iv) sensor de umidade. Neste trabalho também foi desenvolvido uma rede sem fio a qual serve ao sensor multiparamétrico na transmissão de sinal a uma estação de monitoramento.

Palavra chave: monitoramento, rede sem fio, encostas, deslizamentos.

## **ABSTRACT**

Development and characterization of a sensor multiparamétrico composed of a stainless steel rod which were introduced in the following sensors: i) Strain gage sensor, ii) piezoelectric sensor, iii) three-axis accelerometer sensor, iv) the humidity sensor. This work was also developed a wireless network which serves the multiparameter sensor in the transmission signal to a monitoring station.

Keyword: monitoring, wireless network, slopes, landslides.

## 2.1 Introdução

- Processo de monitoramento de solo e tecnologias de sensores

Nos processos de monitoramento de encostas, segundo Rosi *et al.* (2010), a prática normalmente empregada pelas autoridades é a utilização de sistemas de computação de alto desempenho (supercomputador) com capacidade de processamento de informação digitalizada sobre os territórios, sendo os dados obtidos por meio de estações de coleta de dados, como radares meteorológicos que podem ditar o encharcamento do solo, previsão por satélite, pluviômetros que captam o volume da chuva, entre outros sistemas. Essas soluções, apesar de importantes, não conseguem resolver os problemas gerados pelos fenômenos de deslocamento de solos, segundo Reckziegel (2012).

Uma provável explicação é que estes sistemas de monitoramento analisam e geram parâmetros sobre as condições dos solos em regiões muito vastas em uma escala de tempo que torna complicada a previsão mais precisa dos locais e momentos em que vai ocorrer o deslizamento de encostas. Essas informações devem ser encaminhada uma rede sem fio com protocolo confiável e segura segundo Loureiro (2003). Deste modo, existe atualmente o interesse pelo estudo de sistemas que permitam um monitoramento mais detalhado das condições de terrenos em escala menor, e com respostas em tempo real.

Como parte desta dissertação, foi determinado um conjunto mínimo de sensores, de modo a cobrir os parâmetros de interesse e que tenham as características adequadas para o tipo de aplicação, principalmente quanto a otimização de custo, consumo de energia e qualidade dos dados gerados.

## 2.2 Modelo de Simulação de Chuva

Um dos pioneiros na construção de simuladores de chuva, para fins de pesquisa sobre erosividade em laboratórios, foi Budenzer e Meyer (1965), ele relata em artigo a importância deste tipo de equipamento nos trabalhos para obtenção de dados sobre escoamento superficial e erosão em pequeno espaço de tempo.

Os simuladores de chuvas são classificados segundo Morin, Goldberg e Seginer *et al* (1967) em dois tipos: i) simuladores construídos com gotejadores e ii) simuladores construídos com aspersores.

O simulador de chuva desenvolvido nesta dissertação é do tipo aspersor e de acordo com os conceitos anteriormente apresentado, e mostrado na figura 23. Este simulador será apresentado com maiores detalhes no capítulo 3.

Figura 23 - Simulador de Chuva Desenvolvido.



Fonte: (Imagem capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

### 2.3 Modelo de Monitoramento

Para, Highland e Bobrowsky (2008), o sensoriamento remoto pode auxiliar na prevenção de desastres naturais, especificamente nos movimentos de massa, a partir de duas finalidades: i) Criação de um inventário de solos e eventos associados; ii) mapeamento dos fatores que estão associados aos movimentos tais como litologia, conjunto geomoforológico, uso da terra, estrutura, vegetação, altura e declividade.

O desenvolvimento de sistemas com capacidade de sensoriamento e processamento local de sinais provenientes de encostas, associados aos levantamentos disponibilizados por meio de sensoriamento remoto, poderão vir a contribuir para a melhoria dos sistemas de monitoramento.

Para que o sensor multiparamétrico possa exercer as suas funções se faz necessário caracterizá-lo, ou seja, devem-se estimar as suas respostas e compará-las com as de outros modelos existentes ou com as curvas de respostas dos sensores.

## 2.4 Metodologia e Caracterização dos Sensores

### 2.4.1 Sensor de Umidade do Modelo Proposto

O sensor de umidade do modelo proposto é caracterizado por duas hastes de aço inoxidável (eletrodos) com uma extremidade pontiaguda, medindo 250mm de comprimento e 3mm de diâmetro, inserido em um tubo de PVC de 25mm de diâmetro e 50mm de comprimento, sendo o espaço entre as hastes de 30mm e a parte interna do cano preenchida com massa DUREPOX. Um circuito eletrônico foi confeccionado em uma placa de fibra de vidro, constituída por um transistor BC 337 e dois resistores de  $10\Omega$ , sendo um deles, com uma das extremidades ligada ao emissor do transistor, de onde sai o sinal de leitura de umidade e a outra extremidade ligada ao terra (*GND*).

A base do transistor está ligada a um dos eletrodos que vai receber o sinal irradiado por um campo elétrico formado pelo segundo eletrodo que será alimentado por uma tensão elétrica de cinco volts, possuindo um resistor de  $10\Omega$  ligado em série, cuja função é limitar a corrente elétrica. Estes cinco volts também é ligado ao terminal do coletor do transistor. Pode-se concluir que o sinal de saída será função do percentual de umidade do solo, quanto mais úmido melhor a condução elétrica entre os eletrodos no solo e portanto, maior o sinal de saída e maior o percentual de água no solo. Como as características fisicoquímicas do solo mudam os valores de resistência elétrica do mesmo, desta forma para cada tipo de solo deve ser feita uma calibração do sensor, para que possa ter precisão da informação (leitura) obtida.

Para o processo de calibração do sensor os seguintes equipamentos foram utilizados: um multímetro Tenma modelo 72-7720 categoria III e uma fonte de alimentação elétrica Power Supply modelo 18135, com ajuste de tensão elétrica e corrente elétrica. Para essa aplicação foi ajustada a tensão elétrica em cinco volts. Uma balança de precisão Kern modelo 44-45, peso máximo 500g e  $d = 0,1g$ , uma estufa com variação de temperatura de 0 a  $250^{\circ}C$ , e vasilhames de alumínio para conduzir a amostra à estufa para esterilização ICAMO, modelo 3, com variação de temperatura de  $50^{\circ}C$  a  $300^{\circ}C$ , e vasilhame de plástico utilizado para efetuar as medições das devidas tensões elétricas do sensor, introduzido na amostra a ser analisada, conforme figura 24.

Figura 24 - balança de precisão, fonte ajustável de 0 a 30V, multímetro e cuba de porcelana.



Fonte: (imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

O solo a ser analisado foi conduzido à estufa por 24 horas. Após este tempo a amostra foi resfriada e 2 kg foram desturreados e colocados numa cuba de porcelana, e retiradas porções em uma vasilha de plástico e compactada em cinco camadas com pilão de 400g a 8cm ± 2cm de altura. Em seguida foi introduzido o sensor na amostra e efetuada a leitura com a amostra a 0% de umidade. Neste caso observou-se uma tensão elétrica de 0,029V, cujo valor refere-se ao solo com 0% de umidade. Foi pesado 100g deste mesmo solo e reconduzido a estufa por mais 12 horas. Após esse tempo pesou-se novamente a amostra, retirou-se a tara e fez-se a diferença entre solo seco e solo úmido para obtenção do percentual de umidade, conforme a Equação 2.1. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras por meio da equação seguinte:

$$h(\%) = \frac{Pa}{Ps} \times 100 \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

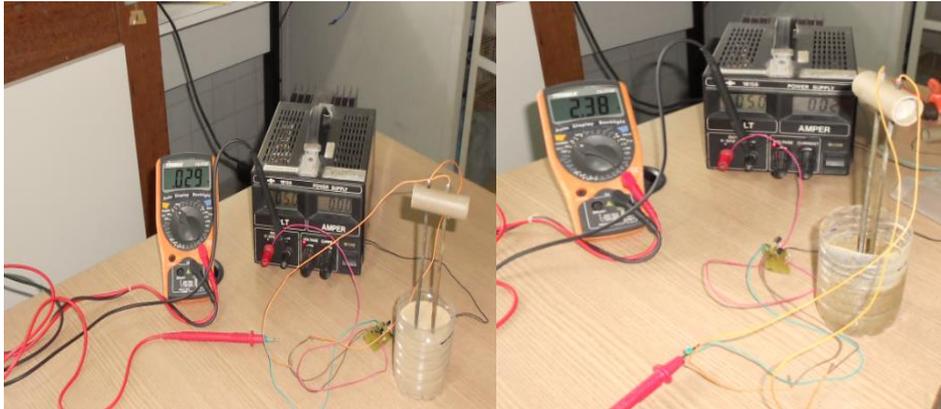
$h$  = Teor de umidade do solo. Em %

$Pa$  = Peso da água, em g ( $Pa$  = peso bruto úmido – peso bruto seco)

$Ps$  = Peso do solo seco, em g ( $Ps$  = peso bruto seco – peso da cápsula)

Em seguida foi realizada a calibração do ponto de saturação por meio do preenchimento da vasilha de plástico com água e a introdução do sensor. O valor medido da tensão de saída de 2,38V correspondente ao solo considerado saturado. Conclui-se que o valor da tensão pode variar entre 0,029V a 2,38V correspondendo, respectivamente, a 0% e 100% de umidade do solo, conforme mostra a figura 25.

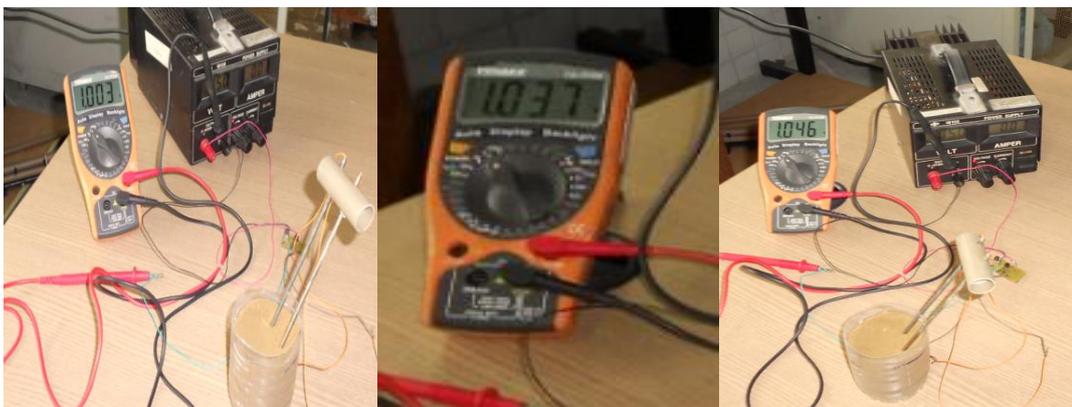
Figura 25 - sendo a primeira com umidade a 0%, e a segunda 100%.



Fonte: (imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

Para se obter valores de medidas de umidade de solo que possam fazer uma correlação entre diversos valores de umidade, a cada pesagem, 40ml de água (duas seringas de 20ml) foram acrescentadas, esta amostra foi homogeneizada manualmente numa cuba, conforme mostra a figura 24. Esse processo de medição se refez a cada acréscimo de água, dentro das mesmas características descritas anteriormente. A figura 26, ilustra como esse processo ocorre: os registros das leituras no multímetro, a vasilha de plástico com a amostra de solo e o sensor (eletrodos) introduzidos na amostra.

Figura 26 - Sequência de medição de tensão como respostas ao percentual de umidade do solo.



Fonte: (imagens capuradas durante o desenvolvimento da pesquisa)

As medidas de tensão obtidas foram associadas aos resultados obtidos pelo processo de medição de umidade pelo método da estufa e traçada a curva de

comparação, ficando a cargo do software desenvolvido para atender esse requisito fazer a conversão das leituras de tensão elétrica em percentual de umidade. Esse sensor posteriormente substituiu as duas hastes por dois anéis colocados no final do sensor multiparamétrico, com o objetivo de detectar a umidade a pelo menos 1,5m de profundidade, local atingido pelo sensor.

#### 2.4.2 Sensor Strain Gage

O Strain gage é um resistor variável fixado sobre uma membrana. A sua resistência varia em função do movimento natural da estrutura que o suporta (haste no caso). Essas vibrações são função das ondas produzidas pelo deslocamento do solo, que alcançam o Strain gage e as convertem em sinais elétricos de mesma proporcionalidade Faruolo (2005). Observa-se que, tendo como propriedade a lei de Ohm, segundo Boylestard (2004), os seguintes parâmetros são definidos na Equação 2.2:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

$R$  = resistividade do condutor;

$\rho$  = coeficiente de resistividade do condutor;

$L$  = comprimento do condutor;

$A$  = área do condutor.

Para Faruolo *et al.* (2005), essa propriedade aplicada ao strain gage, mostra que  $R$  é diretamente proporcional ao comprimento do condutor, ou seja quanto maior for o movimento da haste, no qual o sensor foi colado, maior será o comprimento do condutor no qual o strain gage foi confeccionado. Lima *et al.* (2008) coloca que essas micro variações, não perceptíveis ao ser humano, apresenta uma resistência da ordem de micro Ohms ( $\mu\Omega$ ) e, conseqüentemente, variações de tensão da ordem de micro volts ( $\mu V$ ). O strain gage passa a fazer parte do circuito que compõe a ponte de Wheatstone, alimentado eletricamente por uma fonte de tensão de precisão, da linha instrumental, em função das micro-variações de tensão e da precisão que o circuito exige, cuja função é converter essas variações em tensão elétrica com as mesmas propriedades e precisão. Estes sinais de tensão

serão conduzidos ao circuito de amplificação, formado por amplificadores operacionais de baixo nível de ruído e de linha instrumental.

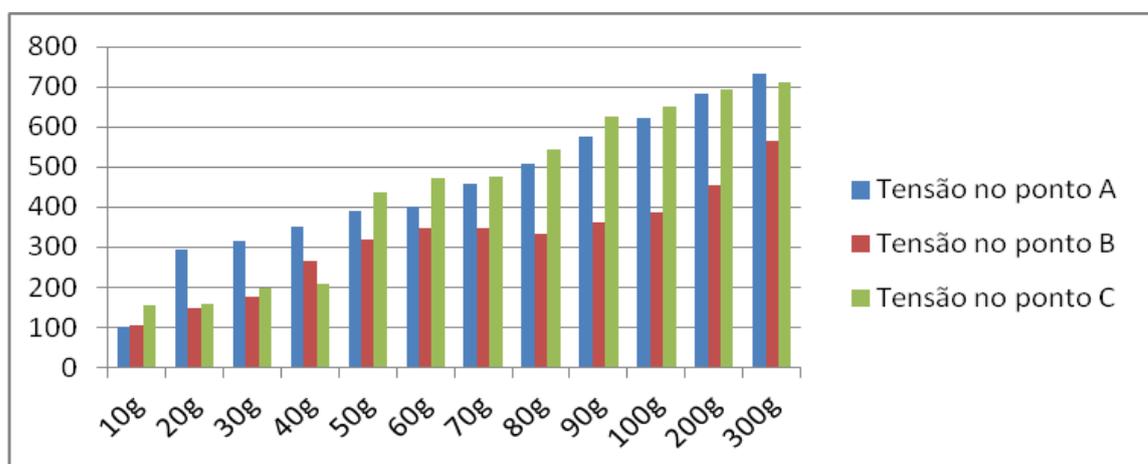
Para caracterização do strain gage no processo de construção do sensor multiparamétrico foram efetuadas 660 medidas por meio de análise. Neste processo optou-se pela utilização de barras de aço cortadas em diversos tamanhos, pesados em balança de precisão (Randwag modelo PS 3500/C/2 peso máximo 3500g, peso mínimo 0,5g,  $d = 0,01g$  e  $e = 0,1g$  nas ordens de: 10g, 20g, 30g, 40g, 50g, 60g 70g, 80g, 90g, 100g, 200g e 300g. Esses valores mostram variações dos valores das respostas em função dos pesos há uma altura de 25 cm, conforme representados na tabela 4 e gráfico 1 e altura de 50cm na tabela 2.2 e gráfico 2 respectivamente.

Tabela 4 - Strain Gage com Relação ao Peso Deixado Cair a 25cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida.

Peso em grama	10g	20g	30g	40g	50g	60g	70g	80g	90g	100g	200g	300g
Tensão no ponto A	113	301	328	347	405	436	489	524	599	640	733	825
Tensão no ponto B	111	230	292	377	399	409	421	433	494	522	557	589
Tensão no ponto C	148	164	190	228	377	455	479	501	576	656	703	744

Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 1 - Representa os resultados do Strain Gage, com peso caindo a 25cm de altura na amostra.



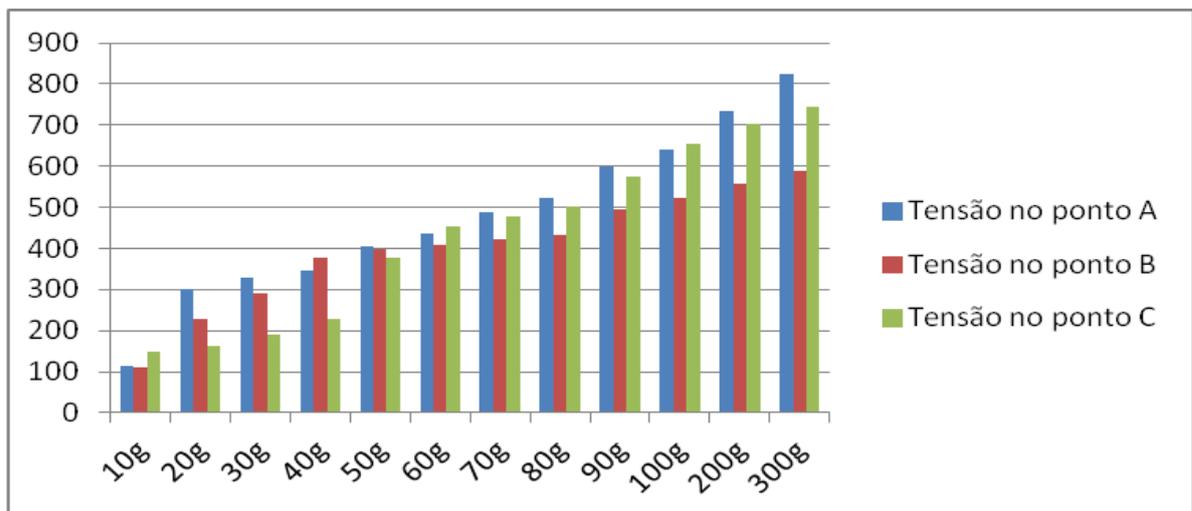
Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Tabela 5 - Strain Gage com Relação ao Peso Deixado Cair a 50cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida

Peso em grama	10g	20g	30g	40g	50g	60g	70g	80g	90g	100g	200g	300g
Tensão no ponto A	113	301	328	347	405	436	489	524	599	640	733	825
Tensão no ponto B	111	230	292	377	399	409	421	433	494	522	557	589
Tensão no ponto C	148	164	190	228	377	455	479	501	576	656	703	744

Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 2 - Representa os resultados do Strain Gage, com peso caindo a 50cm de altura na amostra.



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Os valores das tensões elétricas obtidas na tabela são a média de cinco valores de medidas obtidas com o multímetro Amprobe modelo 34XR-A, true RMS, Cat II 1000V, e cat III 600V, na escala de tensão elétrica alternada (AC) e observado no osciloscópio Tektronix modelo TDS 1001B, 2 canais, e frequência de 40Mhz e base de tempo 50Ms/s. O multímetro foi ligado em paralelo com o osciloscópio, podendo ser visto os equipamentos monitorando, conforme a figura 27.

Figura 27 - Interação com os equipamentos no Processo de análise do solo.

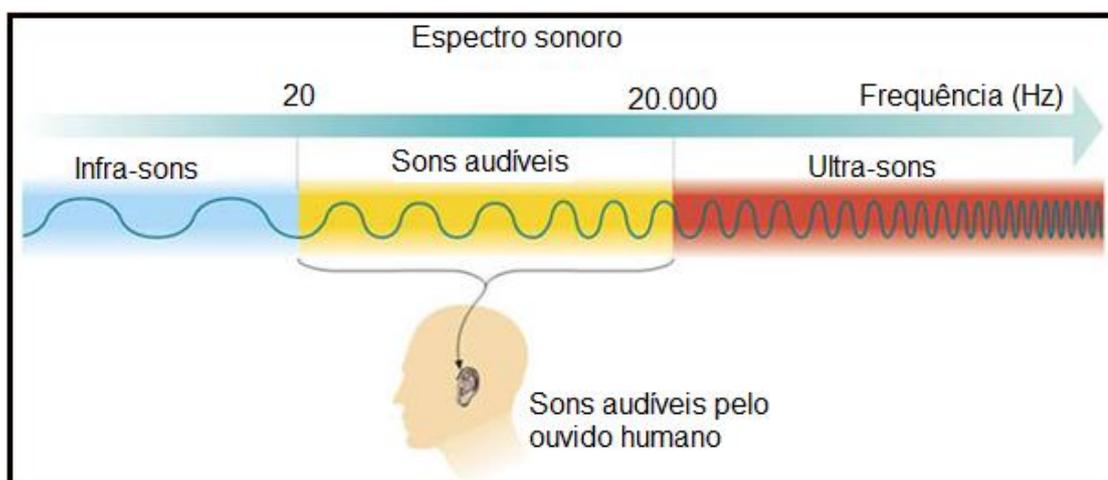


Fonte: (imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

#### 2.4.3 Sensor de som

Para Sampaio e Calçada (2005), as ondas sonoras são longitudinais, e se propagam num meio material, seja este sólido, gasoso ou líquido. Elas são fonte de estudos científicos em diversas áreas como: tratamento acústico ambiental, no diagnóstico de patologias, na fisiologia da fonação e audição, nas previsões de eventos naturais e outras fontes de estudos. A figura 28, representa o espectro de frequência sonora, inclusive a faixa de infra-sons, a qual é perceptível pelo sensor de som empregado nesta dissertação.

Figura 28 - Espectro de frequência sonora.



Fonte: (NELI, CAVALEIRO, 2006).

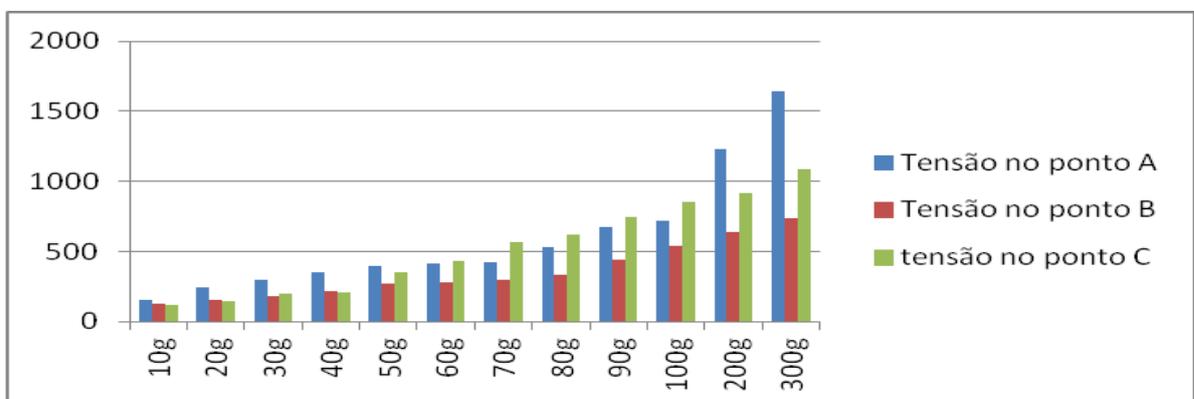
Sensor de som é construído a base de cristais de silício, e apresenta características como faixa de resposta a frequência dentro da faixa sonora. Para caracterização do sensor de som, nesta dissertação, o seguinte procedimento foi utilizado: i) foram fixados dois sensores piezoelétricos na haste (sensor multiparamétrico), sendo um de um lado e o outro fisicamente defasado de  $180^\circ$ , ligados em paralelo. ii) Foram realizados testes com o sensor sônico usando-se a mesma metodologia aplicada ao strain gage, os mesmos pesos, obtendo-se uma tabela com respostas dos sinais produzidos para altura de 25cm, conforme representados na tabela 6 e gráfico 3, e para a altura de 50cm conforme representado na tabela 7 e gráfico 4, respectivamente.

Tabela 6 - Sensor de Som com Relação ao Peso Deixado Cair a 25cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida

Peso em grama	10g	20g	30g	40g	50g	60g	70g	80g	90g	100g	200g	300g
Tensão no ponto A	157	240	297	348	397	414	420	526	678	718	1230	1638
Tensão no ponto B	125	151	184	218	268	283	299	332	444	5540	634	741
tensão no ponto C	116	148	194	206	348	433	569	624	744	849	920	1083

Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 3 - Sensor de Som com Relação ao Peso Deixado Cair a 25cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida.



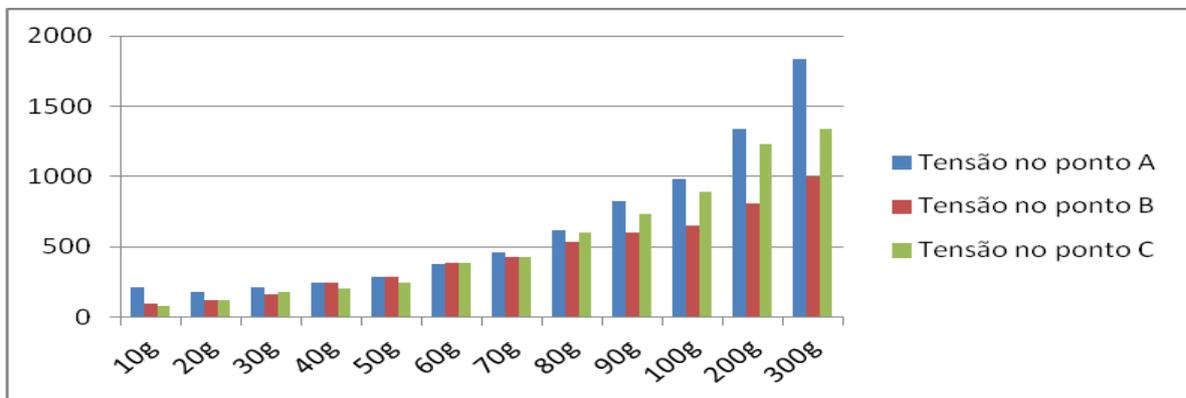
Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Tabela 7 - Sensor de Som com Relações do Peso Deixado Cair a 50cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida.

Peso em grama	10g	20g	30g	40g	50g	60g	70g	80g	90g	100g	200g	300g
Tensão no ponto A	211	178	215	245	286	380	459	615	825	978	1340	1832
Tensão no ponto B	98	123	162	248	286	385	426	533	597	647	811	998
Tensão no ponto C	83	117	178	204	245	382	431	601	730	889	1232	1341

Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

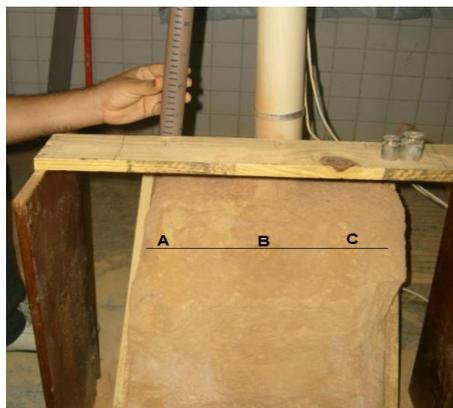
Gráfico 4 - Sensor de Som com Relação ao Peso Deixado Cair a 50cm de Altura no Solo em Análise com a Tensão Elétrica Produzida



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Os pesos foram soltos em três pontos (A, B e C) no centro da parte inclinada da amostra, e os pesos foram liberados a uma altura de 25cm e 50cm efetuando-se medida por medida. Os valores foram observados no osciloscópio, conforme figura 29.

Figura 29 - Detalhe da altura em que os pesos foram deixados cair.



Fonte: (imagens fotografadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

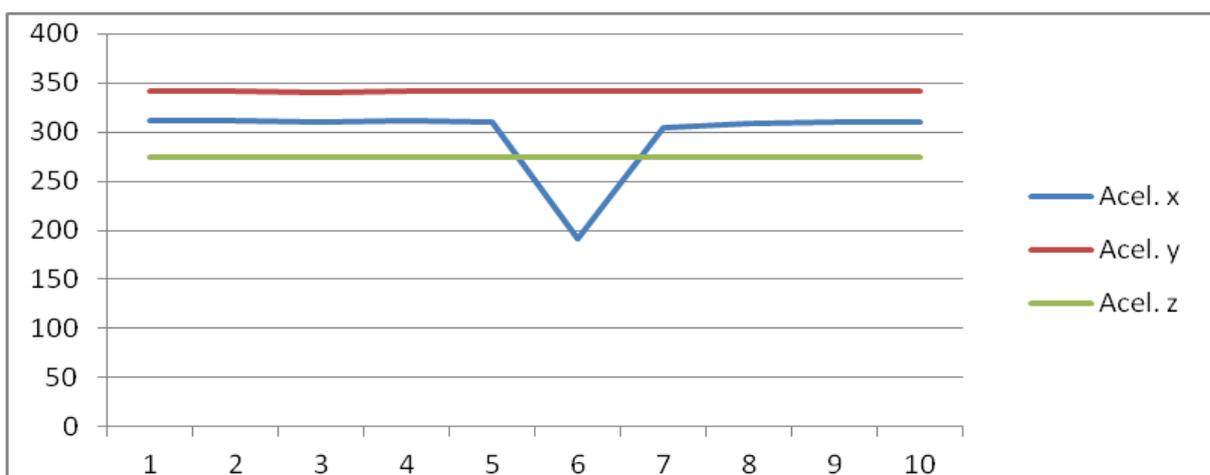
#### 2.4.4 Sensor acelerômetro

O acelerômetro de 3 eixos, dispositivo a base de cristal pode identificar a inclinação dos eixos X, Y e Z. Porém, como o acelerômetro não fornecer com precisão resultado em graus, usa-se outro componente denominado giroscópio, cuja função é complementar estes resultados. Desta forma obtém-se resultados de inclinação em graus e de aceleração  $\text{ms}^{-2}$ .

Neste trabalho não se fez uso do giroscópio, preocupando perceber as vibrações sem levar em consideração a exatidão e o ângulo de deslocamento. Neste caso não foi feita apenas observações com relação ao nível de intensidade do sinal em função do impacto apresentado. A principal função do acelerômetro é apresentar redundância aos demais sensores conforme mostrado nos gráficos.

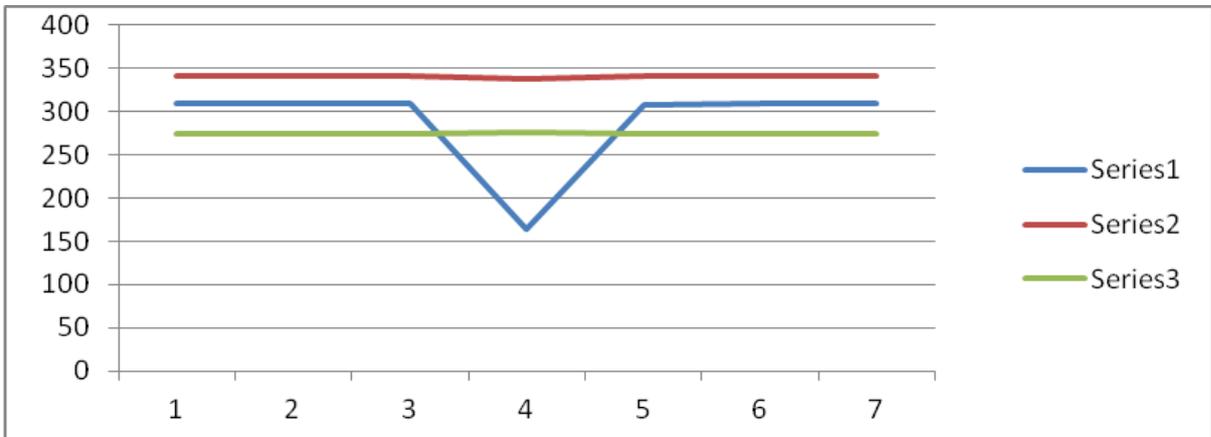
Foram realizados três testes com o acelerômetro, usando três barras de ferro de 10g, 20g e 30g, deixadas cair a uma altura de 25cm, obtendo a leitura nos gráfico 5, gráfico 6 e gráfico 7, respectivamente. Percebe-se variações graduais proporcionais ao impacto dos respectivos pesos deixados caírem na amostra, sendo a variação acentuada no sinal do eixo X, talvez em função da forma na qual ele foi colocado na haste, ficando para trabalhos futuros a continuação destes experimentos.

Gráfico 5 - Resposta do acelerômetro aos impacto de um peso de 10g deixados cair a uma altura de 25cm.



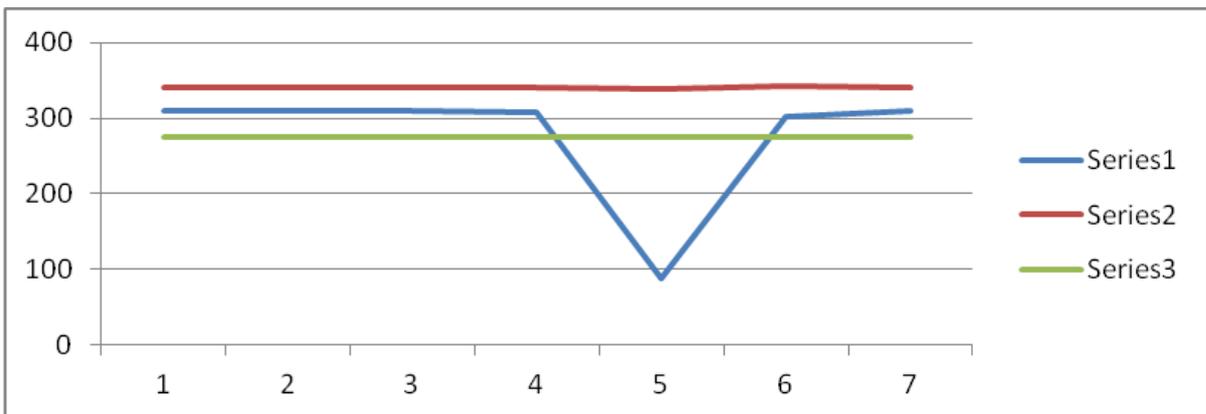
Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 6 - Resposta do acelerômetro aos impacto de um peso de 20g deixados cair a uma altura de 25cm.



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

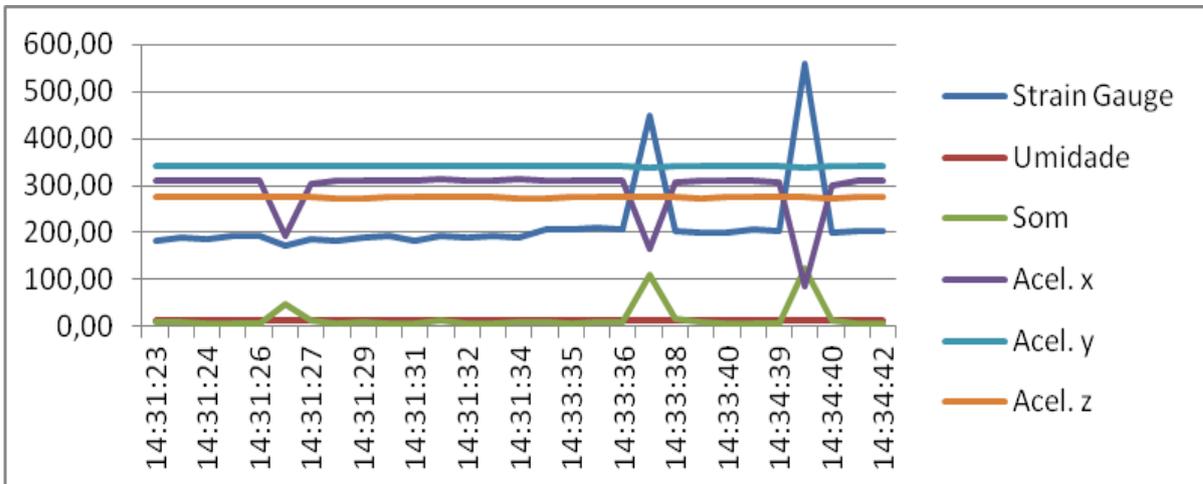
Gráfico 7 - Resposta do acelerômetro aos impacto de um peso de 30g deixados cair a uma altura de 25cm.



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Outro ensaio foi realizado com o acelerômetro, usando-se uma barra de ferro pesando 40g, amarrado a um barbante de 40cm de comprimento, segurado a uma barra de madeira perpendicular ao piso, ao lado da amostra, esticada e formando um ângulo de 45° com relação a amostra, e solto, este peso chega ao encontro da amostra com uma velocidade e uma energia. Esse procedimento foi efetuado em cada um dos lados da amostra com os resultados apresentados no gráfico 8.

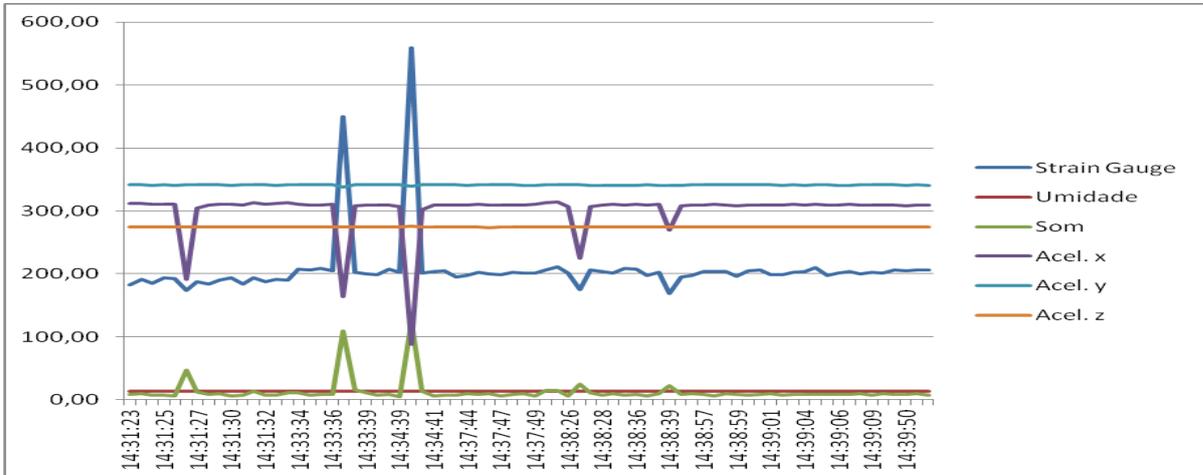
Gráfico 8 - Série de resultados com pesos de 40g batendo no lado direito da amostra.



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

O gráfico 9, representa todos os sinais lidos pelos sensores que compõem o sensor multiparamétrico, podendo ser analisados todos os parâmetros das ocorrências no interior do solo, cabendo a um sistema (software) gerenciar e orientar na obtenção das informações. As informações geradas foram obtidas por meio de pancadas aplicadas na amostra por meio de diferentes pesos. Essas pancadas foram refletidas no sensor strain gage, com o sinal na cor azul escuro; no sensor de som, com o sinal na cor verde; no acelerômetro com ênfase no eixo X, na cor lilás; e micro variações nos eixos Y e Z. O sinal do sensor de umidade representado na cor vermelha permanece constante, pois não houve variação da umidade durante esses ensaios, a qual foi mantida em torno de 14%, comprovado com o método estufa com uma margem de erro de  $\pm 5\%$ , a qual nesse primeiro momento atende aos interesses do processo.

Gráfico 9 - Representação dos sinais do sensor multiparamétrico num processo de deslizamento de encostas.

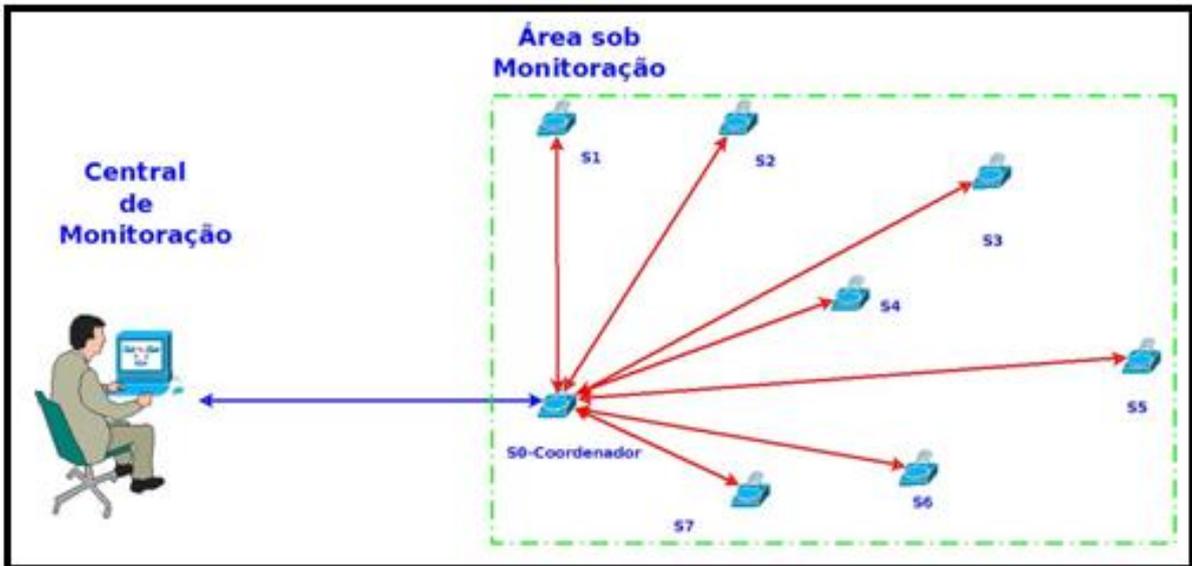


Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

### 2.5 Redes de Sensores

Neste trabalho a rede foi construída em uma estrutura ponto a ponto (*peer-to-peer*), em que só existirão sensores de propósito final (*End Devices*) transmitindo diretamente para um elemento de acesso (*Access Points*) à central de monitoração. A figura 30 ilustra a rede implementada.

Figura 30 - Modelo de rede implementado.



Fonte: (esquema desenvolvido durante a pesquisa)

### 2.5.1 Sensor de Ponto de Acesso

O Sensor de Ponto de Acesso compreende um Sensor de Encosta com capacidade de comunicação serial via USB com microcomputadores PC compatíveis. Seu *Firmware (Software Embutido)* possui funcionalidades extras para a comunicação com a central de monitoramento e supervisão da rede.

### 2.5.2 Central de Monitoramento

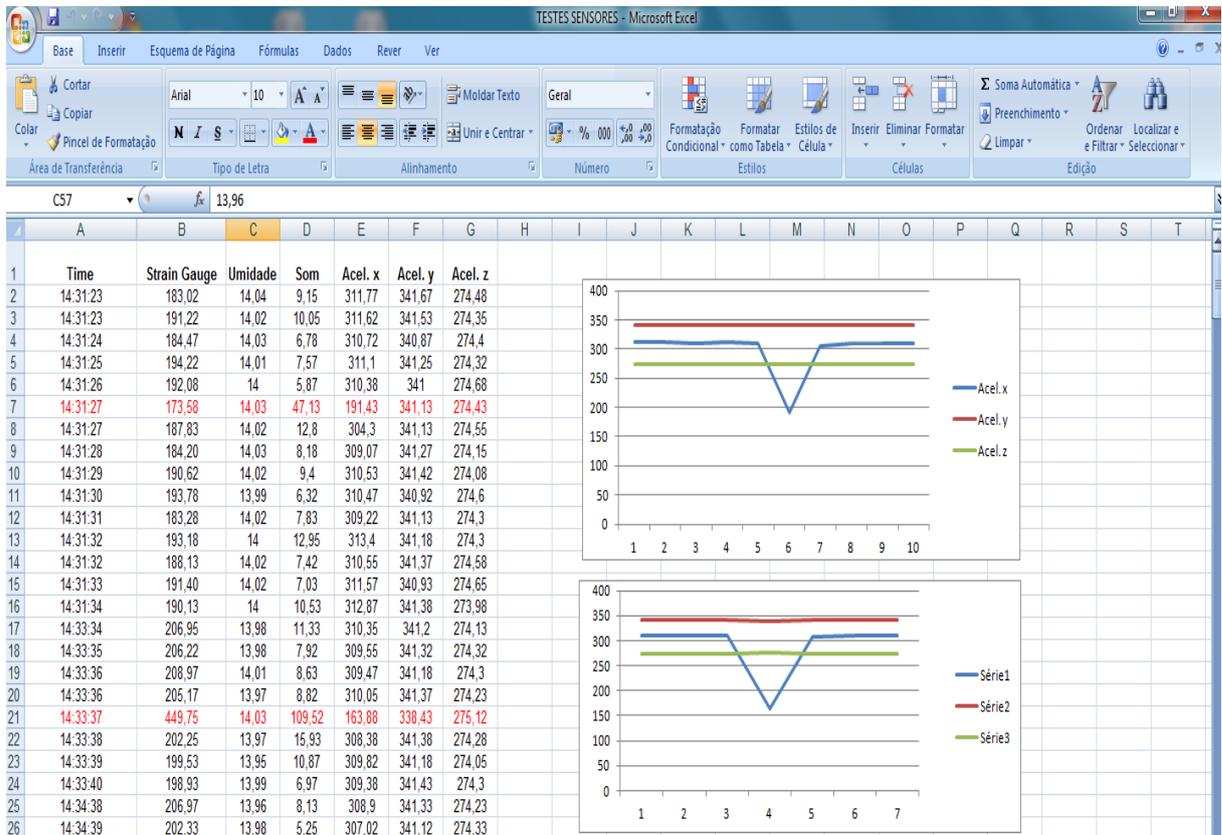
A Central de Monitoramento consiste de um computador pessoal PC compatível que executa o programa de aquisição de dados PLX-DAQ disponibilizado livremente pela empresa Parallax ([www.parallax.com](http://www.parallax.com)), gerando uma base de dados no formato xls – Excel. Essa base de dados é processada a partir do ambiente Excel, podendo ser integrada em um ambiente específico em trabalhos futuros. O Software PLX-DAQ é uma ferramenta de aquisição de dados que envia os dados para Microsoft Excel, Figura 31. Com esta ferramenta pode-se utilizar até 26 canais de dados de qualquer microcontroladores Parallax que são exibidos em colunas no Excel. PLX-DAQ fornece análise de planilhas de dados coletados em campo, análises de laboratório de sensores e monitoramento em tempo real de equipamentos. O programa de software é livre para comunidade de usuários. Qualquer microcontroladores da parallax conectados a qualquer sensor e a porta serial de um PC pode enviar dados diretamente para o Excel conforme figura 31. Os requisitos do software PLX-DAQ, são:

- i) Microsoft Windows e;
- ii) Microsoft Office/Excel 2000 ou superior.

As características do software PLX-DAQ, são as seguintes:

- i) Plot ou gráfico de dados que chega em tempo real, usando o Microsoft Excel;
- ii) Grava até 26 colunas de dados;
- iii) Registra os dados em tempo real (hh: mm: ss) ou segundo a definição pelo usuário;
- iv) Read / Write (ler e escreve) qualquer célula em planilha;
- v) Ler / Define qualquer uma das quatro caixas no controle da interface;
- vi) Taxa de transmissão de dados até 128K

Figura 31 - Tela do PC registrando os dados do software PLX-DAQ.



Fonte: (dados desenvolvidos durante a pesquisa)

### 2.5.3 Sensor de Encosta

O que é designado aqui como sensor de encosta consiste em um conjunto de sensores dispostos sobre uma haste de aço inox que deve ser encaixada no solo. Os sensores são: i) sensores de deformação (*Strain Gage*); ii) sensor de aceleração (acelerômetro); iii) sensor de umidade (do tipo resistivo); iv) e sensor acústicos (piezoelétrico). Estes dispostos ao longo da haste, os quais formam o sensor multiparamétrico. O encaixamento da haste no solo permite que: (i) deslocamentos de camadas do solo (cisalhamento) tenham imediata associação à deformação da haste; (ii) que possa se detectar o aumento de umidade do solo em dada profundidade (extensão da haste); (iii) que se meça a aceleração de camadas em micro deslizamentos e (iv) que haja monitoração do ruído acústico decorrentes desses deslizamentos. Uma unidade transceptora está disposta na extremidade superior da haste, caracterizando o conjunto como um sensor de propósito final (*End Device*) de uma rede de sensores sem fio. A unidade transceptora foi implementada sobre a plataforma de prototipação Arduino, integrando: (i) um microcontrolador

ATMega328; (ii) com um transceptor nRF24L01; (iii) um acelerômetro –ADXL 354 e (iv) circuitos de transdução para os sensores acústicos, de umidade e de deformação (*Strain Gauge*).

O rádio do sensor de encosta opera na banda ISM (Instrumentation, Scientific and Medical) dentro da faixa de 2.4Ghz, transmitindo a uma taxa de 2Mbits/s com uma potência de transmissão de 0 dBm. O circuito de transdução para o sensor de deformação (*Strain Gauge*) foi fornecido pelo Laboratório de Energia Solar da UFPB, tendo sofrido pequenas otimizações.

O Sensor de encosta encravado é uma amostra e o detalhe da fixação do *strain gage*, apresenta o sensor de encosta (sensor multiparamétrico) encravado em uma amostra, e os detalhes da construção do mesmo.

Figura 32 - Sensor de encosta encravado em uma amostra e o detalhe da fixação do strain gage.



Fonte: (Imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

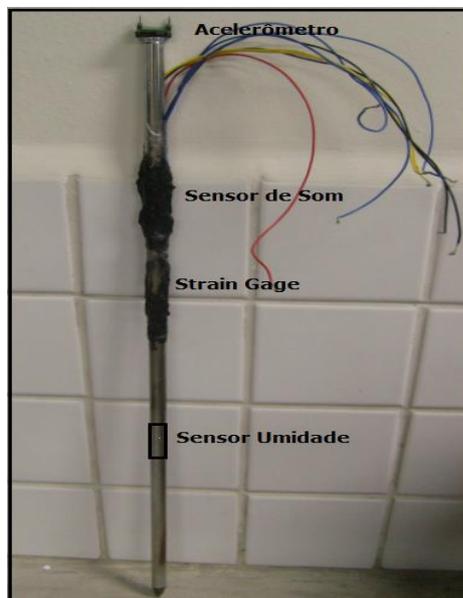
## 2.6 Preparação do Ambiente Experimental

### 2.6.1 Construção do sensor multiparamétrico

Os experimentos foram realizados no laboratório de construção civil do IFPE Campus Recife. A figura 30, mostra o sensor de encosta construído para o experimento. Esse sensor é composto por uma barra de aço inox de 54cm de comprimento e 9mm de diâmetro no qual foi embutido um strain gage e dois sensores do tipo piezoelétrico. Na parte superior da haste foi fixado o sensor acelerômetro, sendo a haste introduzida ao solo nos locais de eminência de

deslizamento (encostas). Este sensor multiparmétrico deve ser protegido por uma tubulação de 100mm de diâmetro, a qual deve conter os acessórios do sensor tais como bateria de alimentação elétrica, as placas de transdutância e a unidade transceptora (rádio). As informações geradas pelo sensor de encosta (sensor multiparamétrico), durante a fase de caracterização, podem ser visualizadas nos Gráficos 5, 6 e 7, anteriormente apresentados através dos sensores Strain Gage (azul escuro), de umidade (vermelho), de som (verde), e os três eixos que representam o sensor acelerômetro, sendo o eixo X (roxo), Y (azul claro) e Z (laranja).

Figura 33 - Sensor Multiparamétrico



Fonte: (Imagem capturada durante o desenvolvimento da pesquisa)

### 2.6.2 Construção da rede Ponto a ponto (*peer-to-peer*)

Construção da rede com estrutura ponto a ponto (*peer-to-peer*), atendeu a este propósito desta dissertação (*End Devices*) transmitindo diretamente para um elemento de acesso (*Acess Points*) à central de monitoração. A ilustrado na Figura 34, demonstra os transceptores em ambientes diferentes, sendo um na central de monitoramento, usando uma sala que fica aproximadamente 40m do local do sensor, recebemos todo os sinais produzidos pelo sensor multiparamétrico com o uso do software PLX-DAQ.

Na primeira figura o transceptor recebendo sinais dos sensores e enviando para o transceptor, na segunda figura o transceptor em outra sala, recebendo as

informações do primeiro sensor, e apresentado os gráficos no PC.1, demonstra a topologia dos transceptores em formação ponto a ponto (*peer-to-peer*).

Figura 34 - Na primeira figura o transceptor recebendo sinais dos sensores e enviando para o transceptor, na segunda figura o transceptor em outra sala, recebendo as informações do primenro sensor, e apresentado os gráficos no PC.



Fonte: (Imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

### 2.6.3 Caracterização do sensor multiparamétrico

De forma a caracterizar o sensor multiparamétrico por meio de seu parâmetro de medida de deformação do solo, foram efetuadas 1320 medidas das quais 660 foram por meio de análise com o strain gage e 660 por meio do sensor de som, e paralelamente os demais sensores que compõe este sensor multiparamétrico proposto nesta dissertação.

Com os resultados apresentados pode se concluir que com relação as amostras houve a sensibilidade do respectivo sensor, no experimento em laboratório do movimento de massa da amostra, que gerou os resultados apresentados em tempo real. Esta representação pode ser percebida no gráfico 10.

Gráfico 10 - Representação dos sinais do sensor multiparamétrico num processo de deslizamento de encostas.

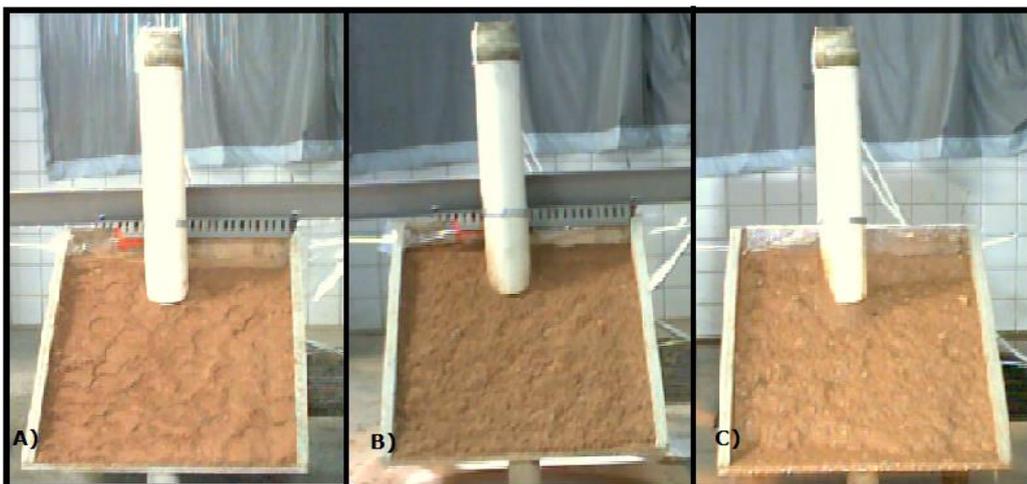


Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

## 2.7 Resultados dos Experimentos com Deslocamento de Solo em Ambiente de Simulação

Foram realizados três experimentos submetendo amostras de solos retiradas de regiões de encostas do Recife ao ambiente do simulador de chuva. Este primeiro experimento está representado na figura 35.

Figura 35 - Primeiro experimento: a) Tempo 0 b) Após 2 horas e c) Após 4 horas.

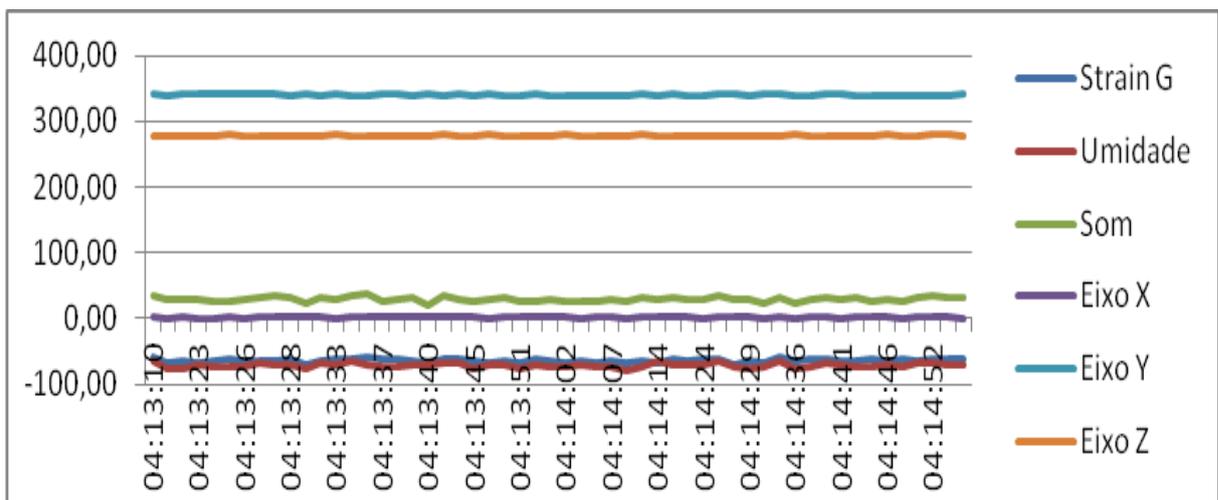


Fonte: (imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

No primeiro experimento foi usada uma amostra com o solo compactado (compactação realizado em função da norma vigente a ABNT 7182), com inclinação de aproximadamente de  $40^\circ$ . Os resultados são apresentados no gráfico abaixo, que mostra apenas ruídos do ambiente tendo em vista que não houve nenhum deslizamento acentuado. Porém em análise mais detalhada percebe-se pequenas

variações dos sensores de: som, strain gage e o eixo X do acelerômetro, condizentes com o ruído acústico do ambiente. Este ruído pode ter sido causado pela vibração dos movimentos das pessoas no laboratório tendo em vista que havia aulas e pessoas curiosas, o que justifica as micro variações presente nesse caso. Observou-se um processo erosivo acentuado conforme pode ser visto pelas fotos (A), (B) e (C). A diferença entre as amostras exhibe o efeito da propagação da chuva sobre o corpo de prova durante o experimento.

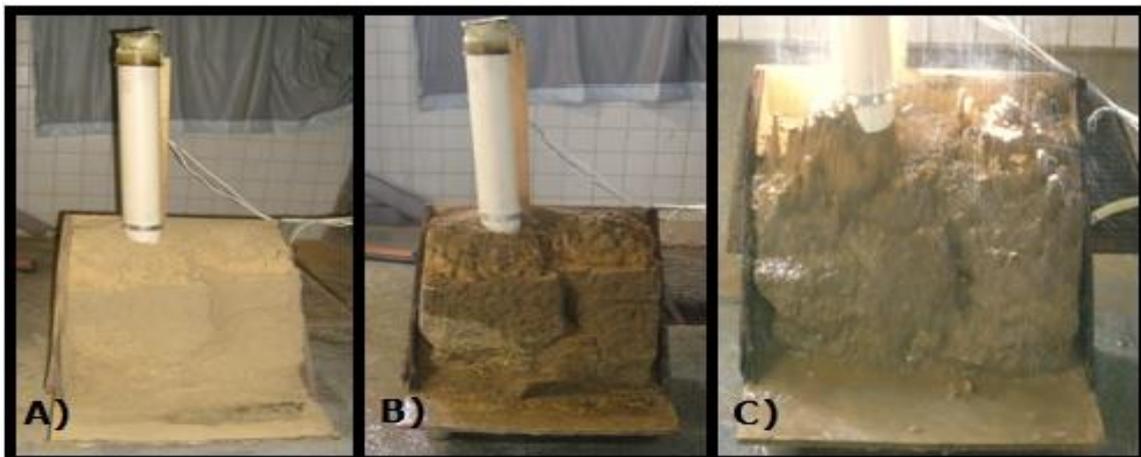
Gráfico 11 - Sinais da amostra do solo compactado.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa).

Para a primeira amostra a pluviometria solicitada foi de  $40\text{mmh}^{-1}$  com picos escalonados em  $60\text{mmh}^{-1}$ ,  $80\text{mmh}^{-1}$  e  $100\text{mmh}^{-1}$  nos tempos de 20, 30 e 20 minutos, respectivamente, para cada tipo de chuva considerando-se as classificações AV, IT ou AT.

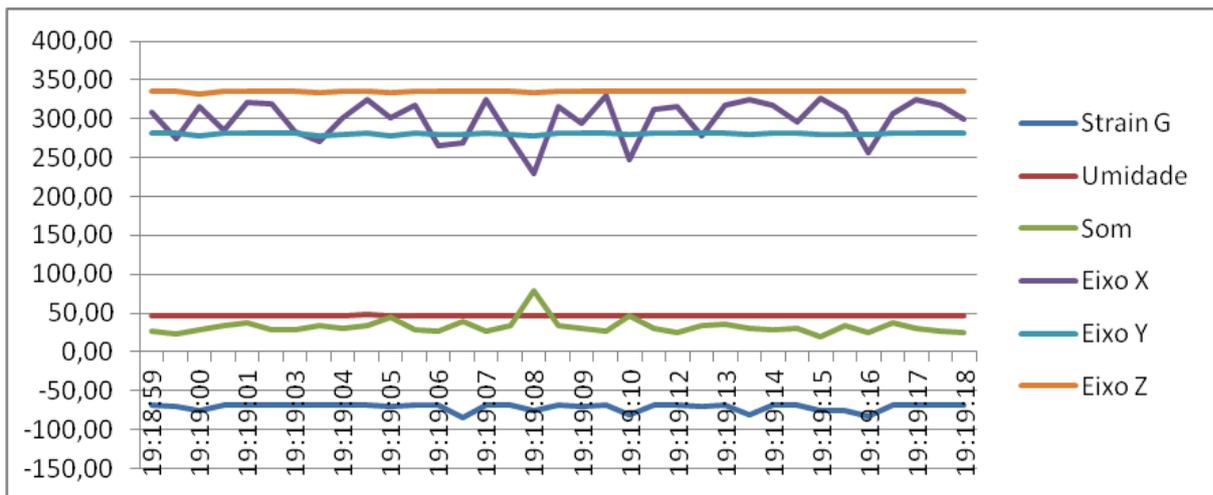
Figura 36 - Segundo experimento: a) Tempo 0 b) Após 2 horas e c) Após 4 horas.



Fonte: (Imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

No segundo experimento os resultados foram diferentes do que se esperava, pois a amostra já estava lixiviada por outro experimento anterior, conforme Figura , detalhe (A). Logo em seguida, ao ligar o simulador, pequenos pedaços de pedras que correram sobre a amostra começaram a ser registrados (c) percebeu-se que não houve deslizamento acentuado, porém pequenos pontos de deslizamento principalmente interno nas voçorocas que foram formados ao longo da chuva. Isso só foi possível porque houve uma desconfiança dos sinais apresentados pelo sensor multiparamétrico, o que motivou uma maior observação da amostra. Essas variações dos sinais podem ser vistas no gráfico 12, sendo os demais detalhes apresentados no anexo 'A'.

Gráfico 12 - Demonstrando as variações antes, durante e depois do desabamento da amostra 02.

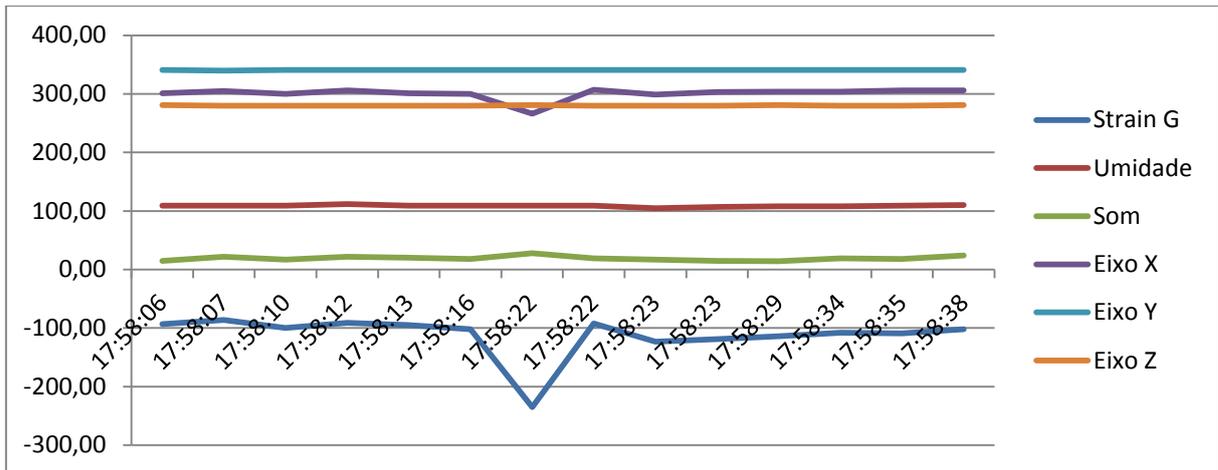


Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

No Gráfico, são observadas variações dos eixos do Strain Gage, do sensor de umidade, sensor de som, e dos três eixos que representam o acelerômetro. Esses dados foram retirados a partir do momento em que se observaram as variações dos resultados do sensor multiparâmetro e confirmado por observações visuais. Percebe-se que no intervalo de 19.19.08, houve um pico do sinal do sensor de som, tendo como redundância no mesmo intervalo de tempo a variação acentuada do eixo X do acelerômetro e a variação do sensor Strain Gage o que foi corroborado com a observação visual do desprendimento de um pedaço de solo do corpo de prova. Nestes intervalos a chuva simulada era de  $80\text{mmh}^{-1}$ . Observa-se que nos momentos de pico, ou seja, de maior intensidade de ondas sônicas, os

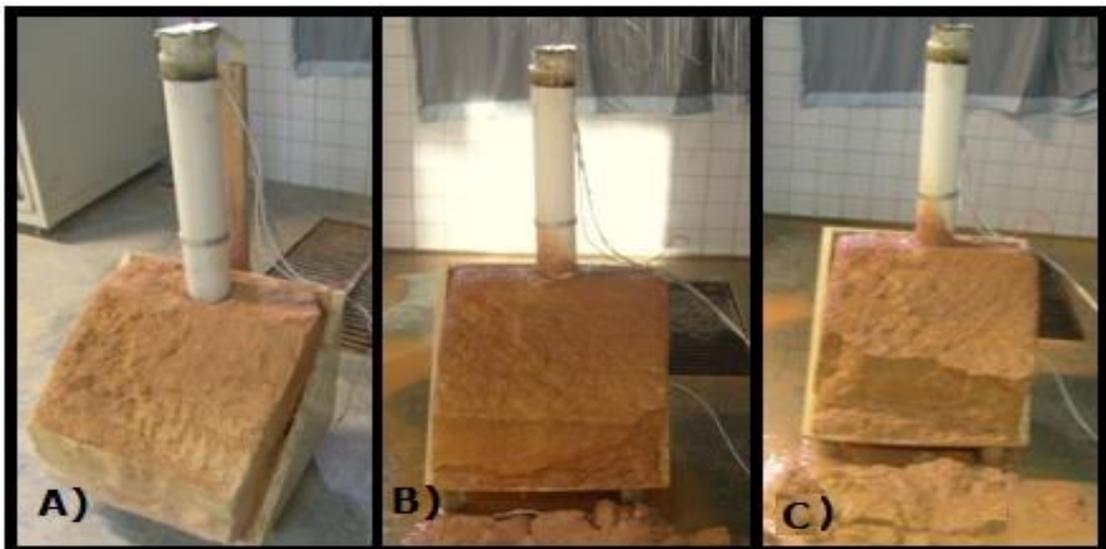
sinais registrados pelo sensor multiparamétrico tendem a saturar e se cruzar, conforme pode ser visto no experimento do gráfico 13, esse detalhe reforça a confiabilidade do dispositivo. As demais informações pertinentes aos dados que deram origem ao gráfico abaixo.

Gráfico 13 - Demonstrando o pico da variação após um evento.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Figura 37 - Terceiro experimento: a) Tempo 0 b) Após 2 horas e c) Após 4 horas.



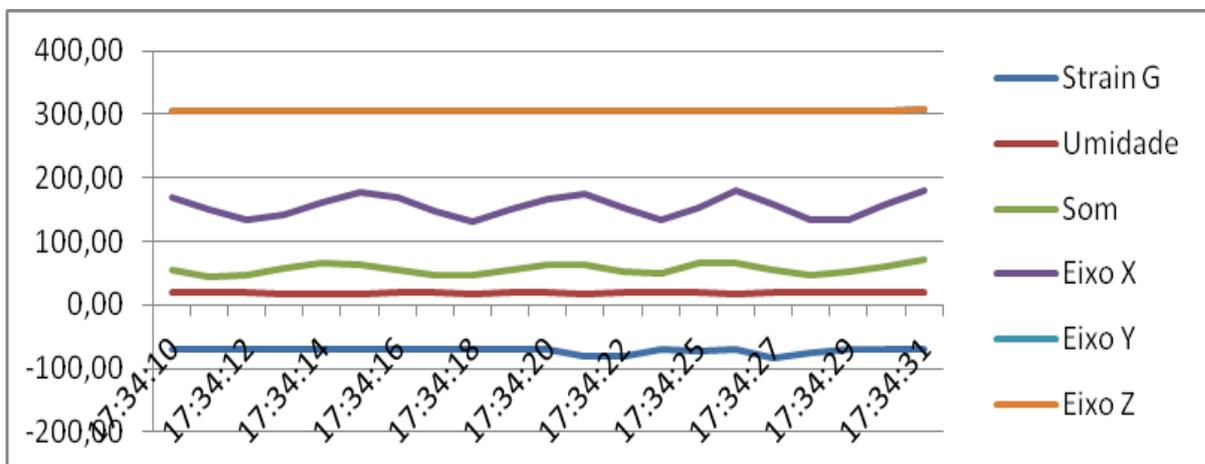
Fonte: (Imagens capturadas durante o desenvolvimento da pesquisa)

No terceiro experimento, figura 37, no momento (A) o solo foi retirado do local de origem e cortado com inclinação de aproximadamente 50°; no momento (B) após duas horas de chuva no simulador começou o deslocamento de solo na parte frontal.

Neste momento o sensor multiparamétrico detectou a fratura e o instante do desabamento desta encosta, conforme Gráfico 14; essa sequência foi continuada no momento (C), após aproximadamente mais de quatro horas, onde foi observado mais um desabamento, também registrado no gráfico 14.

Nesse processo foi percebida a variação do sensor de umidade que foi iniciado com 6%, por meio de aferição pelo método da estufa, e ao longo do tempo atingiu a casa dos 19%, o que pode ser verificado no mesmo gráfico.

Gráfico 14 - Resultado do 3º experimento.



Fonte: (dados coletados durante a pesquisa)

Nesse gráfico percebe-se que as variações mais acentuadas continuam sendo do sensor de movimento tendo como ênfase o eixo X, porém no momento do deslocamento de massa observou-se também a variação do sensor de som e o do sensor Strain Gage. Lima (2007) afirma que nos momentos que antecedem o deslizamento de uma encosta um estrondo de alta intensidade é ouvido por moradores. Diante deste relato conclui-se que tais estrondos e outros eventos internos no solo podem ser percebidos pelo sensor multiparamétrico.

## 2.8 Conclusão

Esta dissertação desenvolveu um modelo de monitoramento de deslizamento de encosta. Para tal foram abordados três desafios técnico-científicos:

- (i) reprodução em ambiente laboratorial das condições climáticas e geológicas que favorecem o deslizamento e que estão presentes na topografia urbana das cidades brasileiras;

- (ii) construção de arcabouço de monitoramento remoto do evento de deslizamento e detecção de manifestações tópicas pré-deslizamento; e
- (iii) refinamento de métodos de análise e retirada de amostra.

Como resultado imediato esta dissertação produziu um conjunto de recursos que estão consolidados em um ambiente de simulação de chuvas e monitoramento geofísico de amostras de solos.

### 2.8.1 Contribuições à área de pesquisa

Esta dissertação estabelece as seguintes contribuições diretas à área de engenharia ambiental.

- a. Criação de sensor multiparamétrico, constituído pelos sensores: sensor Strain Gage, sensor de umidade, sensor acelerômetro e sensor de som;
- b. Desenvolvimento de um simulador de chuva artificial;
- c. Criação de ambiente para testes de erosividade hidrológica de solos;
- d. Proposição de modelo de monitoramento de deslizamento que abre a possibilidade de avaliação em tempo real de áreas sob risco.

### 2.8.2 Trabalhos Futuros

Com base nas contribuições apresentadas observa-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- i. Avaliação do efeito da poluição hidrológica nas dinâmicas de deslizamentos de encostas;
- ii. Construção de uma rede de sensores *ad-doc ZigBee-Like* para implementação do modelo de monitoramento proposto nessa dissertação;
- iii. Criação de modelo de sensoriamento, baseado no sensor de encosta apresentado nesta dissertação, para a geolocalização de eventos não hidrológicos capazes de gerar cisalhamento do solo de encostas.

O trabalho de avaliação de efeitos da poluição hidrológica (item i) compreende a simulação de chuvas polutivas, como chuvas ácidas ou contaminadas com poluição industrial; o trabalho de construção de uma rede de sensores *ZigBee-Like* (item ii), compreende a customização do protocolo de redes de sensores *ZigBee*, tecnologia consolidada e de ampla difusão em automação predial, para a integração dos sensores de encostas desenvolvidos nesta

dissertação. O trabalho proposto abordaria as complexidades referentes não apenas a otimização de funcionalidades do protocolo, mas também a adequação das características de sua camada física ao ambiente de encostas urbanas. Aspectos como faixa de frequências, estratégias de roteamento e fatores de interferência eletromagnética local compõem o conjunto de desafios básicos a serem abordados pelo trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BOYLESTARD, Robert L. **Introdução á Análise de Circuito**. 10 ed. Pearson prentice Hall, São Paulo-SP. 2004.
- BUDENZER, G. D; MEYER, L.D. **Simulation of rainfall and soils for labolatory research**. Transaction of the ASAE, St. Joseph, v.8, n.1, p.73-75, 1965.
- FARUOLO, Luciano Bruno; FERNANDES, José Luiz. A. Medição de Massa em Movimento utilizando extensômetros. In: Conferencia sobre tecnologia de equipamentos, 8, 2005, Bahia. **VIII Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos**, Bahia, 2005.
- HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, Peter. **The Landslide Handbook - A guide to understanding landslides**: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129p. 2008.
- LIMA, A. F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife**. Dissertação de Mestrado. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife-PE. 2002.
- LIMA, W.M. et al. Medidas de Resistência Elétrica em Atuadores de Ligas com Memória de Forma Para o Controle de Posição de Sistemas Flexíveis – Aplicação ao Caso de Uma Viga Esbelta Mecânica. **CONEM 2008 – V Congresso Nacional de Engenharia mecânica**, Salvador, BA, Brasil (In Portuguese) 2008.
- LOUREIRO, Antonio A.F. *et al.* Redes de Sensores Sem Fio. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. **XXI Simpósio Brasileiro de redes de computadores**. Departamento de Ciência da Computação. 2003.
- MORIN, J.; GOLDBERG, D.; SEGNER, I. **A rainfall simulator Wih a rotating disk**. Transacions of the ASAE, St. Josseph, v.10, 1967.p74-79. 1967.
- NELI, M.; CAVALEIRO, G. C. **Fq 8-sustentabilidade na Terra**. 8 ed. Editoções Asas. 2006.
- RECKZIEGEL, Elizabete Weber. **Identificação e mapeamento das áreas de risco do perigo de movimento de massa no município de Porto Alegre-RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Program de pós-graduaçãoem geografia. Porto Alegre-RS. 2012.
- SAMPAIO, José Luiz. CALÇADA, Caio Sérgio. **Andulatória Eletromagnetismo Física moderna**. Editora Atual. 2º ed. São Paulo. 2005.

### **3 DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR DE CHUVA**

## RESUMO

As dificuldades ou mesmo impossibilidades de realização em campo dos trabalhos de pesquisa em monitoramento de encostas, de erosividade do solo, escoamento de água em solo, e tempo de infiltração água no solo, motivaram a construção de um simulador de chuvas em um laboratório. Neste simulador a pluviometria pode variar de  $1\text{mmh}^{-1}$  até  $200\text{mmh}^{-1}$ , com variações de  $1\text{mmh}^{-1}$ , e que atendam as mesmas características propostas por Horner & jens (1941), Wischmeier & Smith (1958), Morin et al (1967), Meyer & Harmon (1965), que validam estes simuladores artificiais de chuva com relação as chuvas naturais.

Palavra chave: Simulador de chuvas, Chuva simulada e características das chuvas.

## ABSTRACT

Difficulties or even impossibilities of achievement in the field of research papers on monitoring of slopes, soil erosivity, runoff water on soil, weather and water infiltration into the soil, led to the construction of a rainfall simulator in a lab. In this simulation the rainfall can vary from 1 to 200  $1\text{mmh}-\text{mmh}^{-1}$ , with variations  $1\text{mmh}^{-1}$ , and that meet the same characteristics proposed by Horner & jens (1941), Wischmeier & Smith (1958), Morin et al (1967 ), Meyer & Harmon (1965), which validate these simulators artificial rain with respect to natural rainfall.

Keyword: Simulator rain, rain and simulated rainfall characteristics.

### 3.1 Introdução

Diante das impossibilidades ou dificuldades de se realizar em campo os trabalhos de pesquisas de monitoramento de encostas, estudos de uso de sensores em encostas e de redes lógicas com o mesmo objetivo. É que foi proposto a construção de um simulador de chuvas em um laboratório, em que a pluviometria pudesse variar de 1 em  $1\text{mmh}^{-1}$  até  $200\text{mmh}^{-1}$ , e atendesse às mesmas características proposto por: Horner e Jens (1941), Wischmeier e Smith (1958), Morin, Goldberg e Segner (1967), Meyer e Harmon (1965), desta os simuladores tendem a chegar o mais próximo possível das chuvas naturais.

### 3.2 Objetivos

#### 3.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um simulador de chuvas em laboratório para desenvolvimento de um modelo experimental para monitoramento de encostas e pesquisas em análises de solo.

#### 3.2.2 Objetivo específico

Com o intuito de nortear as ações a serem realizadas para se alcançar o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos.

- a) Análise dos modelos simuladores de chuvas existentes em literatura;
- a) Desenvolvimento de um modelo de simulador de chuvas automatizado que possa variar as características das chuvas simuladas conforme descrito em literatura;
- b) Geração de conhecimento sobre as características dos diversos tipos de simuladores de chuvas e suas características;
- c) Construção de um ambiente experimental que permita, por meio de simulação/emulação ou ambiente real, a construção e validação do modelo de simulador de chuva proposto;

### 3.3 Revisão Bibliográfica

As dificuldades ou mesmo impossibilidades de realização em campo dos trabalhos de pesquisa em monitoramento de encostas, motivaram o estudo do uso

de sensores e redes lógicas em encostas. Para o aprofundamento desse estudo foi proposta a construção de um simulador de chuvas em laboratório, em que a pluviometria pudesse variar de  $1\text{mmh}^{-1}$  até  $200\text{mmh}^{-1}$ , com variações de  $1\text{mmh}^{-1}$ , e que atendesse as mesmas características propostas por Horner & Jens (1941), Wischmeier & Smith (1958), Morin, Goldberg e Segner (1967), Meyer & Harmon (1965), que validam estes simuladores em relação as chuvas naturais.

Um dos pioneiros na construção de simuladores de chuva, para fins de pesquisa sobre erosividade em laboratórios, Bubenzer & Meyer (1965), relata em artigo a importância deste tipo de equipamento nos trabalhos para obtenção de dados sobre escoamento superficial e erosão em pequeno espaço de tempo.

Os simuladores de chuvas são classificados segundo Morin Goldberg e Segner (1967) em dois tipos: i) simuladores construídos com gotejadores e ii) simuladores construídos com aspersores. Os simuladores devem usar manômetros para monitorar a pressão no sistema, isto é, a intensidade de aplicação de água (ALVES SOBRINHO; FERREIRA; PRUSKI, 2002). Os simuladores por meio de aspersores apresentam menor custo de construção para formação de gotas e devem operar com determinada pressão, que possibilitem o ajuste e velocidade de impacto com o solo similar a velocidade terminal as das gotas de chuva natural.

Estes equipamentos de simulação de chuvas permitem o controle das precipitações ou pluviometria controlada em laboratórios. Segundo Meyer e Harmon (1965) a potencialidade dos simuladores de chuva permitem a produção de resultados como: (i) diâmetros médio das gotas de chuvas similar as das chuvas naturais; (ii) velocidade de impacto das gotas no solo o mais próximo da velocidade terminal das gotas de chuvas naturais; (iii) energia cinética das precipitações próximas das chuvas naturais; (iv) distribuição uniforme da precipitação sobre a parte experimental próxima da chuva natural.

Richa *et. al.* (1999) propõem que os projetos dos simuladores de chuva sejam avaliados e o desempenho garantido para o qual foi pré estabelecido, possibilitando a necessidade de ajustes para que atinja o seu objetivo com a melhor desempenho possível. Para que a distribuição da chuva esteja dentro da uniformidade aceitável, faz-se uso do coeficiente de uniformidade de distribuição de água e conseqüentemente da eficiência da aplicação, proposta por Frizzone (1992). O coeficiente de uniformidade exprime a variabilidade da lâmina d'água distribuída na

superfície da área do experimento. Tais medidas quantificam e qualificam fisicamente o equipamento. Christiansen (1942) foi um dos pioneiros na adoção do desvio médio absoluto como medida de dispersão pelo uso do CUC (coeficiente de uniformidade de Christiansen). Neste artigo é feito uso do desvio padrão como medida de aspersão sendo aceito valores superiores a 75%.

Segundo Carvalho *et al.* (2005), grande parte dos danos causados pelas chuvas possuem relação direta com as características das mesmas, sendo que as chuvas de intensidades constantes não ocorrem em condição natural, pois elas tem constantes variações em função das intensidades durante as ocorrências.

Carvalho *et al.* (2005), esclarece que simuladores de chuvas de intensidades constantes vem sendo utilizados, contribuindo para obtenção de dados não representativos, e que os simuladores devem ter a possibilidade de captar a variação das intensidades das chuvas durante seu funcionamento.

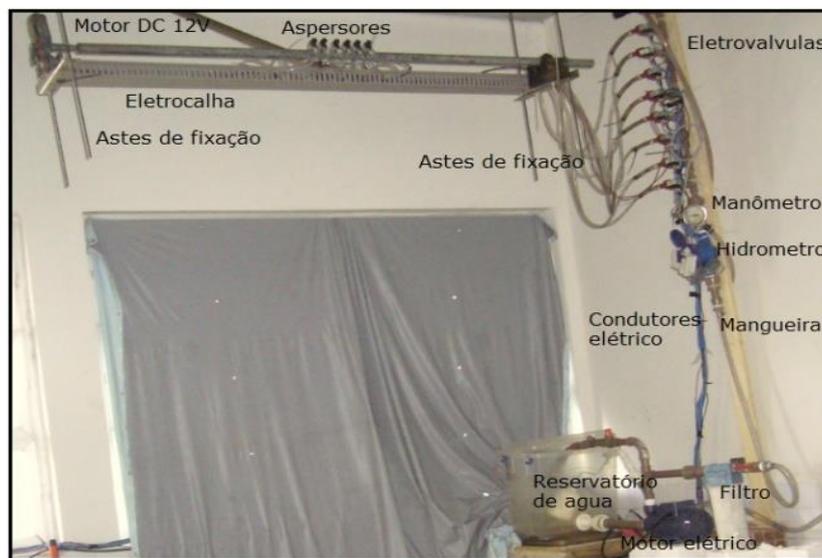
Os padrões de chuvas podem ser classificados, conforme proposto por Horner & Jens (1941), em: avançado (AV), quando a maior intensidade da chuva ocorre num período de tempo menor que 30% a partir do instante inicial da chuva, em relação ao tempo total da mesma; intermediário (IN), quando a maior intensidade da chuva ocorre num período de tempo entre 30 e 60% em relação ao tempo total da mesma; atrasado (AT), quando a maior intensidade da chuva ocorre num período de tempo maior que 60% em relação ao tempo total da mesma.

Para Mehl (2000), chuva individual é aquela que se encontra separada uma da outra por um intervalo mínimo de tempo de 6 horas e precipitação inferior a 1 mm. Esta informação é importante para as construções dos simuladores de chuvas automáticos (que utilizam circuitos microprocessados) ou quando se precisa determinar uma chuva de vários dias sem que se percam as características ou se saia do padrão. Além disso, para que ela seja considerada satisfatória é necessário que os mesmos devam apresentar relação entre energia cinética da precipitação simulada e energia cinética da chuva natural acima de 75%, conforme afirmação de Meyer e Rainfall (1958).

### 3.4 Características do Simulador de Chuva

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de tecnologia das construções no Departamento Acadêmico de Infra Estrutura e Construção Civil (DAIC) no Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), campus Recife, cuja função é a construção de um simulador de chuva, conforme figura 38, que atendessem as especificações dos métodos e padrões aceitáveis pela comunidade científica.

Figura 38 - Simulador de chuva



Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa)

#### 3.4.1 Material

##### 3.4.1.1 Hidrômetro

Um Hidrômetro de  $\frac{3}{4}$  de polegadas, que pode registrar vazão mínima de  $0,0001\text{m}^3$  no seu mecanismo interno, que possui um sistema magnético que permite o uso de um equipamento sobre sua tampa capaz de sentir a presença do campo magnético por meio de um sensor denominado de sensor de efeito *Hall*. Este equipamento faz a medição da vazão da água em litro por segundo, gerando um pulso elétrico a cada litro de água que passa pela tubulação, o que garante a precisão da pluviometria do sistema, conforme figura 39.

Figura 39 - Hidrômetro

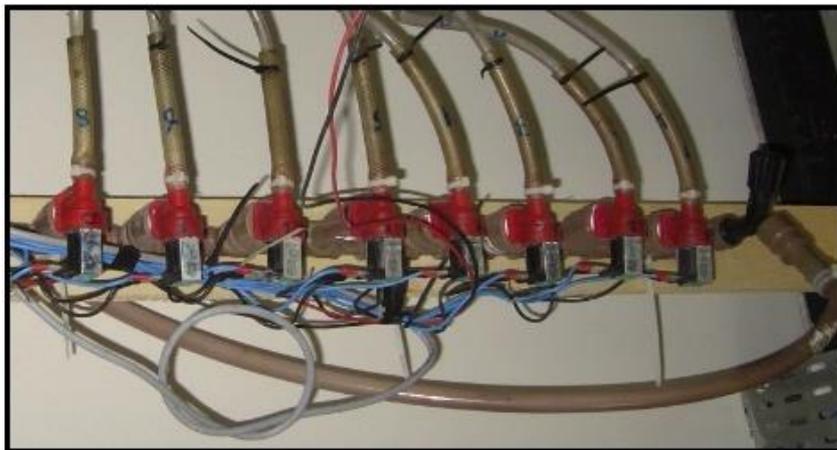


Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa)

#### 3.4.1.2 Solenoides

Oito solenoides com de  $\frac{3}{4}$  de polegadas construídos em pvc com rosca na entrada e saída de  $\frac{5}{8}$ ', as mesmas que se utilizam nas entrada de água das máquinas de lavar roupas, conforme figura 40.

Figura 40 - Conjunto de eletroválvulas

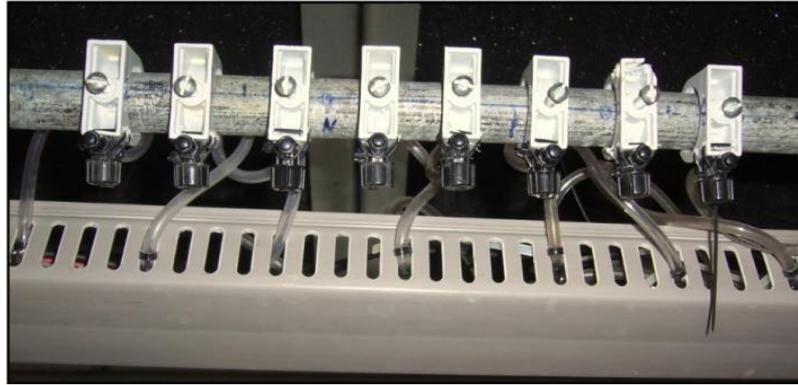


Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa)

#### 3.4.1.3 Aspersor

Seis aspersores do tipo XS-180, pulverizador com débito/alcance regulável de raio de  $180^\circ$  podendo trabalhar com pressão de 0,5 a 2,5 bar, caudal 0 a 130l/h e alcance dos jatos de água ajustável de 0 a 3,4m com emissão uniforme de excelente distribuição, conforme manual do fabricante (*Rain bird*), de acordo com a figura 41.

Figura 41 - Conjunto de aspersores do modelo SX-180.

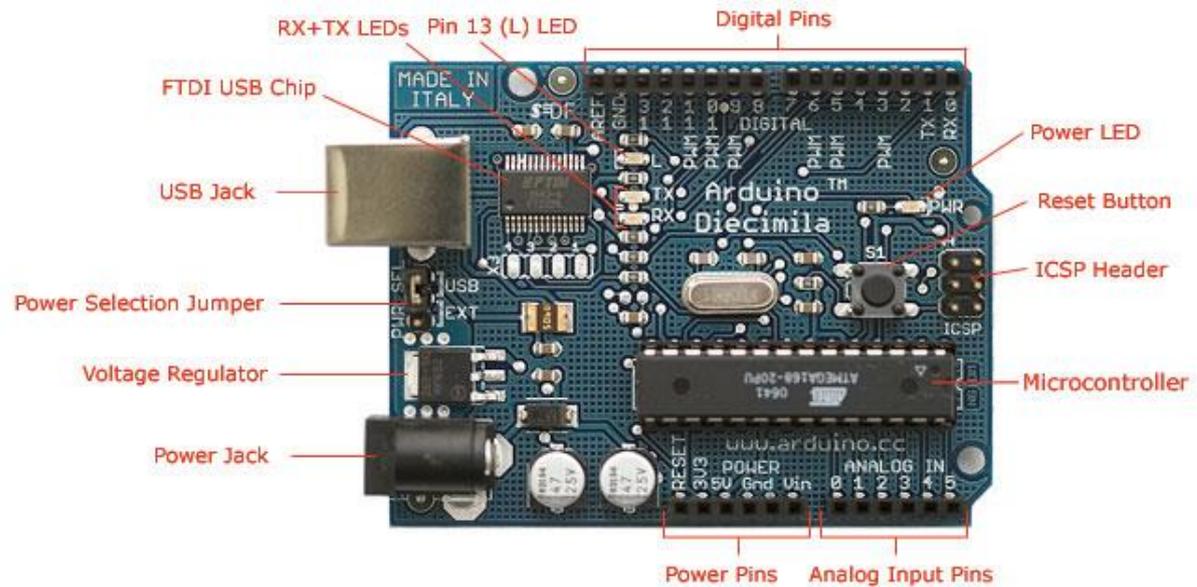


Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa)

#### 3.4.1.4 Arduino

Um dispositivo microcontrolado baseado em plataforma de prototipagem de *hardware* e *software free* cuja entradas e saídas de dados podem ser escrita sobre uma biblioteca de programas C/C++, denominado *Arduino duemilanove*. Este dispositivo possui processador Atmega 328, 14 pinos de entrada e saídas digitais, sendo 6 pinos saídas PWM, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16Mhz e alimentação elétrica de 5V, conforme figura 42. Esta plataforma de baixo custo pode ser utilizada para acionamento e controle em diversas aplicações, tais como: controle de sensores dos diversos tipos e/ou automação de forma geral. O arduino, responsável pelo acionamento do simulador, está associado a um teclado alfanumérico para entrada dos dados no simulador (pluviometria em mm, tempo da pluviometria em hora e a classificação da chuva segundo, conforme Horne & Jens) e a um dispositivo de saída composto por um banco de sete relês que comandarão as válvulas solenoides que acionarão os aspersores, proporcionando a pluviometria solicitada podendo variar de 1mm/h a 200mm/h.

Figura 42 - Arduino duemilanove e seus pinos.



*Photograph by SparkFun Electronics. Used under the Creative Commons Attribution Share-Alike 3.0 license.*

Fonte: (ARDUINO,2012)

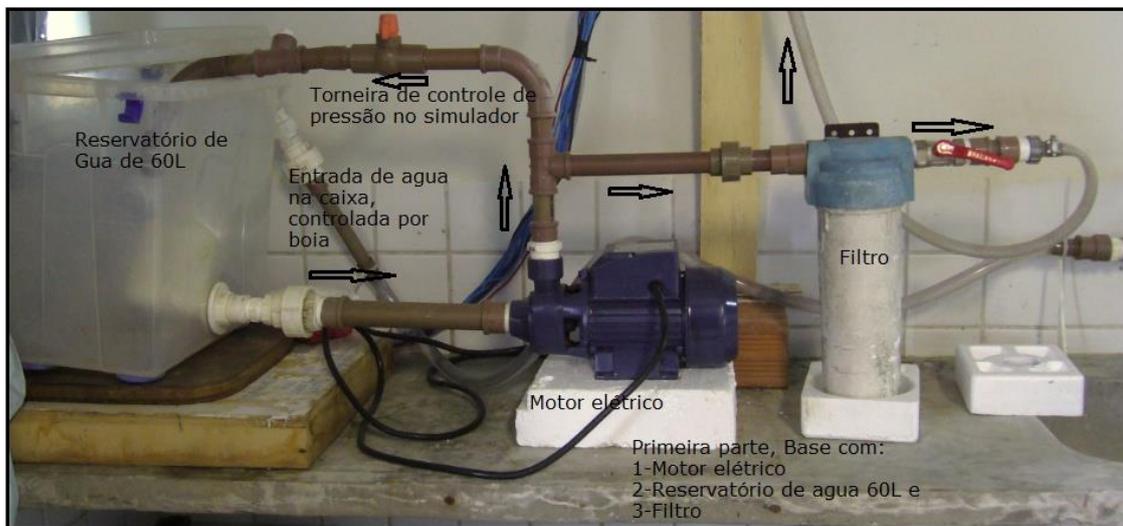
#### 3.4.1.5 Motor elétrico DC

Um motor elétrico de limpador de parabrisa de carro com alimentação elétrica 12V, acompanhado por um conjunto de engrenagens que reduzirão a velocidade fornecendo a velocidade e potência necessária para realização do movimento de varredura (vai e vem) e permitindo a uniformidade da distribuição das gotas em toda a área, determinada como área de eficiência.

#### 3.4.1.6 Motor elétrico AC

Um motor elétrico monofásico de indução de 1/2 CV de potência e tensão elétrica de 220V, manterá a pressão hidráulica constante, isso porque há uma grande variação na rede hidráulica interna, sem a qual não seria possível a eficiência deste projeto. Na Figura 43 têm-se os detalhes da primeira parte do simulador de chuvas composto por: motor elétrico, reservatório de água, filtro e tubulações.

Figura 43 - Demonstra o reservatório de água, filtro, motor elétrico e a direção do fluxo da água.



Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa).

#### 3.4.1.7 Estrutura do simulador

Estrutura metálica com cantoneiras em “L” de  $(40 \times 40) \text{mm}^2$  por 350mm de comprimento, fixada na posição vertical dando suporte a um tubo metálico de  $\frac{3}{4}$  de polegadas presa sobre um mancal fixado na cantoneira. As cotoneiras são fixadas por hastes de 1000mm de comprimento e 10mm de diâmetro, com rosca fixada no teto. Nela é fixado a parte móvel dos componentes do simulador (aspersores e mangueira). Na segunda parte, na posição vertical, em uma base de madeira, são fixados os demais componentes do simulador (eletroválvulas, mangueiras, manômetro, hidrômetro e as tubulações em PVC) e na terceira e última parte, na posição horizontal, fica o motor bomba e o reservatório de água;

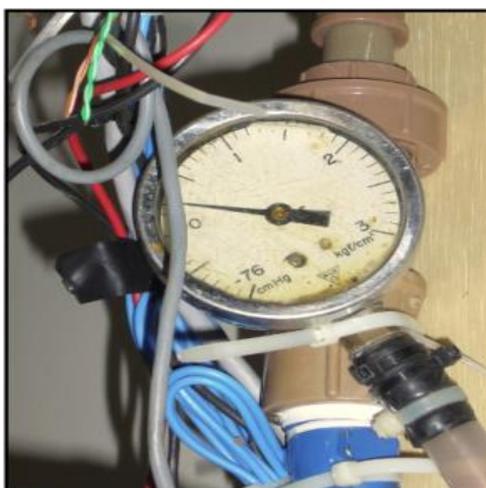
#### 3.4.1.8 Reservatório de água

Reservatório de água de aproximadamente 60 litros garante a constância da pressão hidráulica do simulador, pois mesmo com variação da pressão da rede hidráulica interna, o reservatório se mantém cheio e a bomba elétrica garante a manutenção da pressão no simulador enquanto houver água no reservatório, como mostrado na figura 42.

#### 3.4.1.9 Manômetro

Manômetro do tipo tubo de bourdon, conforme mostrado na Figura 44, com duas escalas sendo uma de 0 a -76 cmHg e outra de 0 a 3 Kgf/cm<sup>2</sup>. Este manômetro, conforme Foto 06 é utilizado para medição da pressão hidráulica que na entrada do simulador é de 1,0 Kgf/cm<sup>2</sup>, porém na saída do simulador, a 10 cm da entrada do aspersor, atinge 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup> que corresponde a  $\approx 36$  kpa, pressão esta utilizada para cálculos posteriores;

Figura 44 - Manômetro



Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa)

#### 3.4.1.10 Tubulações

Conjunto de tubulações, mangueiras e conexões hidráulicas (Tês, Joelhos, Adaptadores, Nipos, Luvas, e outros) de  $\frac{3}{4}$  de polegadas utilizados para fechar o circuito hidráulico do simulador, podendo ser percebido na figura 44, do circuito hidráulico.

### 3.5 Método

#### 3.5.1 Medição da Uniformidade da Chuva Simulada

A uniformidade de distribuição de água foi obtida tendo como base a proposta de Christianse (1942). Para este procedimento foram utilizados 30 copos descartáveis de 500ml fixados em uma base de madeira, conforme figura 45, durante 10 minutos com pluviometria de 40mm h<sup>-1</sup>. Após este tempo, a água contida nos copos foi pesada em balança de precisão de 0,01g.

Figura 45 - Copos em base de madeira para determinar a lamina de água e determinar o CUC



Fonte: (Imagem capturada durante a pesquisa)

O procedimento posterior gerou um gráfico que determinou a uniformidade de distribuição **CUC** (coeficiente de uniformidade de Christianse) de 84,22% conforme a Equação (3.1) de Christianse. O gráfico 13 ilustra essa distribuição e os dados obtidos estão representados na tabela 8.

$$CUC = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X|}{N.X} \right] \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$n$ : número de coletores;

$X_i$ : lâmina de água aplicada no  $i$ -ésimo ponto sobre a superfície do solo;

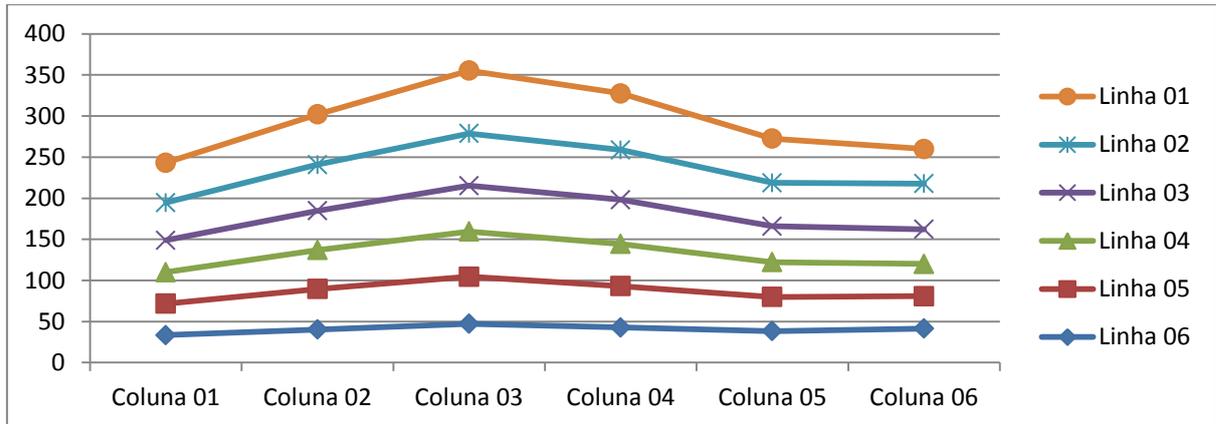
$X$ : média da lamina d'água.

Tabela 8 - Valores da Distribuição das Gotas de Água no Solo.

Tabela dos Valores da Distribuição das Gotas de Água no Solo						
	Coluna 01	Coluna 02	Coluna 03	Coluna 04	Coluna 05	Coluna 06
Linha 01	48,54	61,06	76,39	68,84	53,8	42,11
Linha 02	45,83	56,16	63,68	60,65	52,91	55,59
Linha 03	38,81	47,87	55,58	53,63	43,59	42,17
Linha 04	38,39	47,39	54,92	51,42	42,35	39,25
Linha 05	38,16	49,19	57,38	50,2	41,53	39,31
Linha 06	33,53	40,33	47,27	42,83	38,44	41,47

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 15 - Registro da uniformidade da Distribuição das gotas do simulador.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

### 3.5.2 Determinação do diâmetro das gotas

No processo de determinação do diâmetro volumétrico médio das gotas de chuvas o método escolhido foi o da farinha de trigo proposto por Claudenei *et. al.* (2001). Este método consiste em passar uma bandeja de farinha de trigo pela chuva simulada com pluviometria determinada de: 20 mm h<sup>-1</sup>, 40mm h<sup>-1</sup>, 60 mm h<sup>-1</sup> e 80 mm h<sup>-1</sup> por um tempo de 1 a 2 segundos. Em seguida deixa-se secar por 6h e passa o trigo pela peneiração com as seguintes medidas das grades: 1,18mm, 2mm, 3,36mm, 4mm 4,8mm e 5,6mm, selecionando os grãos retidos em cada grade da peneira. Este segue para a estufa, para o processo de retirada da água e posteriormente pesagem. Determinando assim o diâmetro dos grãos pela Equação 3.2, proposto pelo mesmo autor. Definida abaixo:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

$d$  = Diâmetro da gota, em mm;

$m$  = Massa média da gota, em MG;

$\rho$  = Massa específica da água, em mg mm<sup>3</sup>.

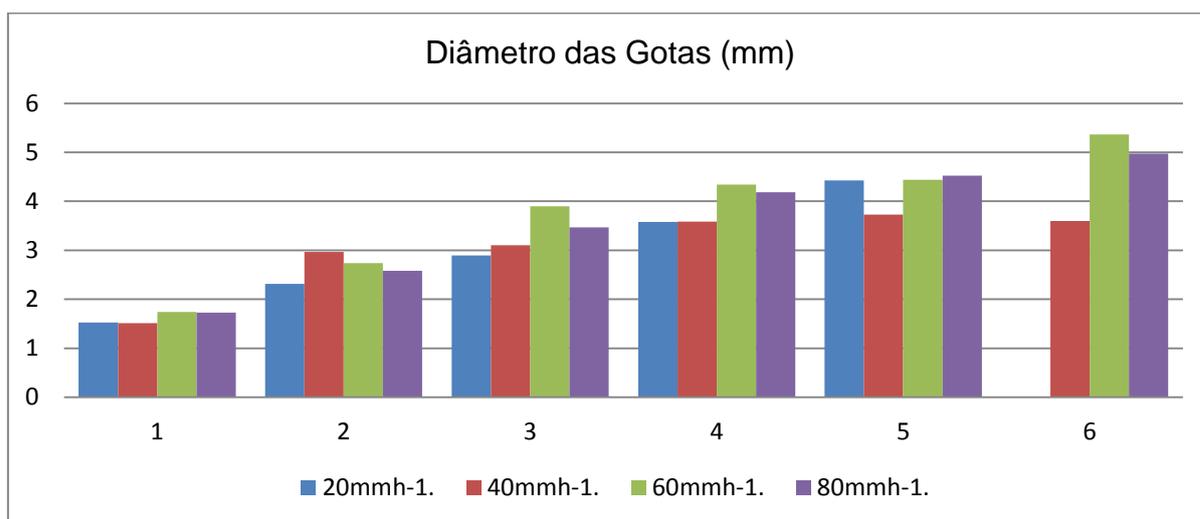
A tabela 9 tabela mostra os diâmetros das gotas de água, encontrado para cada pluviometria e na sequência a demonstração no gráfico 14.

Tabela 9 - Característica do diâmetro da gota (mm) em função da chuva simulada de:

20mmh <sup>-1</sup> .	40mmh <sup>-1</sup> .	60mmh <sup>-1</sup> .	80mmh <sup>-1</sup> .
1,523	1,512	1,738	1,728
2,316	2,965	2,737	2,582
2,897	3,106	3,899	3,471
3,581	3,584	4,342	4,188
4,428	3,730	4,440	4,521
	3,601	5,367	4,976

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 16 - Relação diâmetro das gotas em função da pluviometria.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

### 3.5.3 Determinação do volume das gotas

Para calcularmos o volume da gota no simulador utilizamos na Equação 3.3. O raio extraído do diâmetro das gotas que foram mencionadas, conforme Equação descrita por Claudinei (2001), porém as dimensões dos volumes foram descritos na Tabela 10 e gráfico 17 conforme pluviometrias

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^2$$

Equação 3.3

$V$ = Volume da gota ( $\text{cm}^3$ )

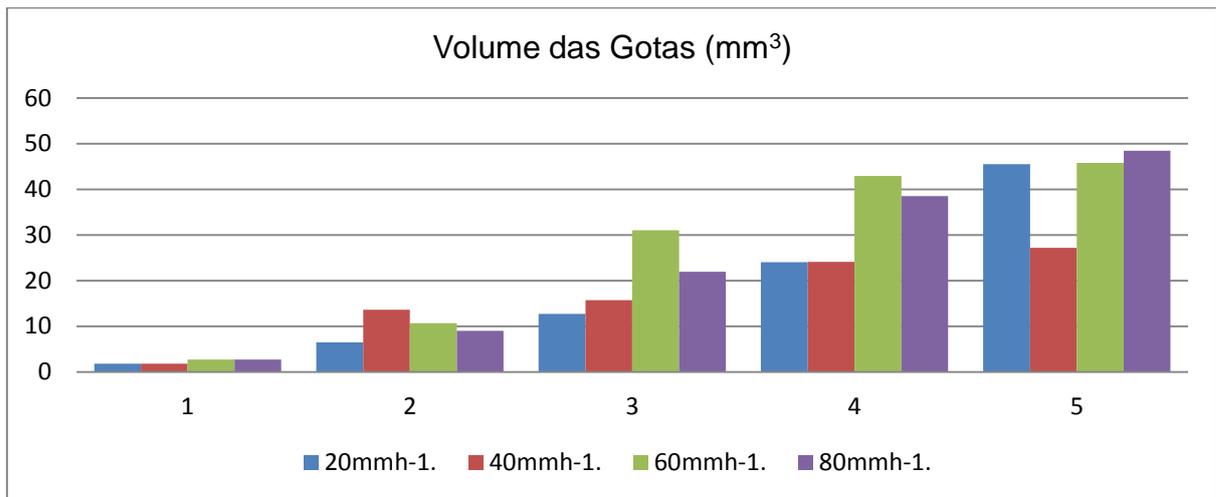
$R$ = Raio da gota (cm)

Tabela 10 - Volume das gotas de chuvas ( $\text{mm}^3$ ) em função das pluviometrias.

$20\text{mmh}^{-1}$ .	$40\text{mmh}^{-1}$ .	$60\text{mmh}^{-1}$ .	$80\text{mmh}^{-1}$ .
1,8	1,8	2,7	2,7
6,5	13,6	10,7	9,0
12,7	15,7	31,0	21,9
24,0	24,1	42,9	38,5
45,5	27,2	45,8	48,4
	24,5	81,0	64,5

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa).

Gráfico 17 - Volume das gotas de chuvas ( $\text{mm}^3$ ) em função das pluviometrias.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

#### 3.5.4 Altura da queda

Como o simulador foi colocado a uma altura de 3m, com relação ao solo, logo a queda das gotas será de **3m**, para qualquer que seja a pluviometria.

#### 3.5.5 Velocidade terminal e tempo da queda das gotas

Para o cálculo da velocidade terminal ou a velocidade de impacto das gotas com o solo e o tempo da queda das gotas, foram utilizados as Equações 3.4, 3.5 e 3.6, descrita por Hill, Horton e Cruse (1985) e citado por Silva et al. (1995), e por Ribeiro *et al.* (2002). Considerando-se a altura da queda da gota de 3m e a

aceleração da gravidade de  $9,81\text{m s}^{-2}$ , calcula-se o coeficiente de atrito da gota com o ar tendo como referência o diâmetro das gotas. Para tal foi usado a Equação 3.4, 3.5 e 3.6 respectivamente.

$$T_{qg} = \text{arc cos}[EXP(Z.\mu)].(g.\mu)^{-1/2} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$V_{imp} = (g/\mu)^{\frac{1}{2}}. \tan[T(g.\mu)^{1/2}] \quad \text{Equação 3.5}$$

$$\mu = \left( \frac{0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3}{1,109D} \right) \quad \text{Equação 3.6}$$

onde:

$T_{qg}$  = Tempo de queda da gota (s)

$V_{imp}$  = Velocidade de impacto das gotas ( $\text{ms}^{-1}$ )

$Z$  = Altura de queda da gota (m)

$\mu$  = Coeficiente do atrito do ar (adimensional)

$g$  = Aceleração da gravidade ( $9,81\text{ms}^{-2}$ )

$D$  = diâmetro da gota (mm)

Os valores encontrados para os parâmetros do coeficiente de atrito, tendo como base a Equações 3.4, foram representados na tabela 11, sendo adimensional, levando em conta a pluviometria da chuva simulada.

Tabela 11 - Coeficiente de atrito ( $\mu$ ) da gota com a água em função da pluviometria.

$20\text{mmh}^{-1}$ .	$40\text{mmh}^{-1}$ .	$60\text{mmh}^{-1}$ .	$80\text{mmh}^{-1}$ .
0,0018	0,0018	0,0027	0,0027
0,0065	0,0136	0,0107	0,0090
0,0127	0,0157	0,0310	0,0219
0,0240	0,0241	0,0429	0,0385
0,0455	0,0272	0,0458	0,0484
	0,0245	0,0810	0,0645

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

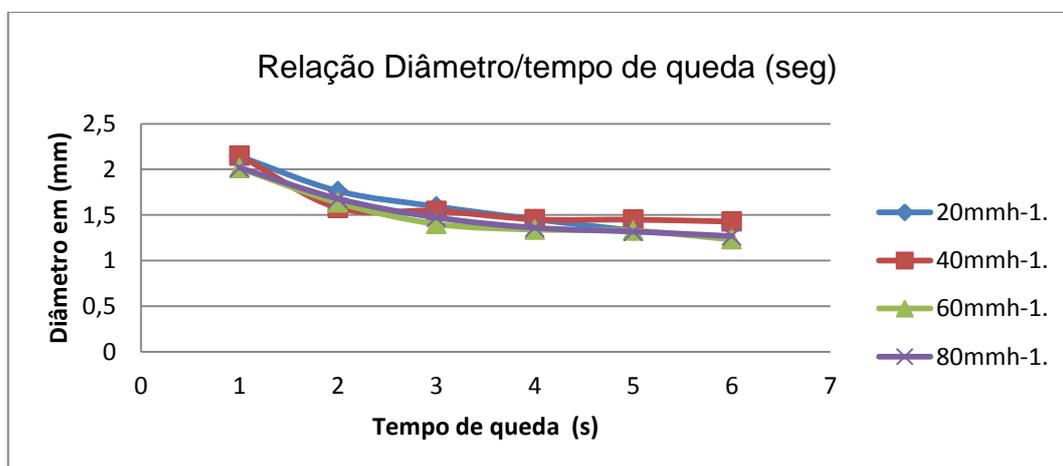
Foi calculada a relação do diâmetro com o tempo de queda das gotas da chuva no simulado para cada pluviometria. Demonstrado na tabela 12 e gráfico 18, tendo como base a equação 3.4.

Tabela 12 - Relação do diâmetro (mm) com Tempo de queda das gotas de chuvas (seg).

20mmh <sup>-1</sup> .	40mmh <sup>-1</sup> .	60mmh <sup>-1</sup> .	80mmh <sup>-1</sup> .
2,1430	2,1500	2,0137	2,0189
1,7625	1,5770	1,6341	1,6775
1,5933	1,5448	1,4007	1,4718
1,4523	1,4517	1,3394	1,3595
1,3287	1,4488	1,3272	1,3175
	1,4272	1,2312	1,2679

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 18 – Relação diâmetro (mm) com Tempo de queda das gotas de chuvas (seg).



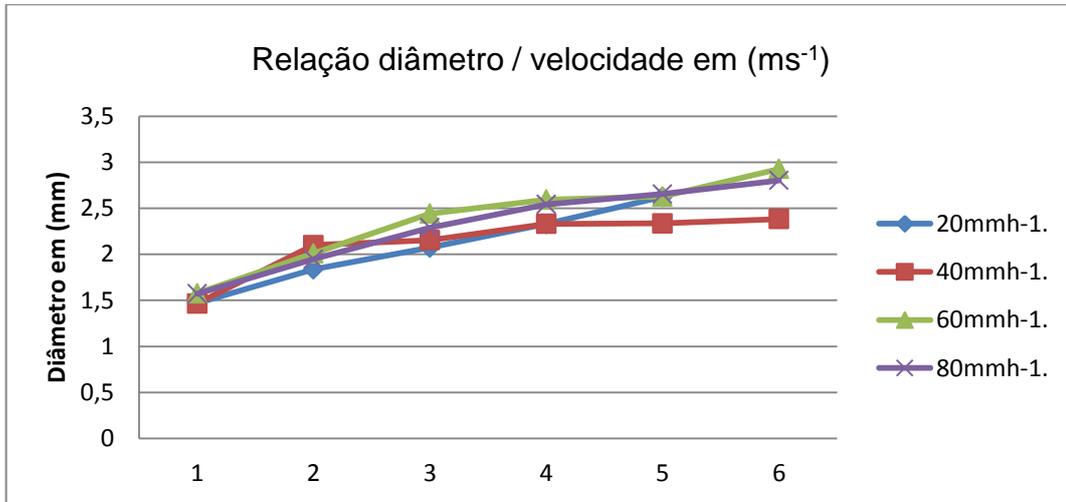
Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

A velocidade de impacto das gotas de chuva (ms<sup>-1</sup>) em função da pluviosidade da chuva simulada descrito na tabela 13 e gráfico 19.

Tabela 13 - Velocidade de impacto das gotas de chuva simulada (ms-1).

20mmh <sup>-1</sup> .	40mmh <sup>-1</sup> .	60mmh <sup>-1</sup> .	80mmh <sup>-1</sup> .
1,4713	1,4660	1,5771	1,5725
1,8375	2,1000	2,0106	1,9482
2,0735	2,1542	2,4427	2,2901
2,3297	2,3310	2,5947	2,5426
2,6236	2,3371	2,6277	2,6547
	2,3831	2,9273	2,8034

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 19 - Velocidade de impacto das gotas de chuva simulada (ms<sup>-1</sup>).

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

### 3.5.6 Energia cinética da chuva no simulador

A energia cinética dissipada produzida pela queda das gotas da chuva produzida no simulador foi calculada conforme a Equação 3.7, em que a massa foi igual ao volume, considerando-se que a densidade da água é igual a unidade, cujo resultados estão descrito na tabela 14 e gráfico 20.

$$E_c = \frac{m \cdot V^2}{2}$$

Equação 3.7

onde:

$E_c$  = Energia cinética das gotas ao tocar o solo do laboratório (J)

$m$  = Massa de cada gota de chuva (Kg)

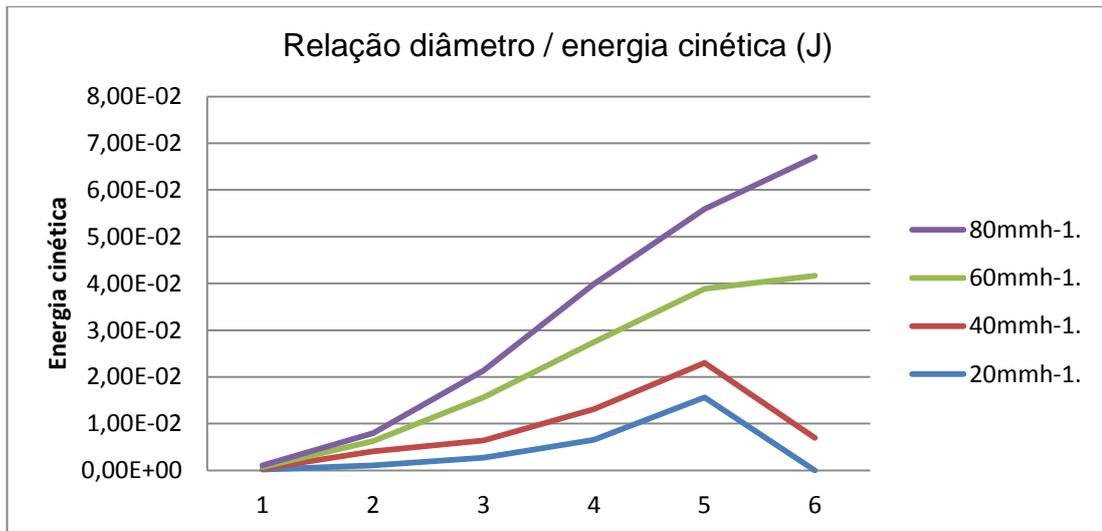
$V$  = Velocidade da gota ao tocar o solo (ms<sup>-1</sup>)

Tabela 14 - Energia cinética das gotas de chuva simulada ao ciar no solo em Joule.

20mmh <sup>-1</sup> .	40mmh <sup>-1</sup> .	60mmh <sup>-1</sup> .	80mmh <sup>-1</sup> .
2,00E-04	1,95E-04	3,42E-04	3,34E-04
1,10E-03	3,01E-03	2,17E-03	1,71E-03
2,74E-03	3,64E-03	9,26E-03	5,74E-03
6,52E-03	6,55E-03	1,44E-02	1,24E-02
1,56E-02	7,42E-03	1,58E-02	1,71E-02
	6,94E-03	3,47E-02	2,54E-02

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 20 - Energia cinética das gotas de chuva simulada ao ciar no solo em Joule.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

### 3.5.7 Calculo da intensidade de chuva

Cálculo da intensidade da chuva no simulador, Equação 3.8, foi considerando os seguintes dados utilizados no processo: 1L, 2L, 3L e 4L de água coletada, num vasilhame de 50cm x 60cm (0,3m<sup>2</sup>), submetido a uma chuva de 10 minutos.

$$I_c = \left( \frac{V}{A.t} \right) . 60 \quad \text{Equação 3.8}$$

onde:

$I_c$  : Intensidade da chuva (mm h<sup>-1</sup>)

$V$  : Volume das gotas de água coletada (L)

$A$  : Área do vasilhame que foi utilizado para a coleta da água (m<sup>2</sup>)

$t$  : Tempo de coleta da água (minuto)

Portanto, a intensidade da chuva calculada para cada pluviometria foi **I = 20mm h<sup>-1</sup>, 40mm h<sup>-1</sup>, 60mm h<sup>-1</sup> e 80mm h<sup>-1</sup>.**

### 3.5.8 Energia cinética segundo Wischmeier & Smith (1958)

Wischmeier & Smith (1958) propuseram a Equação 3.9 para os cálculos da energia cinética da chuva simulada. Esta equação foi modificada para atender ao

sistema internacional de medidas por Foster et al. (1981), onde a intensidade da chuva ( $I$ ) é descrita pela Equação 3.8.

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I. \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

$E_c$  = Energia cinética da chuva ( $\text{MJ ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ )

$I$  = Intensidade da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ )

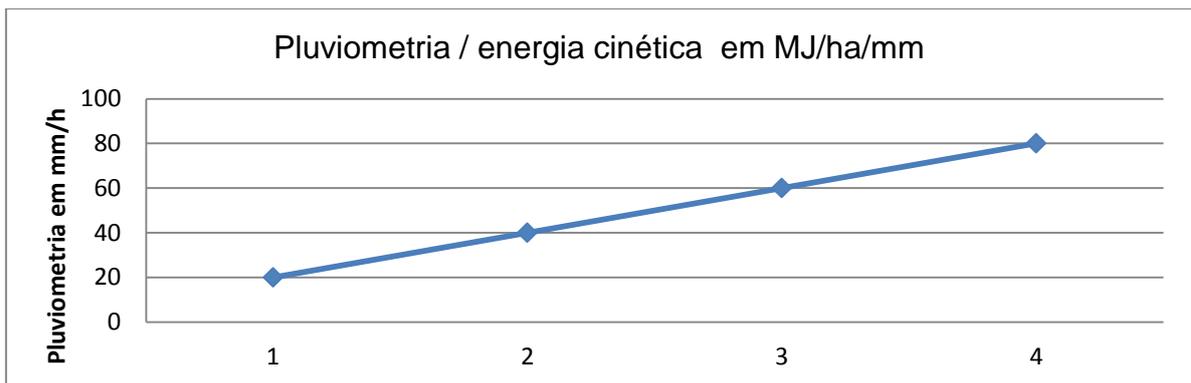
Portanto a energia cinética encontrada segundo a equação de Wischmeier & Smith para a intensidade de chuvas de: 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, e tempo de coleta de 10, minutos estão representadas no quadro 1 em  $\text{MJ ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ , e gráfico 19.

Quadro 1 - Dados da relação da energia cinética com a pluviometria.

Pluviometria em mm	Energia cinética em $\text{MJ ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$
20	2,32
40	2,58
60	2,74
80	2,85

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 21 - Relação do crescimento da energia cinética com a pluviometria.



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Logo, a intensidade da chuva, segundo Wischmeier & Smith (1958), deve levar em consideração a parcela da área de eficiência do simulador (60x50)cm igual a  $0,3\text{m}^2$ , obtendo a quantidade de gotas de chuva na Equação 3.10.

$$N_{tg} = \frac{V_t}{V_g}$$

Equação 3.10

onde:

$N_{tg}$  : Número total de gotas (Adimensional)

$V_t$  : Volume total da água coletada (L)

$V_g$ : Volume da gota (L)

A energia cinética total segundo Wischmeier & Smith (1958), da área de submissão será o número de gotas, conforme Quadro 2, de acordo com a Equação 3.9, pela energia de cada gota.

Quadro 2 - Diâmetro das gotas / número de gotas.

Diâmetro (mm)	Nº total de gotas
1	3,8297x10 <sup>6</sup>
2	3,7746x10 <sup>5</sup>
3	1,4147x10 <sup>5</sup>
4	5,9683x10 <sup>4</sup>
5	30557x10 <sup>4</sup>

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Pode-se dizer que a energia cinética total da área em que foi submetida será o número de gotas, pela energia cinética de cada gota.

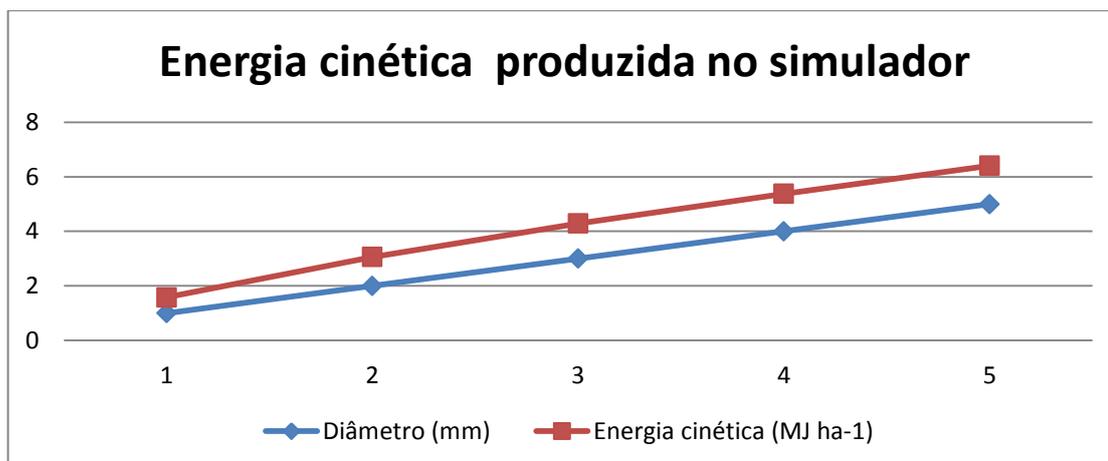
Logo, conclui-se que a energia cinética por há, para os diferentes diâmetros de gotas de chuva estão representados no quadro 3, e gráfico 22.

Quadro 3 - Relação diâmetro gotas x Energia cinética (MJ há<sup>-1</sup>).

Diâmetro (mm)	Energia cinética (MJ há <sup>-1</sup> )
1	0,58
2	1,06
3	1,29
4	1,38
5	1,41

Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

Gráfico 22 - Relação diâmetro gotas x Energia cinética (MJ há-1).



Fonte: (Dados coletados durante a pesquisa)

### 3.5.9 Calibração dos aspersores

Os aspersores foram fixados numa tubulação a 2,8m de altura e submetidos a pressões de  $0,4\text{kgf/cm}^2$ , aproximadamente 36kpa, e caudal calibrados com uma pipeta de 1L, graduada em mL, garantindo uma vazão de 40L/h. A pressão na linha foi medida com manômetro colocado na mangueira a 10cm dos aspersores. Cada aspersor foi ajustado individualmente para obtenção dos mesmos valores. Em seguida foi determinada uma distância de 5 cm de um aspersor com relação ao outro, sendo este o melhor resultado com relação as distâncias entre eles para esta aplicação, pois este simulador pode variar a pluviometria de 1mm/h a 200mm/h, isso é possível porque os aspersores podem trabalhar individualmente ou em paralelo, em instantes diferentes ou ao mesmo tempo, conforme lógica (*software*).

### 3.5.10 Acionamento das eletroválvulas

As eletroválvulas trabalham com tensão elétrica de 220V e são acionadas por relês cuja tensão de alimentação é de 12V, e tensão e corrente de contato 110V/10A e 220V/5A, que por sua vez são comandados pela lógica de programação (*software*) contida no arduino.

### 3.5.11 Lógica de acionamento

Para se determinar a lógica de funcionamento do simulador são necessários alguns dados e informações: saber e manter a pressão hidráulica constante (36Kpa);

ajustar a vazão dos aspersores (40 litros por hora), saber a quantidade de aspersores (06).

Por exemplo, para se obter uma pluviometria de 20mm por 1 hora e classificação da chuva do tipo avançada, deve-se proceder da seguinte forma:

1º passo: Para que possa ser classificado segundo Worne & Jens (1941), devemos dividir o tempo e a pluviometria total da chuva (em minuto) em três (3), neste caso 60 minutos dividido por 3 igual a 20 minutos, e 20mm dividido por 3 igual a **6,6mm** logo temos,  $T_1$  início (AV) = **20** minutos, e pluviometria de **6,6mm**;  $T_2$  meio (IT) = **20** minutos e pluviometria de **6,6mm** e  $T_3$  fim (AT) = **20** minutos e pluviometria de **6,6mm**. Sendo a chuva do tipo **avançada** implica dizer que a chuva de maior intensidade (Pico) será em  $T_1$  no início, no primeiro terço do tempo total.

2º passo: Qual é o pico da chuva? Não encontrou-se estudos que determinasse padrões de tempo e intensidade dos picos, porém se sabe que os picos são sempre em intervalos pequenos de chuvas e as intensidades (picos) são as maiores intensidades registradas. Não existe uma regra para tal porém vamos determinar um pico de 40mm da intensidade e tempo de 10 minutos, ou seja durante o primeiro terço do tempo total da chuva haverá uma intensidade de 40mm em um intervalo de tempo de 10 minutos.

Sendo uma chuva de intensidade de  $20\text{mm h}^{-1}$ , implica dizer que numa área um metro quadro cairá uma chuva cujo volume será de 20 L, com base na equação 06, calcula-se o volume de uma chuva de 40mm em 5 minutos, obtendo se  **$6,6\text{ L h}^{-1}$**  que corresponde a uma pluviometria de  **$6,6\text{mm h}^{-1}$** , logo associando a pluviometria do primeiro terço, mais do segundo terço, e a do terceiro terço temos a pluviometria total, ( $T_1= 6,7\text{mm e } t=20\text{ min} + T_2=6,7\text{mm e } T_3=6,7\text{mm e } t=20\text{ min}$ ) =  $20\text{mm h}^{-1}$  é desta forma que o simulador consegue selecionar a pluviometria a partir do dados de entrada. No quadro 4, a lógica de funcionamento do simulador é descrita, segundo a classificação de Horner & Jens.

Quadro 4 - Exemplo de classificação da chuva segundo Horner &amp; Jens.

Classificação conforme Horner&Jens	
Divide-se o tempo total em três partes Iguais: $T_t/3 = T_1$ (Início); $T_2$ (Meio); e $T_3$ (Fim).	
Adicionar no tempo de pico, sendo a intensidade em mm, e o tempo em (h).	
Avançado (AV)	<p><math>T_1 = (T_t/3)</math> e <math>I_1 = (I_t/3 + V_{pico})</math> sendo <math>V_{pico} = (I_{pico} * T_{pico})/60</math>, sendo que deve dividir a pluviometria restante para (<math>T_2</math> e <math>T_3</math>). Porém para acionar os aspersores obedecem a lógica descrita abaixo;</p> <p>Se <math>I \leq 40 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>40 \text{ mm} &lt; I &lt; 80 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01 e 02, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>80 \text{ mm h}^{-1} &lt; I &lt; 120 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01,02 e 03, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>120 \text{ mm h}^{-1} &lt; I &lt; 160 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01,02,03 e 04, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p>
Intermediário (IT)	<p><math>T_2 = (T_t/3)</math> e <math>I_2 = (I_t/3 + V_{pico})</math> sendo <math>V_{pico} = (I_{pico} * T_{pico})/60</math>, sendo que deve dividir a pluviometria restante para (<math>T_1</math> e <math>T_3</math>). Porém para acionar os aspersores obedecem a lógica descrita abaixo;</p> <p>Se <math>I \leq 40 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>40 \text{ mm} &lt; I &gt; 80 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01 e 02, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>80 \text{ mm h}^{-1} &lt; I &gt; 120 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01,02 e 03, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>120 \text{ mm h}^{-1} &lt; I &gt; 160 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01,02,03 e 04, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p>
Atrasado (AT)	<p><math>T_3 = (T_t/3)</math> e <math>I_3 = (I_t/3 + V_{pico})</math> sendo <math>V_{pico} = (I_{pico} * T_{pico})/60</math>, sendo que deve dividir a pluviometria restante para (<math>T_1</math> e <math>T_2</math>). Porém para acionar os aspersores obedecem a lógica descrita abaixo;</p> <p>Se <math>I \leq 40 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>40 \text{ mm} &lt; I &gt; 80 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01 e 02, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>80 \text{ mm h}^{-1} &lt; I &gt; 120 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01,02 e 03, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p> <p>Se <math>120 \text{ mm h}^{-1} &lt; I &gt; 160 \text{ mm h}^{-1}</math> aciona aspersor 01,02,03 e 04, o tempo correspondente ao volume solicitado;</p>

O simulador desenvolvido atendeu as especificações segundo solicitações dos pesquisadores tais como: classificação segundo Horner e Jens (1941) neste caso, em função da introdução da eletrônica embarcado o simulador consegue desenvolver chuvas do tipo avançada atrasada e intermediário. Este mesmo simulador atende as especificações segundo Christianse (1942), atingindo de 84,22% do CUC (coeficiente de uniformidade de Christianse). Para os pesquisadores um simulador é reconhecido como aceitável quando o CUC é maior que 70%. Para finalizar foi medido o diâmetro de cada gota que cai do simulador

sobre o solo ou a amostra, e calculada a energia cinética dispensada ao cair no solo, neste atendendo as especificações segundo Wischmeier e Smith (1958).

O simulador descrito neste trabalho teve como função corrigir as falhas mencionadas por pesquisadores da área de simuladores já desenvolvido, com percentual superior a 70% tendendo.

### **3.6 Conclusão**

Este artigo desenvolveu um modelo de simulação de chuva variável aleatório para monitoramento de encostas por modelo experimental. Foram reproduzidas em ambiente laboratorial, as condições climáticas e geológicas que favorecem o deslizamento e que estão presentes na topografia urbana das cidades brasileiras.

#### **3.6.1 Trabalhos futuros**

Como trabalho futuro é proposta a avaliação de efeitos da poluição hidrológica, que compreende a simulação de chuvas poluitivas, como chuvas ácidas ou contaminadas com poluição industrial, nos processos de deslizamento de encostas. Para tal deverá ser estudados a composição química das chuvas, com os respectivos diâmetros das gotas.

## REFERÊNCIAS

ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p.337-344. 2002.

**ARDUINO DIECIMILA. Componentes. Disponível em:**<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDiecimila> Acesso em: nov. 2012.

CARVALHO, Daniel F. de *et al.* Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 9, n.1, p. 7-14, 2005.

CHRISTIANSEN, J.P. **Irrigation by sprinkling**. University of California, Agricultural Experiment Station, Bulletin n. 670. 124p . 1942.

FOSTER, G. R. *et al.* Conversion of the universal soil loss equation to SI units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.

FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão**. ESAIQ- Departamento de Engenharia Rural. Serie didática 3. 53p. 1992.

HILL, R. L.; HORTON, R.; CRUSE, R. M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1264-1270, 1985.

HORNER W. W; JENS, S.W. **surface runoff determination from rainfall without using coefficients**. Transaction of the ASAE. V107. P1039-1117. 1941.

MEHL, H.U. Caracterizações **de padrões de Chuvas em Santa Maria (RS) e suas Relações com as Pedras de Solo e Água Entre Sucos**. Santa Maria RS: Universidade federal de Santa Maria (UFSM). (Mestrado em Agronomia). 2000.

MEYER, L.D, HARMON, W.C. **multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes**. Transaction of the SAE, St. Joseph. V.22, n.1, p.100-103, 1979.

MEYER, Mc Cune; RAINFALL, D.L. Simulator for runoff plots. **Agricultural engineering**, St. Joseph, v.39, p.644- 648, 1958.

MONTEBELLER, Claudenei A., et al.. **Avaliação hidrológica de um simulador de chuvas pendular**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol.5. Nº1 Campina Grande Jan./Apr.2001.

MORIN, J.; GOLDBERG, D.; SEGNER, I. **A rainfall simulator with a rotating disk. Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.10, 1967.p74-79.

RIBEIRO, Bruno Teixeira. Calibração e uso de Minissimulador de Chuva Para Estudos de Erosão e Poluição do Solo. Editora da Universidade Federal de Lavras. **Boletim Técnico** - n.º 77 - p. 1-17. Lavras- MG. 2002.

RICHA, Elder Manuel de Moura, *et al.* Uniformidade de Distribuição de Água por Aspersão Convencional na Superfície e no Perfil do Solo. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. Capina Grande, PB. DEAg/UFPB. v3, n2, p.154-160, 1999.

SILVA, M. L. N. *et al.* Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em Latossolos e sua relação com características químicas e mineralógicas. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 176-182,abr./jun. 1995.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Rainfall energy and its relationship to soil loss. American Geophysies V. Transactions**, v.39, p.285-291, 1958.

**4 DISPOSITIVO SENSOR DE MONITORAMENTO DE INSTABILIDADE DE SOLOS E ESTRUTURAS POR MEIO DE SENSORES MULTIPARAMÉTRICOS COM REDUNDÂNCIA MODULAR.**

## DISPOSITIVO SENSOR DE MONITORAMENTO DE INSTABILIDADE DE SOLOS E ESTRUTURAS POR MEIO DE SENSORES MULTIPARAMÉTRICOS COM REDUNDÂNCIA MODULAR.

### 5 RELATÓRIO DESCRITIVO

#### Campo da Invenção

A presente invenção refere-se a um dispositivo do tipo sensor de monitoramento de instabilidade de solos ou estruturas, que utiliza técnica de tolerância à falha baseada em redundância modular, para aumentar a confiabilidade das informações geradas pelo sensor. O dispositivo denominado sensor multiparamétrico é caracterizado por: i) elemento de inserção no solo ou estrutura, com finalidade de fornecer sustentação mecânica dos sensores individuais e funcionar como elemento de captação de sinais e guia de onda para conduzir estes sinais até os sensores individuais, podendo ser, em uma de suas formas, uma haste de aço inox ou de qualquer outro tipo de aço ou material, a depender do tipo de solo ou do uso, protegida contra as intempéries da natureza por um invólucro; ii) strain gage's ou extensômetros; iii) sensores piezoelétricos; iv) sensores de umidade de solo; v) acelerômetros de três eixos (X,Y e Z) associado a giroscópios; vi) componentes eletrônicos para adequação dos sinais dos elementos sensores; vii) circuitos de conversão AD. viii) microprocessador para o processamento dos sinais; ix) circuitos de rádio transceptor para envio de informações; x) fonte de alimentação baseada em tecnologia de baterias, energia solar ou outras fontes de energia. A associação dos sensores, citados nos parágrafos acima, configura o sensor multiparamétrico que gera informações sobre os deslocamentos de massa de solo ou rocha, ou outras estruturas de solo, permitindo a realização de previsões sobre estes eventos. Além das aplicações acima indicadas, o sensor também poderá ser utilizado para realizar medições, em alta e baixa velocidade, das variações do ângulo de inclinação de terrenos e estruturas; no monitoramento dos processos de deslocamento de massa de gelo em geleiras e no monitoramento em áreas de erupções vulcânicas, podendo detectar as movimentações de massa nestas regiões. Outra área de aplicação prevista consiste no monitoramento de construções,

detectando os abalos provocados pelos bate estacas, usados em obras civis, e outros eventos sísmicos, ou modificações das estruturas construídas, provocados, por exemplo, por rupturas devido a excesso de carga ou oxidação de estruturas metálicas.

5

#### Antecedentes da Invenção

Diversos desenvolvimentos têm sido realizados na busca de sistemas de monitoramento que permitam prever a iminência de deslizamentos de terra e movimentos de massas e estruturas, antes de sua efetiva ocorrência.

10

A patente JP2007155550 – “System for Detecting Collapse of Sloping Land”, datado em 06.12.2005, refere-se à utilização de dispositivos de fibra óptica. O princípio da fibra óptica estabelece a transmissão de um sinal de luz que entra em uma extremidade da fibra instalada em uma encosta. O sinal de luz que sai da fibra sofre variações com relação ao sinal de referência de entrada, que trazem

15 informações sobre as forças produzidas ao longo da fibra devido as deformações do solo. Estas informações são usadas para previsão dos deslizamentos.

20

Uma das barreiras à utilização deste sensor é o seu alto custo, o sensor é composto por uma longa fibra óptica em torno da qual são instalados vários suportes fixados no solo que produzem curvatura e tensão na fibra e que convertem a

25 deformação do solo em força mecânica sobre a fibra. Outro ponto importante são as dificuldades na instalação deste sensor, principalmente se existirem construções nas encostas.

25

Além disso, a determinação da possibilidade de deslizamento é realizada a partir de um único parâmetro medido que diz respeito às tensões mecânicas

30 distribuídas ao longo da fibra, de modo que este sensor não apresenta características de redundância de parâmetros para o aumento da confiabilidade da previsão.

30

A patente JP2007128187 – “Collapse Prediction System Using Batteryless RFID Tag with Sensor Input Function”, datado em 01.11.2005, consiste num modelo

baseado em sensores do tipo acelerômetros, baseados em princípios magnéticos com três direções X, Y e Z para a detecção do deslocamento de massa, integrado a

uma etiqueta de RFID (Radio-Frequency IDentification) sem baterias. Uma rede de captura de dados das etiquetas RFID (RFID tags) é providenciada por meio de receptores alimentados por baterias solares que encaminham, via um link de rádio, os sinais capturados na encosta, que são emitidos pelas etiqueta de RFID, para centrais de tratamento responsáveis pela geração de alarmes associados à detecção de movimentações que indicam possibilidade de deslizamento.

No invento acima citado é considerado apenas um tipo de sensor para a medição de um único tipo de parâmetro, que é a aceleração associada aos movimentos do solo. Deste modo, outros eventos ligados as movimentações de solo, não necessariamente relacionadas ao deslizamento, como, por exemplo, propagação de ondas mecânicas provenientes de alguma fonte, podem provocar falsos alarmes. Esta solução não apresenta assim, redundância na detecção de sinais do solo para aumento da confiabilidade de previsão de deslizamento.

A patente WO/2010/086584 – “Apparatus And method for Monitoring Soil Slope Displacement Rate by Detecting Acoustic Emissions”, datada em 29.01.2009, consiste em um guia de ondas introduzido na encosta, que captura ondas acústicas emitidas pelo solo, devido ao movimento de suas camadas e os encaminha para um sensor acústico que processa a quantidade de ocorrência de pulsos acústicos no sensor para inferir a velocidade do escorregamento do solo. Quando a velocidade inferida ultrapassa um dado limite, um sinal de alerta é gerando para indicar a possibilidade de deslizamento.

A proposta descrita neste invento não considera a utilização de redundância do sensoriamento, não utilizando a análise de múltiplos parâmetros para aumentar a confiabilidade da previsão de deslizamento.

A patente CN102354432 – “Landslip and debris flow early warning system based on MESH network”, datada em: 30.09.2011, considera um sistema composto por um pluviômetro, um sensor de pressão de fibra óptica e um extensômetro. As informações geradas são enviadas por um sistema de rede lógica (MESH) do tipo sem fio, para monitoração e processamento, em tempo real, das informações oriundas dos eventos de movimento de massa. Porém, a patente não retrata os processos de redundância e também não leva em consideração outros tipos de

sensores, nem a combinação dos diversos sensores em um único elemento sensitivo.

5 Outra deficiência observada no atual estado da técnica é a falta de um modelo claro que relacione o comportamento dos sinais e os eventos desencadeadores destes, de modo a garantir a confiabilidade das predições de deslizamento de encosta. Esta carência vem do fato de que modelos matemáticos precisos, que possam associar sinais detectados por sensores aos eventos dinâmicos de deslizamento, são muito difíceis de serem obtidos, devido à grande complexidade do problema que envolve um grande número de variáveis e  
10 parâmetros.

As limitações acima descritas no atual estado da técnica e a importância do problema abordado demandam a criação de novas invenções como a descrita a seguir.

## 15 Descrição da Invenção

O problema técnico para o qual esta invenção propõe uma solução consiste em obter um sensor de predição de instabilidade de solos e estruturas, baseado em sensor redundante multiparamétrico, capaz de gerar previsões de deslizamento de solo e outros eventos em estruturas.

20 Para resolver o problema técnico acima descrito, a presente invenção consiste em um dispositivo do tipo sensor multiparamétrico caracterizado por:

i) Elemento de inserção no solo ou estrutura, com finalidade de fornecer sustentação mecânica dos sensores individuais e funcionar como elemento de captação de sinais e guia de onda para conduzir estes sinais ate os sensores  
25 individuais, podendo ser, em uma de suas formas, uma haste na qual foi fixado um conjunto de sensores. Este elemento deve ser introduzido no local de monitoramento e protegido contra as intempéries da natureza por meio de um invólucro, equipado com uma tampa de acesso Os sensores devem ser alimentados por uma fonte de tensão elétrica;

ii) Acelerômetro de três eixos (X, Y, Z) associado a um giroscópio que dará informações precisas das acelerações devidas aos movimentos de massa e as direções em graus dos referidos deslocamentos;

5 iii) Strain Gage ou Extensômetro que consiste de dispositivo resistivo capaz de detectar as deformações da haste produzidas pela energia mecânica emitida pelos movimentos de massa do local de monitoramento;

10 iv) Sensor piezoelétrico ou sensor sônico ou ultrassônico, construído a base de cristal. Este sensor transforma energia mecânica em energia elétrica e vice-versa em um domínio de frequência definido. Este sensor tem por finalidade a detecção de sinais de ondas acústicas, emitidos durante os processos iniciais que antecedem os deslizamentos de solos ou ruptura de estrutura.

15 v) Sensor de umidade que consiste em um dispositivo que tem como função gerar informação sobre a quantidade de água no solo do local de monitoramento. Pela determinação do instante de tempo da saturação do solo é possível avaliar o risco de deslizamento.

vi) Fonte de alimentação.

vii) Circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais dos sensores, de conversão analógico-digital (AD) e de transmissão de dados.

20 viii) Processador digital para pré-processamento dos sinais e controle do envio de dados para estação remota de tratamento e alarme.

25 Além dos sensores citados acima, outros sensores podem ser incorporados como: sensor de pressão, temperatura, pluviômetro ou outros, aumentando a confiabilidade da avaliação de risco, pelo uso de um conjunto mais extenso de parâmetros indicativos da possibilidade de desabamento (aumento do nível de redundância).

30 O conjunto resultante da associação de diversos sensores na mesma haste configura o novo sensor multiparamétrico, utilizando redundância modular para prover o sistema com um mecanismo de tolerância à falha de avaliação de risco de deslizamento. Neste mecanismo, caso um determinado sensor instalado na haste não consiga gerar informação que caracterize uma determinada movimentação do

solo, devido as suas características, outros sensores com características distintas perceberão essa movimentação e garantirão uma detecção eficaz.

Os sinais oriundos dos sensores são conduzidos a um aparato eletrônico que condiciona os sinais. Em seguida, estes sinais são enviados a um conversor AD e a um microprocessador, o qual os converte em dados e os envia a um transceptor que compõe uma rede lógica. Estas informações serão, então, enviadas a uma estação de tratamento de dados, para subsidiar as avaliações de risco e as tomadas de decisão com base em modelos preditivos apropriados.

Este sensor multiparamétrico, em função da sua redundância modular, consegue detectar os instantes de tempo em que ocorrem as pré-fraturas (sinais que antecedem o deslizamento de encosta), podendo inclusive determinar a direção da formação das pré-fraturas em função dos sinais do acelerômetro e do giroscópio associado. Dessa forma, obtêm-se uma maior confiabilidade na predição, a partir das múltiplas informações geradas pelos diversos sensores.

Os modelos preditivos usados para avaliar os dados gerados pelos sensores devem considerar as informações vindas dos N sensores como um vetor N-dimensional, sendo que as quantidades e tipos de sensores dependerão do tipo específico de monitoramento desejado (solo, estruturas de construções) e do grau de redundância desejada. O modelo matemático que avalia os sinais oriundos dos sensores exploram as informações redundantes, embora oriunda de sinais diferentes, provenientes destes sensores.

Segue abaixo uma descrição da invenção, em uma de suas modalidades preferidas:

Uma modalidade preferida para a invenção apresenta a seguinte estrutura:

i) Uma haste cilíndrica de aço inox (detalhe 9 da Figura 1 e Figura 2) de 2,5 m de comprimento, 12 mm de diâmetro, com cortes (detalhes 2, 4 e 6 da Figura 2). Estes cortes devem apresentar 150 mm de distância da extremidade superior da haste e possuir 25 mm de comprimento e 5 mm de profundidade, sendo utilizado para fixação dos sensores acústico (piezoelétrico) e o strain gage. O sensor é fixado no solo conforme a Figura 3 (detalhes s1, s2, s3, s4 e s5).

ii) O acelerômetro fica na extremidade superior da haste (detalhe 4 da Figura 1), fixado por um parafuso para capturar as movimentações nesta região da haste.

5           iii) O sensor de umidade fica colocado a 200 mm de distância da extremidade inferior da haste (detalhe 10 da Figura 1) sendo formado por um anel de material eletricamente isolante (detalhes 8, 10 e 12 da Figura 2) que revestirá sob pressão a haste, normalmente de PVC ou outro polímero, com 3 mm de espessura. Sobre este material isolante são posicionados, sob pressão, dois eletrodos no formato de anéis em aço inox (detalhes 9 e 11 da Figura 2), medindo 50 mm de comprimento e 3 mm de espessura, separados um do outro por uma distância de 50 mm (detalhe 10 da  
10   Figura 2).

iv) invólucro protetor: A parte superior da haste deve ser protegida das intempéries da natureza por uma tubulação (detalhe 8 da Figura 1) que funciona como invólucro de aproximadamente 200 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. Dentro deste invólucro estão acomodados um conjunto de baterias  
15   para alimentação (detalhe 2 da Figura 1), circuitos de condicionamento de sinais, conversão AD e microprocessador (detalhe 3 da Figura 1) para tratamento de sinais e os transceptores (detalhe 1 da Figura 1) para envio dos dados para unidade remota.

v) Unidade remota de geração de alertas: Um computador PC conectado aos  
20   sensores, via uma rede de dados ou diretamente conectado por um cabo, executando o modelo de previsão para analisar o fluxo de dados vindos dos N sensores e predizer o risco de deslizamento.

A segunda modalidade preferida é o dispositivo específico para o monitoramento de instabilidade em geleiras, para previsão de deslocamento de  
25   massa. Esta modalidade é caracterizada por um dispositivo construído tal qual na primeira modalidade preferida, acrescentando sensores de temperatura presos à haste, para medição de mudanças de temperatura e medidor de pressão atmosférica, condicionado dentro do próprio invólucro protetor (detalhe 8 da Figura 1), para detecção de modificações de condições ambientais e medição de  
30   temperatura do gelo.

A terceira modalidade preferida é o dispositivo de monitoramento de instabilidade em áreas vulcânicas, para previsão de deslocamento de massa e

rupturas do solo. Esta modalidade é caracterizada por um dispositivo construído tal qual na primeira modalidade preferida e pela utilização de sensores adequados para a atuação neste tipo de ambientes, resistentes às altas temperaturas envolvidas e ao ataque das substâncias químicas agressivas. Acrescenta-se ainda nesta  
5 modalidade sensores de temperatura atmosférica e do solo e sensores para detecção e medição de acidez e gases.

*A quarta modalidade preferida é o dispositivo de monitoramento de construções (Figura 4).* Esta modalidade é caracterizada por um dispositivo construído tal qual na a primeira modalidade preferida e pela substituição da haste  
10 (detalhe 9 da Figura 1 e Figura 2) como elemento de fixação dos sensores (detalhe 4 da Figura 4) e captura de sinais pela disposição mostrada na Figura 4. Neste caso, o sensor multiparamétrico é usado para monitorar um componente estrutural de uma construção (detalhes 6 e 1 da Figura 4) para a detecção de abalos e deformações anormais nas edificações, durante os processos de construção ou durante  
15 operações de manutenção ou acompanhamento contínuo da segurança das edificações. Neste caso, os sensores são acoplados diretamente nas ferragens da construção (detalhe 1 da Figura 4), através de um elemento de acoplamento que da suporte mecânico aos sensores (detalhe 3 da Figura 4). Este elemento de suporte acoplado à ferragem funciona como captador dos sinais produzidos na estrutura e  
20 também como guia de ondas para a transmissão destes sinais aos sensores. Um elemento de acoplamento (detalhe 2 da Figura 4) é introduzido entre o elemento de suporte e a ferragem para garantir a captura mais eficaz dos sinais. O conjunto é protegido por um encapsulamento (detalhe 5 da Figura 4) que evita desgaste dos sensores pela ação do ambiente.

25

## REIVINDICAÇÕES

1. Um dispositivo de monitoramento de instabilidade de solos e estruturas, para previsão de deslocamentos de massa ou ruptura de estruturas,  
5 caracterizado por um elemento de inserção no solo ou estrutura, dois ou mais sensores montado neste elemento e um processo de análise dos sinais oriundos destes sensores explorando as informações redundantes existentes nestes sinais.
2. Um dispositivo tal qual reivindicação 1 caracterizado por possuir um  
10 sensor do tipo acelerômetro associado a um giroscópio, um sensor strain gage e um sensor piezoelétrico.
3. Um dispositivo tal qual reivindicação 2 caracterizado por possuir um sensor de temperatura do ar e um sensor de pressão atmosférica.
4. Um dispositivo tal qual reivindicação 2 caracterizado por possuir um  
15 sensor de temperatura atmosférica, um sensor de temperatura do solo, sensores de acidez do solo e gases.
5. Um dispositivo tal qual reivindicação 1 caracterizado por ter como elemento de inserção na estrutura de construção uma chapa de metal ou outro material condutor dos sinais a serem medidos, fixada diretamente sobre a estrutura metálica da edificação.

DISPOSITIVO SENSOR DE MONITORAMENTO DE INSTABILIDADE DE SOLOS E ESTRUTURAS POR MEIO DE SENSORES MULTIPARAMÉTRICOS COM REDUNDÂNCIA MODULAR.

5

Sensor multiparamétrico de instabilidade de solos e estruturas composto por elemento de suporte, introduzido no local de monitoramento, no qual é fixado um conjunto de sensores protegidos contra as intempéries por um invólucro. O dispositivo resultante é alimentado por uma fonte de energia elétrica, podendo ser os

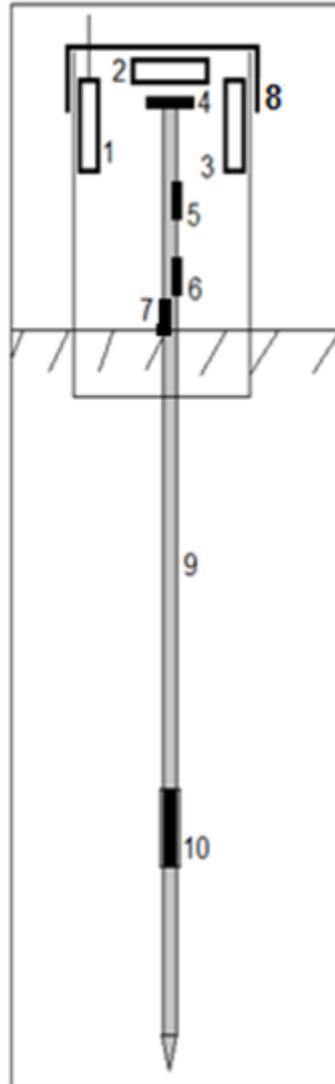
10 sensores do tipo: acelerômetro de três eixos e giroscópio, strain gage ou extensômetro, sensor piezoelétrico ou sensor sônico ou ultrassônico, sensor de umidade de solo ou outros tipos cuja combinação de quantidades e tipos vai depender do tipo de monitoramento específico e do grau de redundância modular desejada.

15

O sensor também engloba um conjunto de componentes eletrônicos e um processador digital que executam o condicionamento de sinais do conjunto de sensores, a conversão A/D e a transmissão de dados para uma unidade de processamento remoto que executa um modelo preditivo, utilizando redundância modular como um mecanismo de tolerância a falhas de avaliação dos sinais vindos

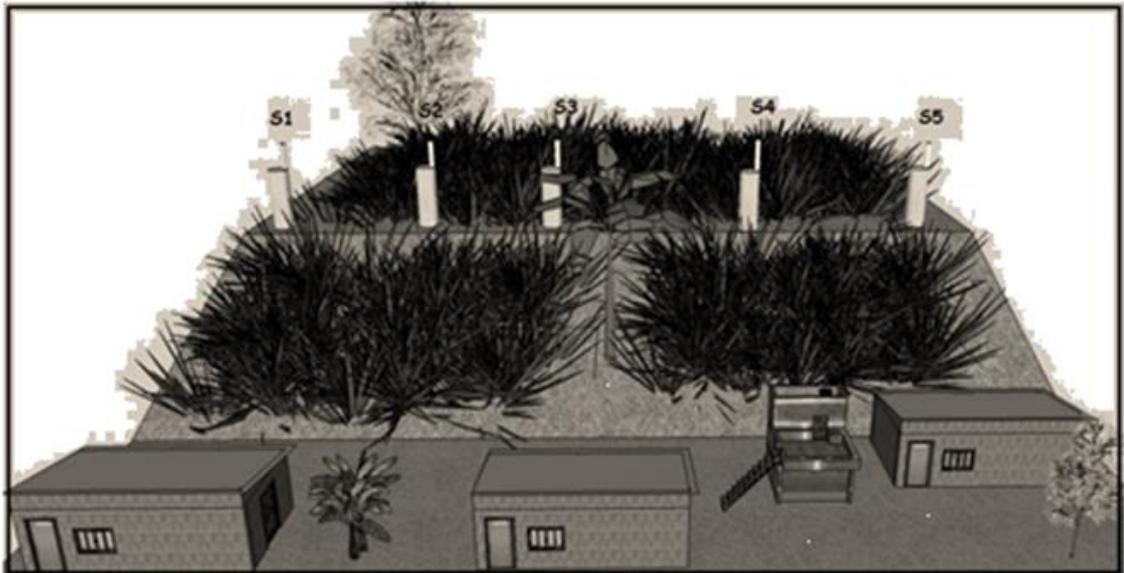
20 do sensor.)

**Figura 1**

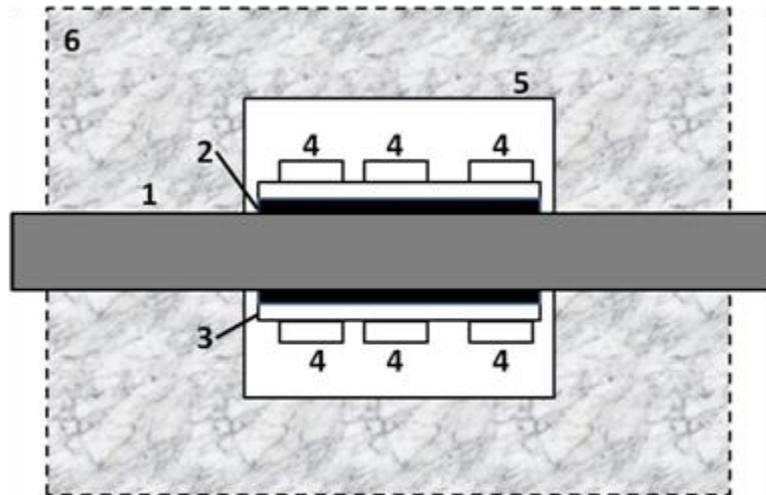


**Figura 2**

**Figura 3**



**Figura 4**



## Anexo 'A'

Dados do Sensor multiparamétrico						
Data	Strain G	Umidade	Som	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
17:34:10	-69,00	19	56	169	305	305
17:34:11	-69,00	19	44	151	305	305
17:34:12	-69,00	19	46	133	306	305
17:34:13	-69,00	18	59	141	305	306
17:34:14	-69,00	18	65	160	306	306
17:34:15	-69,00	18	63	177	306	306
17:34:16	-69,00	19	54	170	306	306
17:34:17	-69,00	19	46	147	305	306
17:34:18	-69,00	18	47	132	305	306
17:34:19	-69,00	19	56	149	306	306
17:34:20	-69,00	19	64	167	306	306
17:34:21	-81,00	18	64	176	306	306
17:34:22	-82,00	19	52	152	306	306
17:34:24	-69,00	19	50	135	306	305
17:34:25	-74,00	19	67	153	306	306
17:34:26	-69,00	18	65	179	306	305
17:34:27	-84,00	19	54	158	306	306
17:34:28	-75,00	19	47	135	305	306
17:34:29	-69,00	21	51	133	305	305
17:34:30	-69,00	20	61	159	306	306
17:34:31	-69,00	20	71	181	307	307
Amostra do gráfico 03						

Tabela da primeira amostra						
Hora	Strain G	Umidade	Som	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
04:13:10	-58,00	-65	36	2	341	279
04:13:12	-67,00	-77	30	1	340	279
04:13:17	-64,00	-77	28	4	341	279
04:13:23	-66,00	-71	30	1	341	279
04:13:24	-64,00	-72	26	1	341	279
04:13:25	-63,00	-72	26	2	341	280
04:13:26	-65,00	-72	29	1	341	279
04:13:26	-64,00	-67	31	3	341	279
04:13:27	-64,00	-69	35	4	341	279
04:13:28	-63,00	-71	31	2	340	279
04:13:28	-69,00	-76	23	2	341	279
04:13:29	-65,00	-68	33	2	340	279
04:13:33	-62,00	-71	30	1	341	280
04:13:34	-63,00	-65	34	2	340	279
04:13:35	-60,00	-70	37	3	340	279
04:13:37	-63,00	-73	26	2	341	279
04:13:39	-63,00	-72	29	2	341	279
04:13:40	-65,00	-71	33	2	340	279

04:13:40	-67,00	-71	21	2	341	279
04:13:43	-63,00	-67	34	2	340	280
04:13:44	-62,00	-68	30	3	341	279
04:13:45	-65,00	-75	26	2	340	279
04:13:46	-67,00	-71	29	1	341	280
04:13:50	-65,00	-69	31	2	340	279
04:13:51	-66,00	-75	26	2	340	279
04:13:56	-63,00	-69	27	2	341	279
04:13:57	-65,00	-73	29	2	340	279
04:14:02	-67,00	-74	27	2	340	280
04:14:03	-64,00	-69	27	1	340	279
04:14:06	-66,00	-74	25	2	340	279
04:14:07	-65,00	-74	29	2	340	279
04:14:08	-66,00	-79	25	1	340	279
04:14:12	-64,00	-72	32	2	341	280
04:14:14	-66,00	-64	28	2	340	279
04:14:18	-63,00	-71	31	2	341	279
04:14:19	-65,00	-71	30	2	340	279
04:14:24	-61,00	-69	30	1	340	279
04:14:24	-62,00	-65	34	3	341	279
04:14:25	-69,00	-72	28	2	341	279
04:14:29	-64,00	-75	30	2	340	279
04:14:30	-66,00	-74	23	1	341	279
04:14:31	-60,00	-65	33	3	341	279
04:14:36	-65,00	-77	23	1	340	280
04:14:40	-62,00	-73	30	3	340	279
04:14:41	-62,00	-68	31	3	341	279
04:14:41	-65,00	-71	29	1	341	279
04:14:43	-64,00	-72	32	3	340	279
04:14:45	-63,00	-73	27	2	340	279
04:14:46	-64,00	-71	29	2	340	280
04:14:46	-63,00	-73	25	1	340	279
04:14:49	-65,00	-66	32	2	340	279
04:14:52	-63,00	-68	34	3	340	280
04:14:57	-63,00	-69	32	3	340	280
04:14:57	-62,00	-71	33	1	341	279
Resultados da primenira amostra						

Procedimento para medição da umidade do solo pelo método estufa

<b>Execução de Procedimento (Ensaio) para obter relação de umidade do solo com tensão elétrica.</b>
1.Aparelhagem
1.1 – recipiente de formato cilíndrico de material plástico com cerca de 10cm de altura e 5cm de diâmetro;
1.2 - mão de gral
1.3 – almofariz
1.4 - recipiente metálico dimensões para suportar 3,0Kg de amostra;
1.5 - proveta de vidro com capacidade de 25mL;
1.6 - capsulas metálicas para verificação de umidade;
1.7 - balança analítica com resolução de 0,01g;
1.8 - estufa capaz de manter temperatura entre 105°C e 110°C.
2.Procedimento
2.1 – Da amostra amolgada (deformada) do solo, retiramos aproximadamente 2,5Kg e colocamos na estufa a 105°C ± 5°C para início do procedimento com umidade próxima de zero (h~0%);
2.2 - Após verificação de massa constante, retiramos os 2,5Kg da amostra da estufa destorroando-a para desagregação dos torrões utilizando a mão de gral e o almofariz;
2.3 – Com a amostra destorroada, adicionamos 20ml de água e homogeneizamos;
2.4 – após homogeneização, iniciamos a compactação da amostra no recipiente cilíndrico em três camadas aproximadamente iguais, aplicando 10 golpes utilizando a mão de gral em cada camada com uma altura de queda de aproximadamente 10 a 12cm;
2.5 – em seguida, levamos a amostra compactada ao sensor de umidade eletrônico;
2.6 – repetimos esta operação para obtenção de 10 pontos;
2.7 – após leitura do sensor de umidade, retiramos uma pequena porção da amostra, colocamos na capsula metálica, pesamos na balança analítica e levamos à estufa em torno de 24h (ou até massa constante) para verificação da umidade;
2.8 – após verificação de massa constante, retiramos as capsulas da estufa e efetuamos a pesagem e através da fórmula abaixo, calculamos a umidade da amostra ;
$h\% = (M1 - M2) / (M2-M3)$
Onde:
h – teor de umidade, em %
M1 – massa do solo úmido mais a massa do recipiente (capsula), em gramas;
M2 – massa do solo seco mais a massa do recipiente (capsula), em gramas;
M3 – massa do recipiente (capsula).

Tabela relativa ao Gráfico 03.

Hora	Strain G	Umidade	Som	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
17:58:06	-93,00	109	15	301	341	281
17:58:07	-86,00	109	22	305	340	280
17:58:10	-100,00	109	17	300	341	280
17:58:12	-91,00	112	22	306	341	280
17:58:13	-95,00	109	20	301	341	280
17:58:16	-102,00	109	18	300	341	280
17:58:22	-235,00	109	28	266	341	281
17:58:22	-92,00	109	19	307	341	280
17:58:23	-123,00	105	17	299	341	280
17:58:23	-119,00	107	15	303	341	280
17:58:29	-114,00	108	14	304	341	281
17:58:34	-108,00	108	19	304	341	280
17:58:35	-109,00	109	18	306	341	280
17:58:38	-102,00	110	24	306	341	281