



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

Dissertação de Mestrado

**SISTEMA DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADO E COM TRANSMISSÃO DE DADOS
PARA MONITORAMENTO DE RECALQUES EM OBRAS DE ATERROS
SANITÁRIOS**

Raquel Freitas Reis

CAMPINA GRANDE - PB

Fevereiro de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

**SISTEMA DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADO E COM TRANSMISSÃO DE DADOS
PARA MONITORAMENTO DE RECALQUES EM OBRAS DE ATERROS
SANITÁRIOS**

Raquel Freitas Reis

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e AMBIENTAL.

Área de Concentração: Geotecnia.

Prof^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Dr^a.Sc.
Orientadora
Prof. William de Paiva, D.Sc.
Coorientador

CAMPINA GRANDE - PB

Fevereiro de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R375

Reis, Raquel Freitas.

Sistema de medição automatizado e com transmissão de dados para monitoramento de recalques em obras de aterros sanitários / Raquel Freitas Reis. 6 Campina Grande, 2018.

107f. il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) 6 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

"Orientação: Profª. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Drª. Sc.;
Coorientador, William de Paiva, D.Sc.".

1. Deslocamentos Verticais. 2. Instrumentação Geotécnica.
3. Monitoramento Remoto. I. Monteiro, Veruschka, Escarião Dessoles.
II. Paiva, William de. III. Universidade Federal de Campina Grande,
Campina Grande (PB). IV. Título.

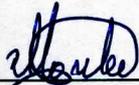
CDU 624:628.4(043)

**SISTEMA DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADO E COM TRANSMISSÃO DE
DADOS PARA MONITORAMENTO DE RECALQUES EM OBRAS DE
ATERROS SANITÁRIOS**

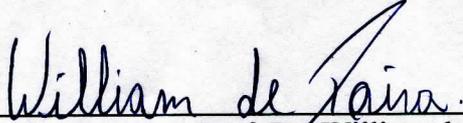
RAQUEL FREITAS REIS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE – UFCG, EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL.

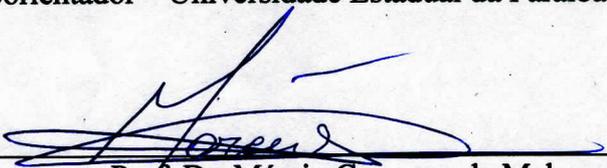
Examinada por:



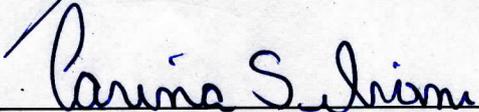
Prof.ª Dr.ª Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



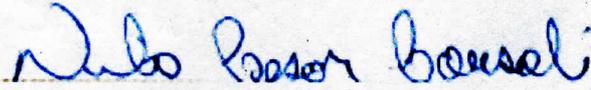
Prof. Dr. William de Paiva
(Coorientador – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



Prof.ª Dr.ª Carina Silvani
(Examinador Externo – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli
(Examinador Externo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS)

CAMPINA GRANDE – PB
22 de Fevereiro de 2018

Dedicatória

À minha avó Delzuita, que transmite sabedoria, amor e mansidão com um simples olhar.

Ao meu esposo (Vanderson) e aos meus filhos (Matteo e Rebeca), meus amores e grandes incentivadores da minha busca contínua por melhorias em todos os seguimentos da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, mantenedor da minha fé, meu alimento diário, Eterno e Constante, que me ampara e me sustenta em todos os momentos;

Ao meu esposo, Vanderson, por me apoiar nas decisões mais importantes da minha vida, contribuir na minha formação e ser este companheiro incrível, atuante em todas as horas.

Aos meus filhos, o qual dedico amor incondicional, crianças amorosas e pacientes, pilares da minha vida, que me ensinam todos os dias o quanto posso ser forte, sem perder minha essência.

À minha mãe (Maria do Carmo), pai (Roberval), irmãs (Renata e Rosana), cunhados e sobrinhos, por acompanharem cada luta, lágrima, ausência, cansaço e sempre se mantiveram próximos, ajudando como podiam e me encorajando a continuar. Amo-os com toda a minha força;

À minha orientadora, Dra.Sc. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, pelo acolhimento, ensinamentos e direcionamentos que transcenderam suas atribuições como orientadora, uma pessoa iluminada e de coração bom, profissional e mãe dedicada, um exemplo;

Ao meu orientador, D.Sc. William de Paiva, por me apoiar e acreditar no meu trabalho, um grande incentivador, paciente e dedicado, um professor que transmite paz e conhecimento, um amigo para a vida;

Ao professor D. Sc. Márcio Camargo de Melo, pela amizade e pelas contribuições: científicas, culturais e religiosas, um ser humano de brio;

Aos colegas do Grupo de Geotecnia Ambiental e os amigos que conheci em Campina Grande, por todo o apoio, conversas, conselhos, amizades e ensinamentos, em especial: Breno de Nóbrega, que acompanhou e contribuiu no desenvolvimento deste trabalho e que se tornou um grande amigo e parceiro intelectual, Cláudio e Amanda, amigos queridos de todas as horas que levo para a vida, Libânia, a pessoa mais iluminada que conheço na vida, uma amiga querida, forte e determinada, que me acolheu e compartilhou a sua vida, deixo registrado que aprendi em um mês, uma lição de fé e amor, para uma vida inteira, Daniela amiga alegre e dedicada, Pablio, Cristiane, Raul, Gleson, Jisla, Josy, Kelyanne, Márbara, Naiara, Petrov e Ivanilsa, Rômulo, Alessandra, Jefferson e outros colegas que convivi no decorrer desta minha jornada por Campina Grande;

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFCG, pela oportunidade de crescimento profissional, depositando em mim confiança, em especial a Profª Iana, por todo o apoio, a secretária Joseti e o secretário Wellington, por toda paciência;

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, através do Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, em especial ao Profº Freire, por todo o apoio e disponibilidade;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, em especial aos laboratoristas Sr. Mário e Sr. Fernando, que não mediram esforços para contribuir no desenvolvimento deste trabalho;

Aos colegas de turmas, em especial Daniel, Nathaliene, Portugal, Gutemberg, Denion, Kênia, Gaby, Érica, Jeovanesa, Mirtes e Thiago. Aos professores Adriano, Lêda, Ana Maria que sempre foram receptivos e dedicados. Aos funcionários e amigos Ladjane, Joseildo (Nildinho) e Jadilson;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro;

Aos professores Dr. Nilo Consoli e Dra. Carina Silvani, por aceitarem o convite para participarem da comissão examinadora deste trabalho de dissertação;

A todos que de alguma forma me ajudaram durante esse mestrado (foram muitos),
MUITO OBRIGADA!

“O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém”

(Dalai Lama)

RESUMO

O monitoramento de aterros sanitários pode ser considerado um dos componentes principais do plano de gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), pois auxilia na fase de projeto, implantação, operação, controle e encerramento. Compreender o comportamento mecânico e as taxas ou cinéticas da biodegradação dos maciços de resíduos aterrados é fundamental para tomar ações preventivas ou corretivas inerentes a questões estruturais e ambientais da obra. Um dos parâmetros que melhor define o comportamento desses maciços sanitários são os recalques, que são deslocamentos verticais que ocorrem em diferentes velocidades, tempo e magnitude, decorrentes do peso próprio, cargas aplicadas e, principalmente, devido aos processos biodegradativos. Embora o monitoramento seja de suma importância, a maioria dos sistemas de medições que são utilizados em aterros sanitários são adaptados da geotecnia clássica, não levando em consideração as peculiaridades deste tipo de obra. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de medição automatizado para monitorar recalques em superfície e em profundidade de aterros sanitários. Este sistema conta com a transmissão dos dados a distância e sem fio, permitindo o melhor acesso aos dados. Vale salientar, que o desenvolvimento do sistema de medição automatizado tem como base uma metodologia de medição convencional já existente e utilizada na prática da engenharia geotécnica, o Medidor Magnético de Recalques (MMR). A implementação do sistema de medição abordado neste trabalho, abrangeu a união dos conhecimentos em geotecnia, eletrônica, informática, mecânica e telecomunicações, permitindo o desenvolvimento de um equipamento para monitoramento remoto, a partir da utilização de dispositivos eletrônicos e eletromecânicos que favoreceram a automação do sistema e a transmissão dos dados. O sistema de medição automatizado é constituído de sistema secundário, sistema principal e placa para medição de recalques, além do tubo guia e placas magnéticas, distribuídas no maciço em diferentes profundidades. Seu funcionamento consiste em realizar as medidas de maneira automatizada, em dias e horários pré-estabelecidos, detectando a posição de cada placa magnética, baseada na quantidade de passos do motor utilizado. Para a transmissão, esta posição é determinada em milímetros em função dessa quantidade de passos. Para validar e calibrar o sistema de medição automatizado foi desenvolvido um cenário de ensaio em laboratório, constituído de um suporte, para fixação do tubo guia, placas magnéticas e fita métrica. A calibração do sistema de medição automatizado consiste no comparativo com o MMR. Primeiramente é posicionada uma placa magnética em uma altura definida, e verifica-se visualmente, na fita métrica localizada no interior do tubo guia qual a posição da placa, este valor é tido como valor verdadeiro. Os valores das medidas obtidas pelos dois sistemas de medições são comparados com o valor verdadeiro e são analisados parâmetros como exatidão, precisão e erro de cada sistema de medição por meio da estatística descritiva. Posteriormente, os sistemas de medições são avaliados para observar qual apresenta maior eficiência. Para calibrar o sistema de medição automatizado, foi utilizado um modelo de regressão linear simples, obtendo o comprimento da linha (posição) em função da quantidade de voltas (número de passos). Após a transmissão da posição da placa magnética é utilizado este modelo para o tratamento dos dados. As medidas obtidas pelo sistema de medição automatizado ocorreram em tempo reduzido, apresentando exatidão e precisão, com um erro absoluto de 19,40 mm. Desta forma, constata-se que o sistema de medição desenvolvido é uma boa alternativa de medição, pois pouco demanda a presença do operador em campo, permite a realização das leituras em tempos bem definidos, gerando dados confiáveis e, conseqüentemente, melhores interpretações.

Palavras-chave: Deslocamentos verticais, instrumentação geotécnica, monitoramento remoto.

ABSTRACT

Landfill monitoring can be considered as one of the main components of the Municipal Solid Waste (MSW) management planning. As long as it assists the design, implementation, operation, control and closure phases of landfills. Understanding the mechanical and biodegradable behavior of landfill waste mass is fundamental to take preventive or corrective actions inherent to structural and environmental issues. Settlements are one of the best parameters that defines the behavior of these sanitary landfills. One of that parameter is the vertical displacement that occur at different velocities, time and magnitude, due to their own weight, applied loads and, mainly, due to biodegradation processes. Despite the importance of monitoring, most of the measurement systems used in landfills are adapted from classical geotechnical engineering, not taking into account the peculiarities of this scope. The objective of this work was to develop an automated measurement system to monitor surface and in-depth settlements of landfills. This system relies on wireless and remote data transmission, allowing better access to data. The development of the automated measurement system is based on a conventional methodology used in geotechnical engineering field. The implementation of the measurement system presented in this research involves the correlation of knowledge in geotechnical engineering, electronics, computer science, mechanics and telecommunications. That confluence of knowledge allows the development of a remote monitoring equipment, using electronic and electromechanical devices that favored the automation of the system and the transmission of data. The automated measuring system consists of a secondary system, a main system and a plate for settlement measuring, besides the guide tube and magnetic plates distributed in the waste mass at different depths. Its operation consists of automated measurements, in pre-established dates and times, detecting the position of each magnetic plate based on the amount of steps performed by a stepper motor. In order to validate and calibrate the system, a laboratory prototype was developed, consisting of a support for fixing the guide tube, magnetic plates and measuring tape. Initially, the analysis of the two measurement systems consists in positioning a magnetic plate at a determined height, and verify through the measure tape located inside the guide tube which position is the plate, this position is adopted as true value. The values of the measurements obtained by the measurement systems are compared with the true value. Parameters such as accuracy, precision and error of each measuring system are analyzed by descriptive statistics. Subsequently, the measurement systems are evaluated to determine its efficiency for each system. In order to calibrate the automated measurement system, a simple linear regression model was used, obtaining the line length (position) as a function of the number of turns (number of steps). This model is used for the treatment of the data after the transmission of the magnetic plate position. The measurements obtained by the automated measurement system occurred in reduced time, presenting accuracy and precision, with an absolute error of 19.40 mm. It was verified that the developed system is a good alternative of measurement, since it does not require the presence of an operator in situ, and it allows performing the readings in pre-defined time, generating reliable data and suitable interpretations.

Key words: Vertical displacements, geotechnical instrumentation, remote monitoring.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Recalques de maciços sanitários. _____ | 28 |
| Figura 2: Método de levantamento topográfico. _____ | 35 |
| Figura 3: Nível óptico automatizado. _____ | 36 |
| Figura 4: Esquemático de funcionamento do GNSS. _____ | 37 |
| Figura 5: Esquemático do detector de magnético. _____ | 38 |
| Figura 6: MMR- a) Placas magnéticas; b) Aranhas magnéticas; c) Imã de referência. _____ | 39 |
| Figura 7: MMR - Detector de campo magnético. _____ | 40 |
| Figura 8: O primeiro “Piezômetro”. _____ | 42 |
| Figura 9: Diferença entre Exatidão e Precisão. _____ | 44 |
| Figura 10: Operadores em campo realizando medição de recalques em aterro sanitário de RSU. _____ | 46 |
| Figura 11: Plataforma Arduíno. _____ | 48 |
| Figura 12: Módulo RTC. _____ | 49 |
| Figura 13: Relé. _____ | 49 |
| Figura 14: Módulo GSM. _____ | 50 |
| Figura 15: Módulo TX e RX. _____ | 50 |
| Figura 17: Sensor magnético (reed switch). _____ | 51 |
| Figura 18: Motor de passo. _____ | 51 |
| Figura 19: Interação magnética. _____ | 52 |
| Figura 20: Qualidade das medidas na estatística descritiva. _____ | 55 |
| Figura 21: Modelo gráfico de regressão linear simples. _____ | 56 |
| Figura 22: Etapas metodológicas da pesquisa. _____ | 58 |
| Figura 23: Etapas de funcionamento do sistema de medição automatizado. _____ | 59 |
| Figura 24: Funcionamento do hardware do sistema secundário. _____ | 61 |
| Figura 25: Algoritmo do sistema de secundário. _____ | 62 |
| Figura 26: Funcionamento do hardware do sistema principal. _____ | 63 |
| Figura 27: Algoritmo do sistema principal. _____ | 64 |
| Figura 28: Funcionamento da placa para medição de recalques. _____ | 65 |
| Figura 29: Cenário para ensaios. _____ | 70 |
| Figura 30: Esquemático do hardware do sistema principal e do sistema secundário. _____ | 70 |
| Figura 31: PCI do sistema principal e secundário. _____ | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 32: PCI da placa para medição de recalques. _____ | 73 |
| Figura 33: Caixa do sistema de medição. _____ | 75 |
| Figura 34: Montagem do hardware. _____ | 75 |
| Figura 35: Sistema convencional de medição de recalques em profundidade. _____ | 78 |
| Figura 36: Ensaio com o sistema de medição convencional. _____ | 79 |
| Figura 37: Modificações dinâmicas no raio. _____ | 80 |
| Figura 38: Coleta de dados para calibração da relação de voltas. _____ | 81 |
| Figura 39: Ensaio do sistema de medição automatizado. _____ | 82 |
| Figura 40: Altura de referência do ensaio. _____ | 83 |
| Figura 41: Dados de saída da localização da placa magnética. _____ | 84 |
| Figura 42: Medidas e erros do ensaio com o sistema de medição convencional. _____ | 85 |
| Figura 43: Comparação das médias das medidas entre os sistemas de medições. _____ | 87 |
| Figura 44: Comparação das medidas entre os sistemas de medições considerando somente as medidas do início do campo magnético. _____ | 91 |
| Figura 45: Diagrama de dispersão dos dados e linha de ajuste do modelo. _____ | 94 |
| Figura 46: Valores preditos pelos modelos ajustados. _____ | 96 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Monitoramento ambiental de aterros sanitários. _____ | 26 |
| Quadro 2: Monitoramento geotécnico de aterros sanitários. _____ | 27 |
| Quadro 3: Classificação do RSU em função do comportamento geomecânico. _____ | 29 |
| Quadro 4: Hipóteses básicas da teoria de Terzaghi e sua aplicabilidade para aterros sanitários. _____ | 32 |
| Quadro 5: Recalques totais de maciços sanitários. _____ | 32 |
| Quadro 6: Direções de magnetização de imã axial e imã diametral. _____ | 53 |
| Quadro 7: Testes nos dispositivos de hardware e aplicativos de software do sistema de medição. _____ | 66 |
| Quadro 8: Coeficiente de variação da análise do sistema de medição automatizado. _____ | 84 |
| Quadro 9: Coeficiente de variação da análise do sistema de medição convencional. _____ | 86 |
| Quadro 10: Principais parâmetros de comparação entre os sistemas de medições. _____ | 87 |
| Quadro 11: Aproveitamento da capacidade de disposição de RSU em relação aos erros. ____ | 89 |
| Quadro 12: Vantagens e desvantagens do sistema de medição automatizado. _____ | 91 |
| Quadro 13: Vantagens e desvantagens do sistema de medição convencional. _____ | 93 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Critérios para velocidades de deslocamento em aterros sanitários. _____ | 88 |
| Tabela 2: Proposta de critérios para velocidades de deslocamento para aterros sanitários encerrados. _____ | 88 |
| Tabela 3: Tabela ANOVA. _____ | 95 |
| Tabela 4: Teste de significância. _____ | 95 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | - Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABRELPE | - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| DPM | - Distância da Placa Magnética. |
| EAGLE | - Easily Applicable Graphical Layout Editor |
| EPA | - Environmental Protection Agency |
| FEAM | - Fundação Estadual do Meio Ambiente |
| GGA | - Grupo de Geotecnia Ambiental |
| GLONASS | - Global Navigatsionnaya Sputnikovaya |
| GNSS | - Global Navigation Satellite System |
| GPS | - Global Position System |
| GSM | - Global System for Mobile Communications |
| IBAM | - Instituto Brasileiro de Administração Municipal |
| IDE | - Integrated Development Environment |
| INMETRO | - Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia |
| INPI | - Instituto Nacional da Propriedade Intelectual |
| LED | - light emitting diode |
| LIMC | - Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científica |
| MMR | - Medidor Magnético de Recalques |
| NBR | - Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| PCI | - Placa de circuito impresso |
| PVC | - Policloreto de Vinila |
| PNRS | - Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| RECESA | - Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental |
| RF | - Radio Frequência |
| RSU | - Resíduos Sólidos Urbanos |

| | |
|------|---|
| RTC | - Real Time Clock |
| RX | - Recepção/ Upload |
| SAND | - Sistema de Automação de Nível Digital |
| TX | - Transmissão/ download |
| UFCG | - Universidade Federal de Campina Grande |
| VIM | - Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | Objetivos | 20 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 20 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | Aspectos Gerais da Geotecnia Ambiental: Aterros Sanitários | 21 |
| 2.1.2 | Monitoramento de aterros sanitários | 24 |
| 2.1.3 | Aspectos gerais dos recalques na geotecnia clássica e ambiental | 28 |
| 2.1.4 | Principais sistemas de medições utilizados no monitoramento de recalques em aterros sanitários | 34 |
| 2.2 | Conceitos de Metrologia | 41 |
| 2.2.1 | Contextualização do uso da metrologia na geotecnia | 41 |
| 2.2.2 | Definições e termos utilizados na metrologia | 42 |
| 2.2.3 | A importância do desenvolvimento de sistemas de medições para obras geotecnicas | 45 |
| 2.3 | Entendimento e desenvolvimento dos dispositivos de <i>hardware</i> e dos aplicativos de <i>software</i> utilizados no sistema de medição | 47 |
| 2.3.1 | <i>Hardware</i> | 47 |
| 2.3.2 | <i>Software</i> | 53 |
| 2.4 | Conceitos Estatísticos para a Validação e Calibração do Sistema de Medição | 54 |
| 2.4.1 | Estatística descritiva | 54 |
| 2.4.2 | Regressão linear simples | 56 |
| 3 | METODOLOGIA | 58 |
| 3.1 | Desenvolvimento do Sistema de Medição Automatizado e com Transmissão de Dados | 60 |
| 3.1.1 | Sistema secundário | 60 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.2 Sistema principal | 62 |
| 3.1.3 Placa para medição de recalques | 64 |
| 3.2 Testes no <i>Hardware</i> e no <i>Software</i> do Sistema de Medição | 65 |
| 3.3 Construção do Cenário de Ensaio | 69 |
| 3.4 Montagem do Sistema de Medição | 70 |
| 3.4.1 Acondicionamento e montagem do <i>hardware</i> | 74 |
| 3.4.2 Localização da placa magnética | 76 |
| 3.5 Ensaio com o Sistema de Medição Automatizado e com Transmissão de Dados | 77 |
| 3.6 Ensaio com o Sistema de Medição Convencional | 77 |
| 3.6.1 Metodologia do ensaio com o sistema de medição convencional | 78 |
| 3.7 Calibração e Validação do sistema de medição automatizado | 79 |
| 3.7.1 Relação número de passos do motor e descarregamento da linha | 79 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 82 |
| 4.1 Ensaio com sistema de medição automatizado e com transmissão de dados | 82 |
| 4.2 Ensaio com o Sistema de Medição Convencional | 85 |
| 4.3 Comparação entre os Sistemas de Medições | 87 |
| 4.3.1 Comparação das medidas considerando o início do campo magnético | 90 |
| 4.3.2 Vantagens e desvantagens entre os sistemas de medições | 91 |
| 4.3.3 Relação número de passos do motor e descarregamento da linha | 94 |
| 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 97 |
| 5.1 Conclusões | 97 |
| 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros | 98 |
| REFERÊNCIAS | 99 |

1 INTRODUÇÃO

Aterros sanitários são obras de engenharia geotécnica e sanitária, amplamente utilizadas como técnica de disposição final e tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Realizar monitoramento periódico que remeta a compreensão do comportamento do maciço de RSU podem otimizar a relação custo/benefício do empreendimento, visto que, favorece o desenvolvimento de soluções técnicas e economicamente viáveis, minimizando riscos de natureza econômica, estrutural e ambiental.

Devido à heterogeneidade dos materiais constituintes em um aterro, ocorrem transformações físicas, químicas e biológicas no maciço ao longo do tempo, que necessitam ser monitorados. Um dos parâmetros de monitoramento geotécnico de grande importância para a compreensão do comportamento dos aterros sanitários é o recalque, que são deslocamentos verticais descendentes da superfície do aterro, provocados pelas cargas externas, peso próprio dos RSU e da camada de cobertura e principalmente, pela biodegradação dos resíduos (MELO et al., 2014 e DURMUSOGLU; CORAPCIOGLU, 2006).

Monitorar a evolução dos recalques ao longo da profundidade de aterros sanitários permite compreender como ocorrem os deslocamentos verticais do maciço e ainda prevenir possíveis deslizamentos e acidentes oriundos dos recalques diferenciais e do excesso de poropressão. Também é um importante parâmetro para projetos e execução de obras de aterros sanitários. A partir do monitoramento dos recalques é possível: verificar a estabilidade, prevenir riscos operacionais, estimar o aproveitamento de áreas para disposição, prevendo assim o tempo de vida útil do aterro, além da possibilidade de tomar ações mitigatórias em tempo hábil. Por isso, quanto maior a qualidade do programa de monitoramento, melhor será o desempenho da obra.

Lopes e Gomes (2013) enfatizam, que o programa de monitoramento baseia-se principalmente, nos princípios de instrumentações geotécnicas clássicas, não levando em consideração as peculiaridades e complexidades deste tipo de obra, além da escassez de pesquisas científicas detalhando os equipamentos utilizados, métodos de instalação e principais dificuldades ou limitações encontradas.

Por serem geralmente adaptados do sistema de medição convencional, esses equipamentos são na maioria das vezes manufaturados no exterior, implicando em custos maiores para sua aquisição, e quando adaptados, observa-se a carência de informações

técnicas inerentes à sua aplicabilidade em aterros sanitários, como a exatidão, precisão, erros e calibrações.

A maioria desses sistemas de medições não possuem automação e transmissão de dados a distância e sem fio, necessitando da intervenção humana em campo para a realização do monitoramento, caracterizando-o como uma atividade insalubre e laboriosa. Além do mais, a coleta de dados baseadas em inspeções visuais e interpretações dos operadores, podem gerar erros capazes de distanciar o valor medido do valor verdadeiro. Outros fatores podem influenciar nas medições e nas leituras inerentes ao monitoramento, como: rotatividade dos operadores que manuseiam o equipamento de medição, condições meteorológicas, calibração do sistema de medição e fadiga do operador.

Como a implantação de aterros sanitários ocorre geralmente em locais distantes dos grandes centros urbanos, em razão do odor característico gerado a partir da biodegradação da matéria orgânica presente na constituição dos resíduos e da possibilidade da contaminação do solo, ar e água, o monitoramento torna-se oneroso, devido à necessidade de locomoção dos equipamentos de medição e dos operadores para o local da investigação.

Por isso, o desenvolvimento de pesquisas inerentes à aplicação de novas técnicas de medições em aterros sanitários é de grande relevância. As pesquisas e os avanços tecnológicos são aliados para o desenvolvimento de novos sistemas de medições de recalques e o uso da telemática, junção entre os recursos da eletrônica, das telecomunicações e da informática, vem contribuindo de maneira representativa na melhoria da qualidade das medidas, através da inserção de sensores, microcontroladores, entre outros dispositivos.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de medição automatizado para monitorar recalques em superfície e em profundidade de aterros sanitários. Após a aquisição dos dados, transmiti-los à distância e sem fio. O sistema de medição é baseado em uma metodologia convencional existente, utilizada para o monitoramento de recalques em profundidade. Uma de suas vantagens de desenvolvimento, é o baixo custo quando comparado ao sistema convencional (MMR).

O sistema de medição automatizado realiza medidas em tempos pré-estabelecidos, assegurando a frequência na coleta dos dados, com capacidade de processamento que proporcionam melhorias nos resultados em termos de precisão e exatidão nas medidas, com erros toleráveis que não interferem nas análises, transmitindo esses dados à distância e sem fio. Vale ressaltar, que embora o desenvolvimento deste trabalho tenha cunho científico voltado a obras de aterros de RSU, este sistema de medição poderá ser utilizado para o monitoramento de recalques em diferentes tipos obras geotécnicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema automatizado de medição de recalques para obra de aterro sanitário com transmissão de dados à distância e sem fio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Programar o sistema de medição pra realizar as medições em datas e horas pré-estabelecidas e colocá-lo em modo de hibernação após as leituras e o envio dos dados.
- Automatizar um sistema de medição convencional para fazer leituras de recalques em superfície e em profundidade.
- Desenvolver um hardware para detectar o campo magnético das placas ou aranhas distribuídas em diferentes profundidades do maciço sanitário e transmitir os dados das medições ao sistema principal para determinar o recalque.
- Calcular o recalque a partir da localização do campo magnético e transmitir esses dados numa comunicação sem fio à longa distância.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos e definições fundamentais para o melhor entendimento do sistema de medição desenvolvido. Sua estrutura é dividida em quatro seções. Na primeira seção são apresentados conceitos geotécnicos voltados às obras de aterros sanitários, enfatizando o estudo dos recalques, a importância do monitoramento e os principais sistemas de medições utilizados para monitorar recalques em aterros sanitários. A segunda seção condiz às definições e conceitos de termos oriundos da metrologia. A terceira seção trata-se do entendimento dos dispositivos de *hardware* e dos aplicativos de *software* utilizados do desenvolvimento do sistema de medição. Na quarta seção são abordados alguns conceitos estatísticos que foram utilizados para a calibração e validação do sistema de medição desenvolvido.

2.1 Aspectos Gerais da Geotecnia Ambiental: Aterros Sanitários

A geotecnia ambiental é considerada um ramo da geotecnia que trata da proteção ao meio ambiente contra impactos antrópicos (BOSCOV, 2008). Greschik e Gálos (1998) citam que é a ciência e a prática da aplicação de meios técnicos, a fim de alcançar um equilíbrio duradouro no ambiente entre o solo e o homem, que não cause dano à vida orgânica.

Uma das áreas de atuação da geotecnia ambiental são os aterros sanitários, obras geotécnicas e sanitárias que necessitam de projeto, construção, operação e monitoramento.

De acordo com Schuler (2010), até algumas décadas atrás, o princípio de projetos de aterros considerava somente os critérios sanitários. Entretanto, com o aumento da geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no mundo inteiro e, conseqüentemente, o acréscimo de cargas dispostas diariamente, o aterro sanitário tornou-se uma área de investigação geotécnica, uma vez que, além de ser uma obra de terra envolvendo cortes e aterros, as sobrecargas impostas podem causar processos de instabilização.

Araújo Neto (2016) e Tapahuasco (2009) afirmam que os RSU depositados em aterros sanitários formam um maciço heterogêneo e poroso, constituído por diferentes tipos de elementos, com características distintas e variadas dimensões de partículas, apresentando perda de massa sólida durante o processo de biodegradação da matéria orgânica. Estas características dificultam o entendimento do comportamento geomecânico do maciço,

principalmente, quando está relacionado aos parâmetros de resistência e deformabilidade (BATISTA, 2010).

Por isso, a técnica de disposição e tratamento de RSU, denominada de aterro sanitário é considerada obra de geotecnia e de saneamento básico, e tem como finalidade evitar ou mitigar os impactos sociais e ambientais significativos que este tipo de obra possa vir a causar, principalmente, em relação à poluição do solo, corpos hídricos (águas superficiais e subterrâneas) e ar atmosférico (GOMES, 2017; CATAPRETA e SIMÕES, 2016).

2.1.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Resíduos sólidos urbanos são materiais heterogêneos (inertes, minerais e orgânicos), resultante das atividades humanas e da natureza, os quais podem ser parcialmente utilizados, gerando, entre outros aspectos, proteção à saúde pública e economia de recursos naturais (MELO, 2011).

A geração e a destinação final de RSU são objetos de preocupação e discussão em todo o mundo. Nas últimas décadas o crescimento demográfico e a intensificação das atividades industriais e humanas corroboram para a produção acentuada de RSU (ZHAO et al., 2014). O aumento da geração desses resíduos requerem obras de aterros sanitários com dimensões cada vez maiores (CARIBÉ, 2015), exigindo a aplicação de técnicas de engenharia que garantam a segurança de aspectos estruturais e ambientais.

A disposição final e o tratamento, técnica e ambientalmente incorretos desses resíduos, podem gerar problemas ambientais e riscos à saúde pública, conduzindo a escassez de recursos naturais e a transtornos econômicos e sociais de grande magnitude. A periculosidade dos resíduos se dá em função de suas propriedades físicas, químicas ou biológicas (NBR 10004 - ABNT, 2004).

Segundo Hird (2013), os resíduos depositados em aterros dizem muito sobre nossas relações dentro das comunidades, com o meio ambiente e com a sociedade global, retratando a política e a economia de consumo de um povo.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010), reúne o conjunto de princípios, instrumentos, diretrizes, metas e ações para elucidação de problemas inerentes ao manejo de RSU. Nesta Lei, recomenda-se o uso de aterros sanitários como uma das alternativas de disposição final e tratamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos urbanos.

2.1.1.2 Aterros sanitários

Embora existam diferentes técnicas de tratamento dos RSU, como a incineração, a compostagem e a reciclagem, os aterros sanitários representam a principal forma de destinação final e tratamento adequado de resíduos. Tal afirmação pode ser explicada pelo fato de ser uma das técnicas mais seguras e de menor custo, quando comparadas a outras formas de disposição final e tratamento de RSU (FEAM, 2006). Uma porcentagem considerável de RSU gerados na Polônia (90%), China (83%), Brasil (58,4%), Estados Unidos (56%) e Coreia (52%) são depositados em aterros sanitários (EPA, 2015; ZHAO et al., 2014; ABRELPE, 2016).

O aterro sanitário é um método para disposição final de RSU que segue normas operacionais específicas (IBAM, 2001). É definido como uma das técnicas de disposição de RSU no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível (NBR 15.849 - ABNT, 2010). Também pode ser entendido como uma tecnologia de tratamento, pois os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em seu interior, resultam em uma massa de resíduos química e biologicamente mais estáveis (RECESA, 2008).

Os aterros sanitários são considerados biorreatores com mudanças contínuas de suas propriedades, caracterizando-os como sistemas dinâmicos que envolvem reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos, que variam ao longo do tempo (ALCÂNTARA, 2007). Monteiro (2003) compara aterros sanitários a reatores bioquímicos, estabelecendo relações entre a biodegradação dos RSU e a magnitude e velocidade dos recalques, bem como a geração do lixiviado e do biogás.

Por utilizar princípios de engenharia, este método necessita de cuidados técnicos, estruturais e construtivos para o seu funcionamento, que inclui desde a escolha da área de implantação até a sua operação e acompanhamento, objetivando prever ou mitigar os prováveis impactos geoambientais que o empreendimento pode vir a causar. Para garantir o bom funcionamento deste tipo de obra, são adotadas técnicas de impermeabilizações, camadas de coberturas, sistemas de drenagens, coleta e tratamento de lixiviados e gases, e o sistema de monitoramento.

2.1.2 Monitoramento de aterros sanitários

Marinho (2005) afirma que a observação é fundamental para a compreensão de qualquer fenômeno e destaca que o desenvolvimento de quase todas as áreas do conhecimento, inclusive da engenharia geotécnica, só obteve sucesso a partir de muita investigação. Monitorar significa observar o comportamento evolutivo do objeto de investigação, de forma contínua e sistemática ao longo do tempo.

Em aterros sanitários, o estudo que permite entender os mecanismos complexos que governam os RSU pode ser realizado através do monitoramento. De acordo com Catapreta e Simões (2016); Manconi (2016); Miranda (2012), o objetivo do monitoramento é acompanhar o comportamento geomecânico e o desempenho ambiental do aterro sanitário, de forma a permitir a identificação de alterações nos padrões de comportamento e propor, em tempo hábil, medidas preventivas e corretivas, orientando os trabalhos de manutenção e conservação. Para Bennati et al. (2013), no caso da compreensão geomecânica de aterros sanitários é necessário analisar as variáveis que governam o comportamento do RSU.

Segundo Graça e Faggion (2016), no escopo da engenharia, dado a magnitude das obras criadas e os riscos inerentes, passaram a existir não apenas a necessidade do monitoramento de todo o processo de criação, mas também da implantação e operação ao longo do tempo dessas obras.

Conforme a Lei Nº 12.305 (BRASIL, 2010), no Brasil, para a implantação da técnica de aterro sanitário como forma de disposição, tratamento e aproveitamento de resíduos devem ser tomadas ações preventivas e corretivas que incluem o programa de monitoramento. Por isso, para compreender os aspectos estruturais e ambientais do empreendimento, ao longo do tempo, o monitoramento é fundamental.

Entre as propriedades geotécnicas mais relevantes para os estudos em aterros sanitários, Denardin (2013) destaca: a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento, a compactação, a compressibilidade e previsão de recalques.

Dunnicliff et al., (2001), considera como fatores essenciais advindos do monitoramento de obras geotécnicas:

- Proteger as propriedades vizinhas de serem afetadas pela construção e exploração das obras;
- Controlar o método de construção;
- Averiguar comportamentos, caso surjam condições anômalas;

- Proteção legal, em caso de acidentes;
- Reforçar as relações entre as diferentes partes envolvidas (dono da obra, projetista, empreiteiro, fiscais, consultores, entre outros);
- Desenvolvimento dos conhecimentos técnico-científicos.

2.1.2.1 As principais dificuldades de monitoramento

No monitoramento de aterros sanitários do Brasil, verifica-se uma variação de procedimentos de medição, tanto no critério de instrumentação instalada, quanto na frequência de monitoramento, além disso, não há uma legislação específica que indique o que deve ser monitorado, nem normas e critérios consagrados (BORGES et al., 2016 e CEPOLLINA et al., 2004).

Alguns dos principais fatores que dificultam o monitoramento em aterros sanitários:

- A alta heterogeneidade da composição dos RSU;
- O tamanho das partículas e sua variação no tempo (principalmente ligada à decomposição);
- A geografia do local de disposição (cultura, desenvolvimento e nível de industrialização, práticas de gestão, entre outros);
- As diferentes fases das características físicas;
- Dificuldades para coletar amostras representativas;
- A falta de procedimentos de testes padronizados e laboratórios especializados para o seu estudo;

Lopes e Gomes (2013) afirmam que a maioria dos programas de monitoramento geotécnico baseia-se nos princípios das instrumentações da geotecnia clássica, como os utilizados em terraplanagem e barragens de terra, que exigem equipamentos personalizados e métodos de instalação. Simões et al., (2006) observam a necessidade em adaptar e desenvolver novos instrumentos geotécnicos adequados aos aterros sanitários, com materiais capazes de suportar a severas agressões físico-químicas encontradas no interior do maciço de RSU, além de incluir nas medições, parâmetros relacionados à aspectos biodegradativos, para quantificar grandezas.

Outra dificuldade observada no monitoramento de aterros sanitários, apontada por Simões et al., (2006), são as perdas dos equipamentos de medições instalados no aterro em

operação, que se dão principalmente devido ao tráfego de caminhões e máquinas, utilizados para disposição dos RSU e compactação.

No monitoramento ambiental e geotécnico, a própria configuração e operação dos aterros sanitários é um fator que dificulta o monitoramento, pois são ambientes insalubres, de grandes áreas e volumes, geralmente implantados em locais distantes dos centros urbanos. Tal fator pode tornar o monitoramento oneroso e laborioso.

Embora o monitoramento em aterros sanitários apresentem algumas dificuldades, acompanhar e compreender o complexo comportamento deste empreendimento é fundamental para evitar riscos.

2.1.2.2 Tipos de monitoramento

Os programas de monitoramento realizados em obras de aterros de RSU seguem suas atividades envolvidas no monitoramento geotécnico e ambiental.

De acordo com Catapreta et al. (2016), o monitoramento geoambiental de um aterro sanitário é realizado por meio dos resultados das observações de campo, da análise da instrumentação instalada e das análises físico-químicas e microbiológicas em amostras de águas superficiais e subterrâneas e em amostras de líquidos lixiviados. São monitoradas ainda as condições de qualidade dos solos e do ar.

O monitoramento ambiental de um aterro sanitário visa coletar dados que permitem avaliar a sua influência sobre o meio ambiente (SIMÕES et al., 2006). Segundo Catapreta et al. (2016), o monitoramento ambiental em aterros de RSU envolvem geralmente o acompanhamento de alguns parâmetros, que estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1: Monitoramento ambiental de aterros sanitários.

| Monitoramento Ambiental | Função |
|-----------------------------------|---|
| Águas superficiais e subterrâneas | Visa monitorar a possibilidade de contaminação na área de influência do aterro, através do acompanhamento das condições dos mananciais superficiais e subterrâneos; |
| Ar | Quando há proximidade da instalação do aterro com a área urbana, este monitoramento é imprescindível. Através deste acompanhamento é possível verificar a quantidade de partículas totais e inaláveis em suspensão; |
| Pressão sonora | Através deste monitoramento verificam-se os impactos causados pelos ruídos emitidos pelos maquinários utilizados na operação de aterro; |
| Líquidos | O monitoramento dos líquidos em aterros sanitários é imprescindível, o lixiviado contém elevados teores de |

| | |
|---------------------------------|--|
| | matéria orgânica, bem como substâncias inorgânicas (principalmente formados por metais pesados), que quando lançados de maneira inadequada no meio ambiente podem gerar contaminação aos recursos naturais e causar riscos à saúde pública. |
| Gases | O monitoramento do biogás gerado pelo maciço de RSU possui como função o controle ambiental, a avaliação do potencial de aproveitamento energético e as influências do fluxo na estabilidade do maciço de RSU. Através do monitoramento são avaliadas as quantidades geradas e a composição do biogás; |
| Dados pluviométricos e de vazão | Consideradas atividades complementares de monitoramento, são elementos que influenciam no controle de monitoramento dos líquidos lixiviados, avaliação do balanço hídrico do aterro sanitário e o controle do sistema de drenagem. Esses dados são de grande influência no comportamento geotécnico. |

Fonte: Adaptado de Catapreta et al. (2016).

O monitoramento geotécnico dos aterros sanitários permite o controle operacional e a avaliação permanente da estabilidade dos aterros, assim como, contribui para o entendimento do comportamento geotécnico dos resíduos. Simões et al., (2006) e Jucá et al., (1999) destacam no Quadro 2, os principais parâmetros que devem ser analisados a partir do monitoramento geotécnico em aterros de RSU.

Quadro 2: Monitoramento geotécnico de aterros sanitários.

| Monitoramento Geotécnico | Função |
|---------------------------------|--|
| Poropressão | Seu objetivo é acompanhar os níveis de pressões nos líquidos e gases e identificar a possível formação de níveis suspensos de líquidos no interior das células de resíduos, avaliando a estabilidade do aterro sanitário através da dinâmica do fluxo dos fluidos e as interações com os resíduos; |
| Deslocamentos | Este monitoramento é essencial para a compreensão do comportamento mecânico que ocorre no interior do maciço que consequentemente influenciam na estabilidade, sendo analisados os deslocamentos verticais (recalques) e os horizontais ao longo do tempo, que estão diretamente relacionados à composição dos RSU e como eles reagem após o confinamento e a aplicação de cargas; |
| Controle tecnológico | São os acompanhamentos de itens estruturais, como bases e taludes, o qual são realizadas análises no campo (compactação e permeabilidade) e análises laboratoriais (caracterização geotécnica, adensamento, compactação, permeabilidade, cisalhamento direto e triaxial); |
| Inspeções de campo | É um complemento de monitoramento indispensável. Possui como função avaliar as condições dos sistemas de drenagem de águas pluviais, controle de processos |

| | |
|--|--|
| | erosivos, ocorrência de trincas nos taludes, falta de material de cobertura, falha na proteção vegetal, afundamentos localizados, inclinação nas drenagens de gás, desalinhamento acentuado de taludes, desalinhamento dos dispositivos de drenagem superficial, surgimento de líquidos lixiviados nos taludes ou bermas e surgimento de gases em taludes e/ou bermas. |
|--|--|

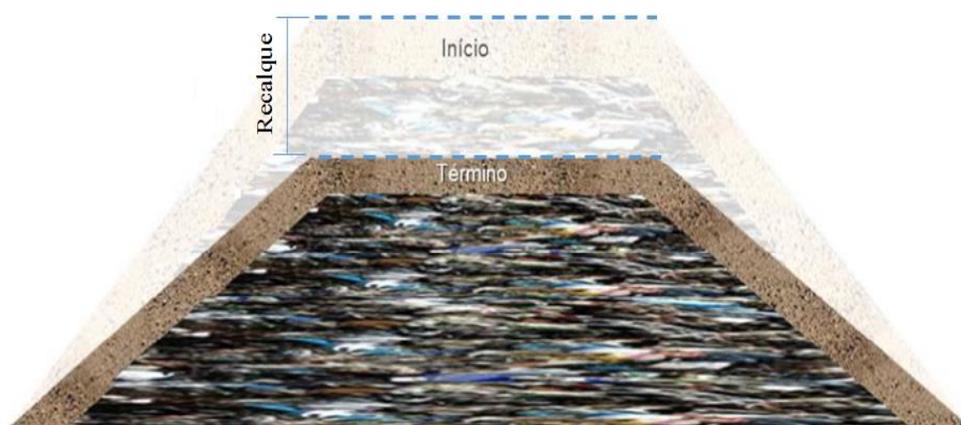
Fonte: Adaptado de Simões et al., (2006) e Jucá et al., (1999).

Todos esses parâmetros citados são de grande importância para a compreensão dos comportamentos de aterros sanitários. Como este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de medição de recalques, a seção seguinte será atribuída às definições, conceitos e principais sistemas de medições utilizados em obras de aterros sanitários, que envolvem os deslocamentos verticais (recalques).

2.1.3 Aspectos gerais dos recalques na geotecnia clássica e ambiental

De acordo com a geotecnia clássica, os recalques são deslocamentos verticais positivos, oriundos do peso próprio do terreno e às cargas aplicadas na superfície (MELO, 2003; PINTO, 2006). No caso de aterros sanitários, Farias (2014) define os recalques como deslocamentos verticais correspondentes à redução de volume e perda de massa que ocorrem ao longo do tempo, devido às cargas aplicadas, redução do índice de vazios e expulsão descendente de líquidos percolantes e ascendente de gases gerados pela degradação. Os recalques são conhecidos a partir da diferença entre a altura inicial e alturas finais medidas ao longo do tempo (Figura 1).

Figura 1: Recalques de maciços sanitários.



Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2016).

2.1.3.1 Fatores que influenciam nos recalques

Um dos primeiros estudos dos mecanismos causadores de recalques em aterros sanitários foi citado por Sowers (1973), que pontuou as principais causas em:

- a) Solicitação mecânica: engloba a distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo das partículas;
- b) Ravinamento interno: se dá pela erosão e migração de materiais finos para os vazios das partículas maiores;
- c) Alterações físico-químicas: Esses materiais estão sujeitos a processo de corrosão, oxidação e combustão;
- d) Biodegradabilidade: É causada por microrganismos, transferindo massa da fase sólida para as fases líquidas e gasosas;
- e) Interações entre mecanismos: Estes mecanismos podem ocorrer concomitantemente, ou ainda, um influenciar o outro;
- f) Dissipação de pressão neutra de líquidos e gases: É a expulsão dos fluidos do interior do maciço do aterro sanitário, de maneira ascendente dos gases e descendentes dos líquidos.

No Quadro 3, está descrito uma classificação de materiais constituintes dos RSU em função de suas características mais relevantes para o comportamento geomecânico do maciço sanitário, destacando que os altamente deformáveis e os degradáveis serão os que terão maior influência na velocidade e intensidade dos recalques ao longo do tempo.

Quadro 3: Classificação do RSU em função do comportamento geomecânico.

| Componentes | Características |
|-----------------------|---|
| Estáveis Inertes | Vidros, metais, cujas propriedades não variam com o tempo. |
| Altamente deformáveis | Apresentam grandes deformações sob cargas constantes ao longo do tempo, como os fragmentos e caixas de papel, plásticos e têxteis. |
| Degradáveis | Facilmente degradáveis, como o material orgânico, vegetais e restos alimentares. Como resultado da degradação, a estrutura sólida inicial se transforma em compostos líquidos e gasosos, quimicamente reativos ou biodegradáveis. |

Fonte: Adaptado de Boscov (2008).

Observa-se no Quadro 3, que a heterogeneidade do maciço de RSU e as características que cada material apresenta, torna complexa a compreensão do comportamento mecânico do

aterro sanitário. Por isso, caracterizar fisicamente os resíduos através de parâmetros que influenciam diretamente neste comportamento é de grande importância.

De acordo com Melo e Jucá (2000), os estudos da caracterização física dos RSU contribuí para o monitoramento geoambiental, compreensão do processo de decomposição da massa de resíduos e na estimativa do tempo de vida útil das áreas utilizadas para disposição de RSU em aterros sanitários.

Araújo Neto (2016), Shuler (2010); Donha (2002), Nascimento (2007) e Melo e Jucá(2000) citam em seus trabalhos que as principais características físicas que influenciam no comportamento de aterros sanitários são a composição gravimétrica, composição volumétrica, peso específico, teor de umidade e temperatura.

2.1.3.2 Evolução dos recalques em aterros sanitários

Os mecanismos que governam os recalques em aterros sanitários são complexos devido à heterogeneidade da composição dos maciços de RSU. Cada elemento apresenta sua própria característica, com tempo diferenciado de decomposição dos materiais inorgânicos e biodegradação dos materiais orgânicos (GOMES, 2017 e BATISTA, 2010). Essas condições geram recalques significativos, que ocorrem em magnitudes maiores que as observadas em solos (BABU et al., 2010 e BOSCOV, 2008).

Segundo Melo (2003) os recalques que se dão ao longo da profundidade da massa de RSU, apresentam diferentes magnitudes ao longo da camada, devido a velocidades distintas de degradação dos RSU em função do tempo.

De acordo com Alcântara (2007) a degradação da matéria orgânica presente na composição dos resíduos geram lixiviado e gases que modificam a pressão no interior da massa de resíduos, podendo comprometer a estabilidade do maciço.

Os recalques em aterros sanitários ocorrem devido aos processos de compactação, compressibilidade e adensamento do maciço. Cabe ressaltar que, embora se faça uma analogia aos solos, esses processos aplicáveis a aterros sanitários apresentam algumas peculiaridades.

- Compactação

A compactação garante ao maciço de aterros sanitários, condições estruturais e de estabilidade (CATAPRETA et al., 2003). Entretanto, Melo (2011) afirma que a compactação quando for excessiva, pode dificultar o fluxo de umidade no interior da massa de resíduos e,

por sua vez, retardar o processo de biodegradação da matéria orgânica. Segundo Garcez (2009), a disposição de grandes quantidades de material plástico nos aterros sanitários pode dificultar a compactação dos resíduos, pois criam camadas impermeáveis que afetam a troca de líquidos e gases gerados no processo de biodegradação da matéria orgânica.

- Compressibilidade

De acordo com Melo (2011); Swati e Joseph (2007); Marques (2001), a compressibilidade em aterros sanitários é dividida em três etapas: compressibilidade inicial ou mecânica, compressibilidade primária e compressibilidade secundária. Cada etapa com duração e comportamentos diferenciados.

A compressão inicial se dá logo após a disposição dos RSU no aterro, por meio da aplicação de cargas externas e ao peso próprio, o qual as partículas se reacomodam nos vazios presentes no maciço. A compressão primária acontece a partir da expulsão de líquidos lixiviados e gases do interior do maciço após a compactação. A compressão secundária ocorre devido ao peso próprio do aterro, pela degradação da matéria orgânica e decomposição da matéria inorgânica. A compressão secundária representa a porção principal dos recalques que ocorrem em aterros sanitários. Entretanto, Araújo Neto (2016) observa em sua pesquisa, que a compressão secundária ocorre de forma mais expressiva, a partir da aplicação de cargas.

Shi et al., (2015) enfatiza que é difícil dividir a compressibilidade que ocorre em aterros de RSU em etapas, pois cada material apresenta sua própria característica de compressibilidade. Melo (2003); Catapreta e Simões (2008) reforçam este pensamento, ao afirmarem que os recalques primários e secundários podem inclusive ocorrer simultaneamente.

Nos trabalhos de Sousa et al., (2015); Melo (2003) e Melo (2011), são apresentados os recalques zero, que significa que os recalques passaram por um período de repouso, na etapa do recalque secundário. Este fenômeno ocorre devido as pequenas tensões efetivas que ocorrem em alguns pontos do aterro, em relação à camada de superfície, ou a poropressão, preenchendo os índices de vazios, no interior do maciço.

- Adensamento

Segundo Farias (2014) o recalque por adensamento nos aterros de RSU ocorre devido à expulsão dos fluidos do maciço, reduzindo o número de vazios e, conseqüentemente, o seu

volume. Cuidados devem ser tomados ao se aplicar em aterros sanitários as hipóteses da Teoria de Terzaghi desenvolvidas para solos. As diferenças entre esses materiais, solos e RSU, são descritas no Quadro 4.

Quadro 4: Hipóteses básicas da teoria de Terzaghi e sua aplicabilidade para aterros sanitários.

| Hipóteses aplicadas a solos | Hipóteses aplicadas a aterros sanitários |
|--|---|
| O solo é homogêneo e saturado. | Os RSU aterrados são heterogêneos e dificilmente encontram-se saturados |
| As partículas de solo e água são incompressíveis. | A maioria dos resíduos apresenta alta compressibilidade. |
| O recalque é unidirecional. | Os recalques podem ocorrer em duas ou três dimensões devido a não uniformidade da carga aplicada e meio de confinamento. |
| O fluxo dos fluidos segue a Lei de Darcy e o coeficiente de permeabilidade é constante. | A Lei de Darcy não é válida para um gradiente hidráulico baixo, assim como a espessura e permeabilidade não pode ser consideradas constantes para materiais altamente compressíveis. Os fluxos advectivos e difusivos de gases também devem ser considerados no cálculo dos recalques em aterros sanitários, considerando a camada de cobertura e as saídas pelos drenos de gases. |
| Pequenas velocidades de deformação são desenvolvidas. | Apresentam grandes velocidades de deformações, devido os resíduos apresentarem constituintes de alta compressibilidade e processos biodegradativos ocorrendo concomitantemente. |
| Para um incremento de carga se desenvolve uma pequena deformação e o coeficiente de compressibilidade é constante. | O índice de vazios mediante um esforço constante decresce devido à compressão. |

Fonte: Adaptado de Moreira (2018) e Tapahuasco (2005).

A magnitude dos recalques pode ser representada em termos percentuais, denominadas de deformações verticais específicas. Alguns estudos relativos a estes percentuais de recalques em diferentes aterros sanitários e células experimentais de RSU já foram realizados por diversos autores e, são apresentados no Quadro 5. As deformações verticais específicas correspondem ao período de análise de cada autor.

Quadro 5: Recalques totais de maciços sanitários.

| Autor | Recalque relativo à espessura inicial |
|---------------------------|--|
| Sowers (1973) | Da ordem de 30% |
| Wall e Zeiss (1995) | Entre 25% e 50% |
| Van Meerten et al. (1995) | Entre 10% e 25% |

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| Coumoulos e Koryalos (1997) | Entre 20% e 25% |
| Ling et al. (1998) | Entre 30% e 40% |
| Abreu (2000) | Entre 10% e 30% |
| Farias (2014) | Da ordem de 25% |
| Caribé (2015) | Da ordem de 35% |
| Araújo Neto (2016) | Entre 35% e 40% |

Fonte: Adaptado de Boscov (2008); Farias (2014); Caribé (2015) e Araújo Neto (2016).

2.1.3.3 Monitoramento de recalques

Segundo Miranda (2012) o monitoramento trata do acompanhamento e estudo, contínuo e sistemático, do comportamento de fenômenos, eventos e situações específicas cujas condições desejam-se identificar, avaliar e comparar.

Compreender as causas e as consequências dos recalques em obras de aterros sanitários faz do monitoramento deste parâmetro um dos mais importantes. Melo, 2011; Batista, 2010; Swati e Joseph, 2008 ; Durmusoglu et al., 2006 enfatizam que o conhecimento adquirido a partir do monitoramento de recalques permite:

- a) Estimar o tempo de vida útil do aterro;
- b) Avaliar a integridade dos sistemas de revestimento, de cobertura e dos dispositivos de drenagem de líquidos e gases;
- c) Estimar o reaproveitamento de áreas ocupadas após o fechamento dos aterros;
- d) Estabelecer correlações entre os recalques e a degradação dos resíduos;
- e) Verificar os indicadores de falhas e comprometimento de estabilidade, a partir da visualização de trincas na cobertura de bermas e taludes, associados aos recalques, prevenindo riscos operacionais e estruturais;
- f) Avaliar as mudanças na compressibilidade em função da degradação dos resíduos.

O monitoramento dos recalques está relacionado a questões como segurança e durabilidade das obras, que precisam ser acompanhadas constantemente desde o início, como controle de qualidade, verificando seu comportamento durante sua construção e utilização (TEDESCHI et al., 2017).

Quando o monitoramento é efetivo, tem-se a possibilidade de identificar em tempo hábil as falhas, favorecendo a tomada de atitudes para mitigar impactos. De acordo com Raposo (2011), as falhas estruturais podem ter consequências catastróficas, desencadeando a perda de vidas humanas e prejuízos ambientais e materiais importantes.

Para a realização do monitoramento dos recalques, devem ser instalados sistemas de medições que possibilitem a obtenção dos dados. Não existe monitoramento sem a medição, por isso, na seção seguinte serão abordados os principais tipos de sistemas de medições utilizados para medir recalques em obras de aterros sanitários.

2.1.4 Principais sistemas de medições utilizados no monitoramento de recalques em aterros sanitários

Nesta seção são apresentados os sistemas de medições que são comumente utilizados para medir recalques em superfície e em profundidade em obras de aterros sanitários. Todos os sistemas citados são adaptados da geotecnia clássica. Alguns desses instrumentos já foram aperfeiçoados, apresentando automação no processo de medição.

2.1.4.1 Levantamento Topográfico

O levantamento topográfico pode ser considerado uma das técnicas mais utilizadas para medir recalques em superfície. Yuen et al. (1997); Bareither e Kwak (2015); Sharma (2000); Jang (2013); Lopes e Gomes (2013); Sharma et al. (2012); Araújo Neto (2016); Catapreta e Simões (2016); Batista (2010); Eyay (2016), citam esta técnica que é utilizada em diversos aterros do mundo.

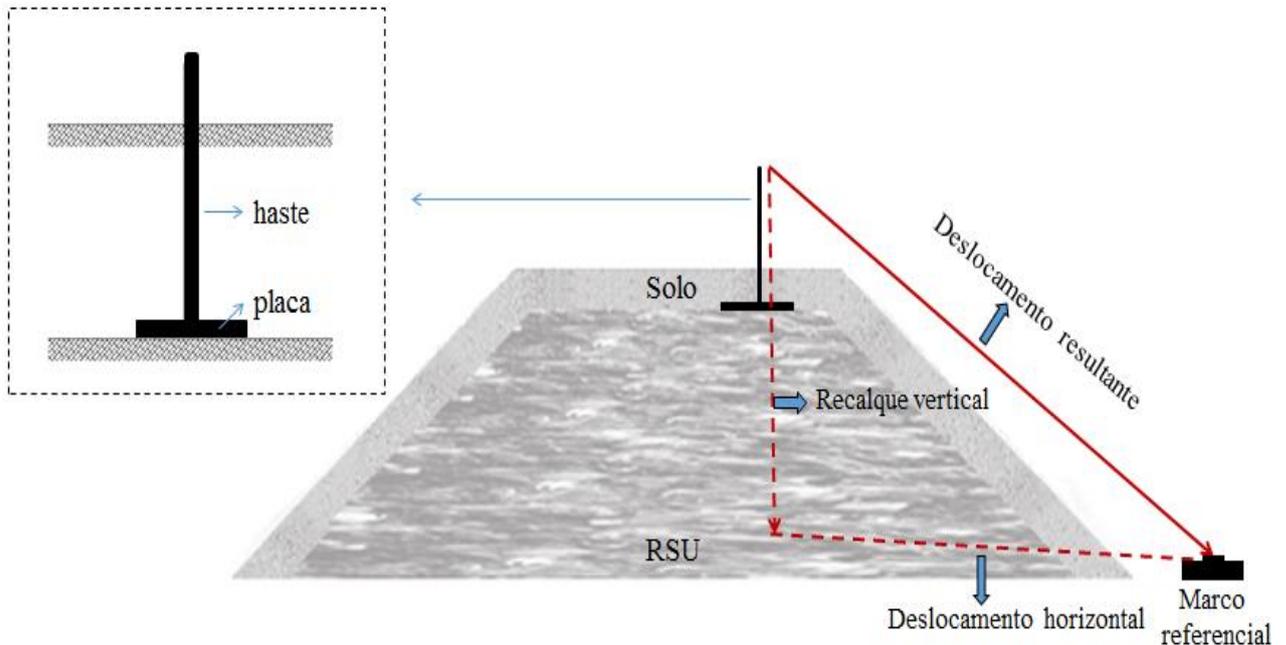
No registro topográfico, podem ser obtidas grandezas de ângulos horizontais e verticais, distâncias e desníveis. A precisão das medidas depende diretamente da escolha dos equipamentos e dos procedimentos de medições utilizados. Os principais sistemas de medições são: teodolito, distanciômetro eletromagnético, estação total e nível.

O marco de referência, também chamado de marco fixo ou marco de apoio é instalado em superfície fixa, não podendo apresentar variações de coordenadas, devendo ser fixado num local de boa visibilidade entre os equipamentos de medidas e os medidores de superfície. É considerada a medição de origem, servindo de referência para comparar às demais medidas.

Os medidores de superfície são compostos de hastes fixadas em placas, confeccionados com materiais resistentes, de modo que garanta um tempo de vida útil prolongado. São instalados na interface da camada de RSU e camada de cobertura e distribuídos em locais estratégicos, que permitam determinar a evolução dos recalques ao

longo do tempo. Os recalques são determinados de acordo com as movimentações das hastes. O método de medição pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Método de levantamento topográfico.



Fonte: Arquivo da pesquisa.

No trabalho de Ferreira et al. (2011), são divididos alguns processos de modernização do método que utiliza a estação total:

- a) Estações robotizadas/robóticas: robotização dos movimentos agregada ao reconhecimento automático de prismas, operada com acesso remoto;
- b) Estações para monitoramento: englobam a capacidade de estações totais automatizadas realizarem coleta de dados em tempos pré-estabelecidos, com o auxílio do *software* de monitoramento.
- c) Estações com imageamento: estações totais com recursos de imagens integrados.
- d) Estações integradas com GPS: a estação pode ser utilizada como estação total integrada ao receptor GPS ou como dois equipamentos independentes.

O Nível óptico: é semelhante ao teodolito e o objetivo deste equipamento é proporcionar pontarias ópticas (RAPOSO, 2011).

A automatização deste sistema de medição é citada no trabalho de Tedeschi (2017), o qual é apresentado a validação de um nível óptico automatizado com aplicação em medição de recalques. O sistema de medição foi aprimorado por Andolfato (2010) e foi intitulado de Sistema de Automação de Nível Digital (SAND), com a função de permitir o monitoramento

automático e contínuo de recalques em estruturas sem comprometer seu uso manual no nivelamento, fazendo uso de microcontrolador, motores de passo e codificadores acoplados, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Nível óptico automatizado.



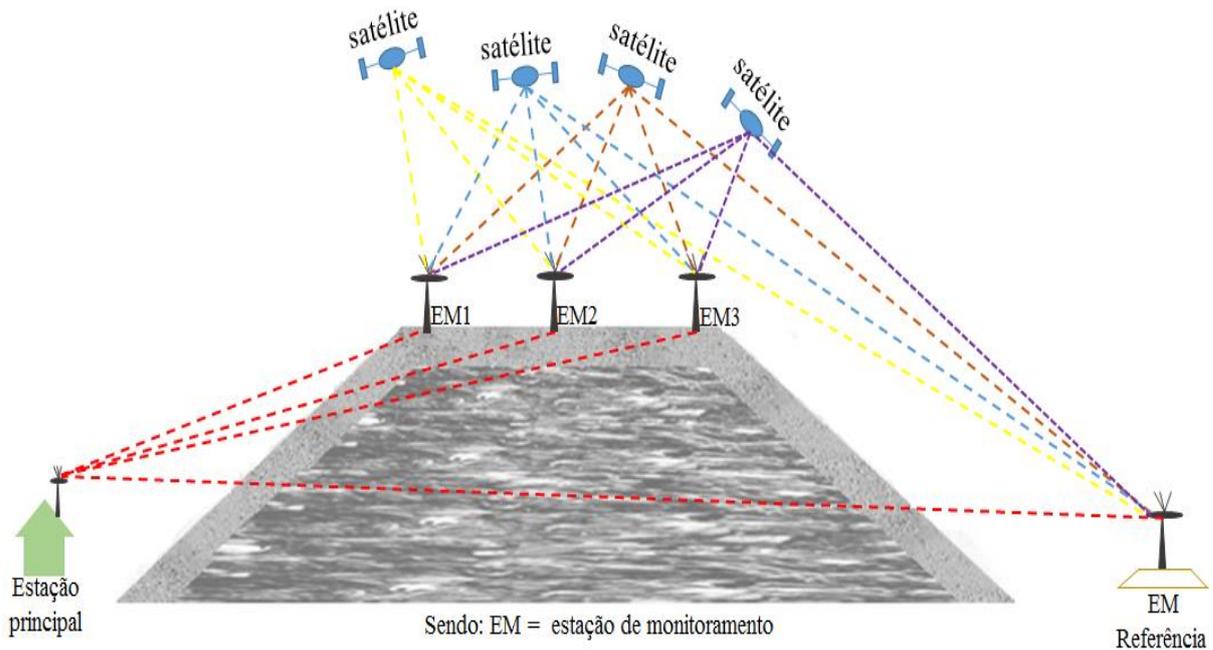
Fonte: Tedeschi (2017).

2.1.4.2 *Global Navigation Satellite System (GNSS)*

O GNSS é um equipamento que necessita do uso de algum dos satélites: norte americano (*Global Position System - GPS*), russo (*Global Navigatsionnaya Sputnikovaya - GLONASS*), europeu (*Galileo*) ou o chinês (*Compass*), para realizar as medições. Quando os satélites são utilizados em conjunto, ocorre uma melhor cobertura, aprimorando o nível de precisão das medidas (RAPOSO, 2011).

Seu método consiste na implantação de estações de monitoramento no local da investigação, que através de ondas emitidas por antenas, rastreiam os satélites para obter as coordenadas. Estas informações são transmitidas aos receptores, localizados na superfície terrestre, que processam o sinal dos satélites e os transmitem para uma estação principal, o qual os dados serão processados e tratados, conforme o esquemático da Figura 4.

Figura 4: Esquemático de funcionamento do GNSS.



Fonte: Arquivo da pesquisa.

As principais desvantagens apresentadas por este sistema de medição são os obstáculos que impedem os receptores de receberem o sinal dos satélites.

Abichou et al. (2013) monitorou superficialmente células de um aterro sanitário nos EUA empregando um equipamento que utiliza sistema GPS (modelo Trimble 4800).

2.1.4.3 Medidor magnético de recalques (MMR)

Este método é muito utilizado para medir os recalques em profundidade de aterros sanitários. Esta é a metodologia utilizada como base para o desenvolvimento do sistema de medição automatizado deste trabalho.

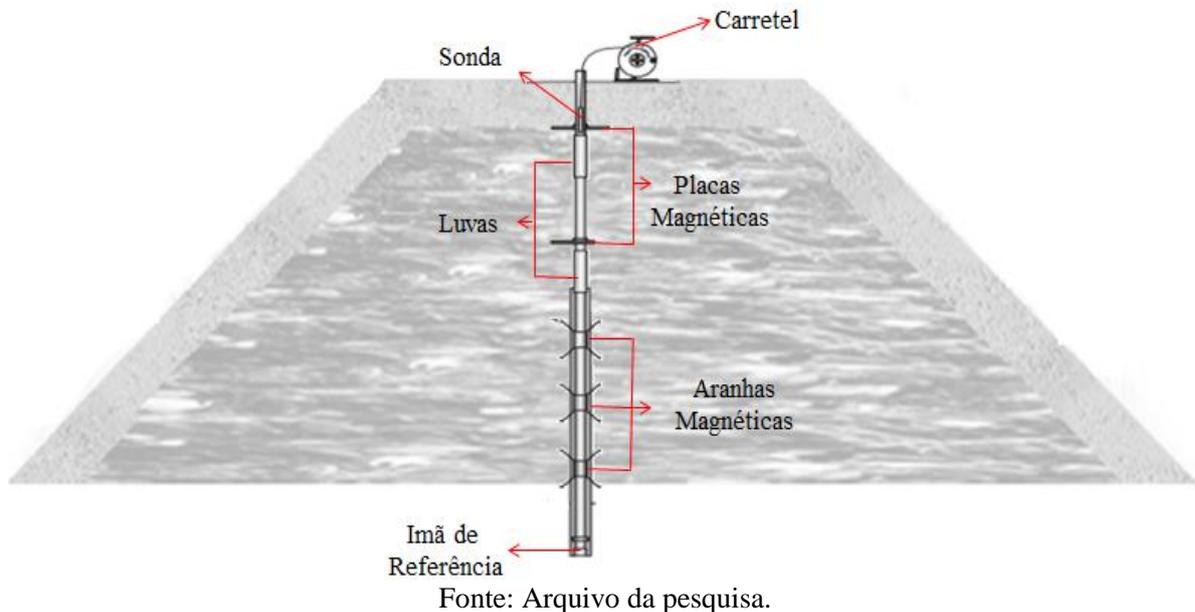
Watts e Charles (1990); Andersen et al. (2004); Al-Yaqout e Hamoda (2007); Alcântara e Jucá (2010); Cox et al. (2016), Cox et al. (2016) e Araújo Neto et al. (2017) utilizaram esta metodologia para verificar a magnitude dos recalques em aterros sanitários em diferentes profundidades.

Neste sistema de medição o monitoramento dos recalques é baseado no acompanhamento das movimentações das placas magnéticas ou aranhas distribuídas no interior do maciço de RSU ao longo da profundidade.

De acordo com a Figura 5, o sistema de medição é constituído de:

- 1) Tubo guia;
- 2) Placas magnéticas e/ou aranhas magnéticas;
- 3) Imã de referência;
- 4) Sensor de detecção do campo magnético integrado ao cabo graduado ou à fita métrica (trena milimetrada).

Figura 5: Esquemático do detector de magnético.



Este método pode ser instalado quando o maciço em investigação estiver encerrado ou pode ser instalado concomitantemente ao processo de operação e disposição dos RSU. Considera-se que o maciço está encerrado quando já houve a disposição dos RSU em camadas até a altura máxima definida em projeto e a camada de cobertura já foi efetivada.

Quando o maciço em investigação está encerrado é realizado um furo de sondagem para a instalação do sistema de medição. Quando o maciço está em operação, a fixação do tubo guia ocorre antes da disposição da primeira camada de resíduos sobre a camada de base.

O tubo guia é instalado na posição vertical, sua extremidade inferior é fixada na camada de base do aterro, em uma fundação que não recalca junto ao maciço. Os tubos são prolongados a partir da conexão de luvas, até atingirem a altura desejada de monitoramento.

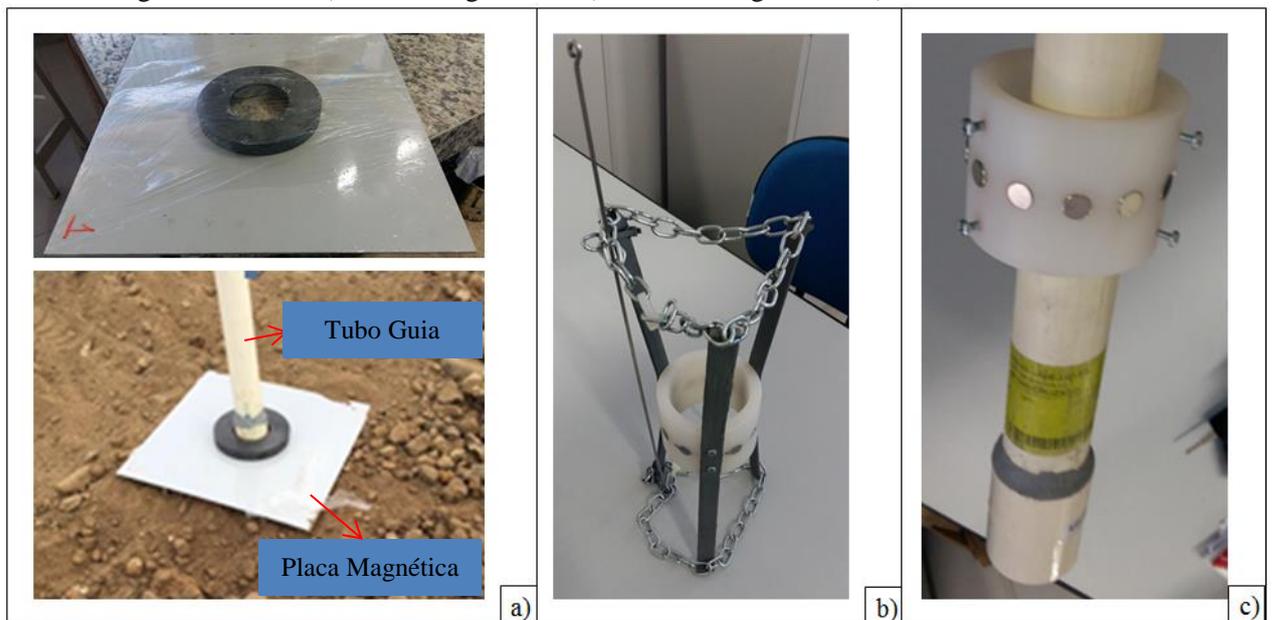
Placas magnéticas: confeccionada com material resistente a corrosão, com um orifício na posição central de diâmetro superior ao diâmetro externo do tubo guia. Um imã tipo ferrite em formato de disco é acoplado na extremidade do orifício central da placa. As placas magnéticas são utilizadas principalmente quando o monitoramento inicia na fase de enchimento (em operação), ou nas camadas superiores próximos a camada de cobertura do aterro e são dispostas diretamente no maciço, conforme ilustrado na Figura 6 a.

Aranhas Magnéticas: São anéis com imãs (ferrite ou de neodímio) e garras, Figura 6 b. Utilizadas quando a altura de disposição dos RSU já é elevada, sendo instaladas somente através do furo de sondagem. A aranha é acionada após transpassar externamente o tubo guia e estar posicionada numa altura pré-estabelecida para iniciar o monitoramento. As garras fixam-se na massa de RSU e a aranha acompanha os movimentos do maciço.

Imã de referência: Este anel magnético é instalado na fundação da camada de base o qual é fixado o tubo guia. É considerado o marco comparativo de leitura ou marco zero, Figura 6 c.

No interior do tubo guia, pela extremidade superior é inserida manualmente uma sonda que contém um sensor que ao detectar o campo magnético das placas, aranhas e imã de referência. Ao identificar o campo magnético, fecha um contato que aciona imediatamente um sinal sonoro e luminoso.

Figura 6: MMR- a) Placas magnéticas; b) Aranhas magnéticas; c) Imã de referência.



Fonte: Grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG (2018).

O operador verifica em qual distância foi detectado o campo magnético, através do cabo graduado ou fita graduada o qual o sensor está fixado. O medidor magnético de recalque pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7: MMR - Detector de campo magnético.



Fonte: COMMETRO (2018).

Na primeira leitura, após a identificação do campo magnético de cada elemento, os valores são armazenados e a partir das leituras seguintes são realizados comparativos entre o ímã de referência e as demais leituras, sendo o recalque mensurado como a diferença entre a localização atual medida e a localização anterior medida de cada placa ou aranha magnética.

De acordo com Affonso (2004), as principais vantagens em utilizar este método estão relacionadas à facilidade de confecção e manutenção, baixo custo, durabilidade e não limitação da quantidade de placas instaladas. Como desvantagens, o mesmo autor cita as dispersões nas medidas em função da profundidade da placa, além disso, os procedimentos das leituras são relativamente demorados. Outro fator a ser citado como desvantagem na utilização deste sistema de medição em obras de aterros sanitários são as possíveis variações do campo magnético no interior do maciço de RSU.

2.1.4.4 Transdutor de pressão

Hunte et al. (2007) e Bachus et al. (2006) monitoraram os recalques de uma célula de um aterro sanitário de RSU durante a etapa de enchimento. Os autores utilizaram um sistema de medição de deslocamento com auxílio de um transdutor, que utiliza medição de pressões num líquido padrão em diferentes níveis de profundidade.

O transdutor de pressão fica conectado a um prato no aterro e num lugar mantido na cabine de leitura, externo ao maciço em investigação, que tem um nível conhecido. O sensor é conectado via tubulação. A pressão do fluido é monitorada pelo transdutor de pressão, que fornece a diferença de elevação entre o sensor e o elevatório de referência.

2.2 Conceitos de Metrologia

2.2.1 Contextualização do uso da metrologia na geotecnia

A necessidade da utilização de ferramentas para medir, controlar e monitorar, está presente na vida dos seres humanos desde as primeiras civilizações, com o intuito de facilitar o comércio e as atividades cotidianas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). As medições atuam como uma extensão da capacidade humana, desempenhando a função de quantificar as observações para obtenção de parâmetros que remetam a compreensão de determinado processo, criação, desenvolvimento e constatação de teorias e modelos científicos. A metrologia é ciência das medições e suas aplicações (INMETRO, 2012).

A metrologia está presente em basicamente todas as áreas do conhecimento, científicas ou tecnológicas, promovendo-se como pilar fundamental para: o crescimento e inovação tecnológica, promoção da competitividade e criação de um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial (FERNANDES et al., 2009).

O investigador antes de iniciar as análises que venham a gerar uma descoberta ou a compreensão de determinado fenômeno, necessita realizar os experimentos necessários para a obtenção dos dados. É no momento da investigação que os sistemas de medições tornam-se fundamentais para qualquer avanço nas pesquisas. Balbinot et al. (2011) afirmam que a importância da instrumentação poderia ser resumida em uma única frase: “A medição é a base do processo experimental”.

Segundo Marinho (2005), o estudo da geotecnia só obteve avanços significativos, a partir do uso da metrologia, justificando ações de engenharia geotécnica baseada em medidas obtidas no monitoramento. O uso da metrologia na geotecnia é proveniente de outrora e surge da necessidade em medir para compreender algum fenômeno.

Karl Terzaghi, conhecido como o pai da mecânica dos solos, quando estava construindo um túnel, na qualidade de chefe de projeto, utilizou técnicas de medições para opinar sobre que mecanismos poderiam estar originando os deslocamentos (RAPOSO, 2011). Uma observação curiosa citada por Marinho (2005) é que um dos instrumentos de medidas

mais utilizados na geotecnia, o piezômetro, tem seu princípio proveniente da área da saúde, no ano de 1733, quando Stephen Hales mediu a pressão sanguínea de um cavalo (Figura 8).

Figura 8: O primeiro “Piezômetro”.



Fonte: Marinho (2005).

2.2.2 Definições e termos utilizados na metrologia

Com o avanço tecnológico e a globalização da informação, verificou-se a necessidade de uniformizar a terminologia no campo da metrologia, numa linguagem o qual padronizasse definições, sistemas de unidades e outros aspectos relacionados às medidas, o qual fosse possível compreender um projeto, montar, reproduzir ou aperfeiçoar equipamentos e sistemas de medições no mundo inteiro. Esta unificação é representada pelo VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia), com as diretrizes do Guia (INMETRO, 2012). No Brasil, o VIM foi aprovado pela Lei Nº 9.933 de 1999, Decreto Nº 6.275 de 2007, através da Portaria Nº 232 de 2012.

O Vocabulário utiliza um conjunto de termos fundamentais e gerais de metrologia. Alguns deles serão apresentados a seguir, conforme o VIM (INMETRO, 2012), para a melhor compreensão do desenvolvimento do sistema de medição proposto neste trabalho.

Medição (VIM 2.1): Processo de obtenção experimental dum ou mais valores que podem ser razoavelmente atribuídos a uma grandeza;

Instrumento de medição (VIM 3.1): dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares;

Sistema de medição (VIM 3.2): conjunto dum ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de natureza especificadas.

Procedimento de medição (VIM 2.6): descrição detalhada duma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada num modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado à obtenção dum resultado de medição;

Veracidade de medição (VIM 2.14): grau de concordância entre a média dum número infinito de valores medidos repetidos a um valor de referência;

Validação (VIM 2.45): verificação na qual os requisitos especificados são adequados para um uso pretendido;

Repetibilidade (VIM 2.20): Condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo;

Comparabilidade (VIM 2.46): comparação de resultados de medição que, para grandezas duma dada natureza, são rastreáveis metrologicamente à mesma referência;

Calibração (VIM 2.39): Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação;

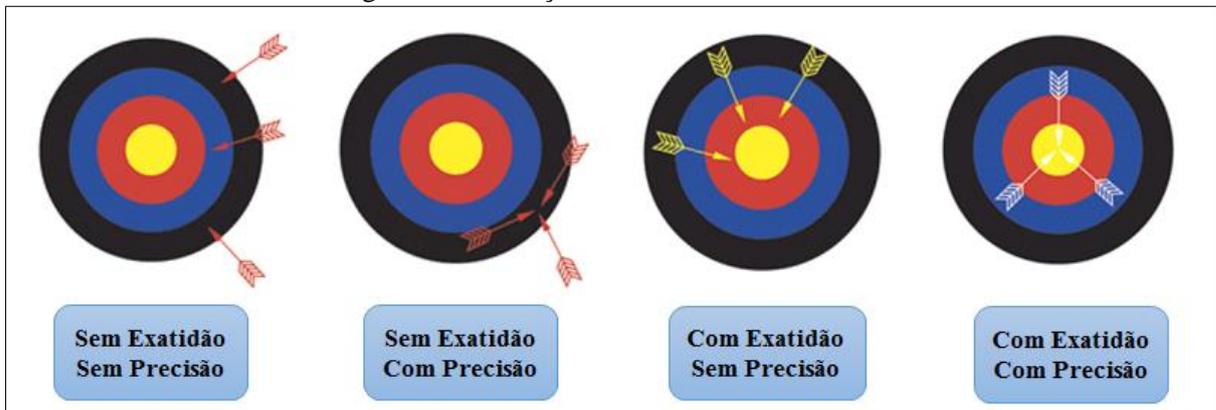
Exatidão (VIM 2.13): grau de concordância entre um valor medido e um valor mensurando; a exatidão não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando fornece um erro de medição menor.

Precisão (VIM 2.15): Grau de concordância entre indicadores ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou objetos similares, sob condições especificadas;

Os conceitos de exatidão e precisão são considerados clássicos nos procedimentos de medição e eles caracterizam o grau de rigor o qual a medição é realizada. São termos que são

em geral, muito confundidos, por isso, na Figura 9 segue uma ilustração utilizando alvos para diferenciá-los, sendo representado como o alvo principal o valor mensurado e as flechas os valores medidos.

Figura 9: Diferença entre Exatidão e Precisão.



Fonte: Adaptado de Cabral (2004).

Analisando essa analogia do disparo da flecha no alvo, pode-se dizer que a exatidão corresponde a acertar a flecha no centro do alvo ou próximo ao centro. A precisão corresponde à repetição de vários disparos acertando pontos muito próximos entre si.

É importante ressaltar que ao efetuar uma medida, por maior que seja o cuidado no momento da realização, não existe medida perfeita, pois sempre estarão sujeitas a erros. As medições podem ser influenciadas por diversos tipos de erros, e classificá-los é uma prática habitual (CABRAL, 2004).

Erro de medição (VIM 2.16): Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência. São divididos em alguns tipos de erros:

- Erros sistemáticos: em medições repetidas os erros permanecem constantes ou variam de maneira previsível. Este tipo de erro é geralmente dividido em duas categorias. A primeira são os erros instrumentais, definidos como as falhas nos instrumentos e a segunda os erros ambientais, devido às condições externas que afetam a medição. Devem ser compensados ou corrigidos;
- Erros aleatórios: erro que em medições repetidas, varia de maneira imprevisível;
- Erros grosseiros: está relacionado aos erros humanos nas leituras das escalas e na utilização dos instrumentos, e erros em cálculos e registros de resultados. São geralmente fáceis de detectar e eliminar.

Para efeitos de cálculos são utilizados os erros absolutos e os erros relativos.

- Erro absoluto: corresponde à diferença algébrica entre o valor medido e o valor verdadeiro.
- Erro relativo: São muito utilizados para determinar erros de medições, em porcentagem.

Incerteza (VIM 2.26): Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

É comum confundir os conceitos entre erro e incerteza. A incerteza descreve a qualidade de uma medida e a qualidade do ensaio, o qual deve ser apresentado uma faixa que contenha o valor verdadeiro da medida com um determinado nível de confiança. O erro quantifica a variabilidade de medidas obtidas pelo sistema de medição, decorrentes das interações com o meio o qual está inserido, como: método, pessoas, meio ambiente, produtos, entre outros aspectos.

2.2.3 A importância do desenvolvimento de sistemas de medições para obras geotécnicas

Conforme Gomes (2002), os sistemas de medições desenvolvidos para obras da área de geotecnia, tratam-se de um conjunto de instrumentos e dispositivos destinados a medir grandezas relativas às ações, propriedades estruturais, respostas das estruturas ou dos maciços que as suportam ou integram.

Para realizar uma medida bem sucedida, os sistemas de medições devem ser confiáveis, apresentando informações técnicas consolidadas inerentes aos instrumentos, princípios de funcionamento e calibração. Os dados devem apresentar além de exatidão e precisão, erros toleráveis que não venham a se distanciar significativamente do valor verdadeiro ou valor de referência. Também é imprescindível, saber avaliar sua adequação ao que se pretende utilizá-lo. Para Manconi (2016), os alicerces para a compreensão e interpretação de uma investigação, se dão a partir dos dados obtidos pelos sistemas de medições.

As pesquisas e os avanços tecnológicos são fortes aliados no aperfeiçoamento ou desenvolvimento de sistemas de medições. Atualmente, o uso da telemática, junção da eletrônica, informática e telecomunicações, em basicamente todas as áreas do conhecimento vem contribuindo de maneira representativa nos diversos ramos da ciência, através da inserção de novas tecnologias, como: sensores, microcontroladores, chips, entre outros, capazes de encontrar saídas práticas e versáteis dos problemas mais simples aos mais complexos que envolvem o monitoramento geotécnico, bem como a possibilidade da

automação e aperfeiçoamento tanto em *hardware* como em *software* do sistema medição. A evolução da microeletrônica e da computação propiciou ao desenvolvimento de modernos sistemas de medições, fornecendo um salto na qualidade das medidas, impactando de forma positiva e significativa as atividades que dependem das medições.

O atual desenvolvimento da tecnologia e, em termos mais específicos, da automação, levou ao surgimento de novas técnicas de implementações de funcionalidades, de forma a aperfeiçoar a produção industrial, a operação de equipamentos, construção de dispositivos simples e baratos em larga escala (NEVES et al., 2007).

A geotecnia, também vem acompanhando esses processos evolutivos nos sistemas de medições que são utilizados no monitoramento de obras geotécnicas e vem introduzindo nas últimas décadas, novos equipamentos para auxiliar nas atividades de investigação, que consistem desde a simples cravação de um elemento no terreno até a adoção de sensores elétricos (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Para obras de aterros sanitários, desenvolver sistemas de medições que acompanhem essas novas tecnologias é relevante, principalmente, por se tratarem de obras de grandes dimensões, em constantes mudanças como já citado anteriormente, necessitando de monitoramento periódico para compreendê-la. Outro fator é a insalubridade e a falta de segurança o qual o operador fica sujeito, como pode ser observado no monitoramento de recalques em superfície e em profundidade, realizado no aterro em Campina Grande – Paraíba (Figura 10).

Figura 10: Operadores em campo realizando medição de recalques em aterro sanitário de RSU.



Fonte: Grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG (2018).

Por isso é importante desenvolver a ciência das medições, considerando as características e as condições diferenciadas de aterros sanitários, principalmente, para consolidar técnicas e Normas que envolvem as medições desses parâmetros, estudar as tendências ao longo do tempo, projetando situações futuras.

2.3 Entendimento e desenvolvimento dos dispositivos de *hardware* e dos aplicativos de *software* utilizados no sistema de medição

Os avanços tecnológicos na área da microeletrônica propiciaram benefícios para as mais diversas áreas do conhecimento, principalmente, ao proporcionarem melhorias nos sistemas de medições. A informação é parte integrante de toda atividade humana, individual ou coletiva e, portanto, todas essas atividades tendem a serem afetadas diretamente por novas tecnologias (WERTHEIN, 2000).

A disseminação desses avanços tecnológicos propicia ao usuário de sistemas de medições a oportunidade de realizarem suas atividades em tempo reduzido, aumentando a qualidade dos dados em termos de precisão e exatidão, além da comodidade em monitorar remotamente o objeto em investigação.

Para desenvolver sistemas de medições que englobem o uso desses avanços são necessários conhecimentos a cerca de dispositivos de *hardware* e aplicativos de *software*. Para a aplicabilidade do sistema de medição é necessário o conhecimento das técnicas de medições que são comumente utilizadas e das características do objeto de estudo, para a tomada de decisão da escolha dos dispositivos.

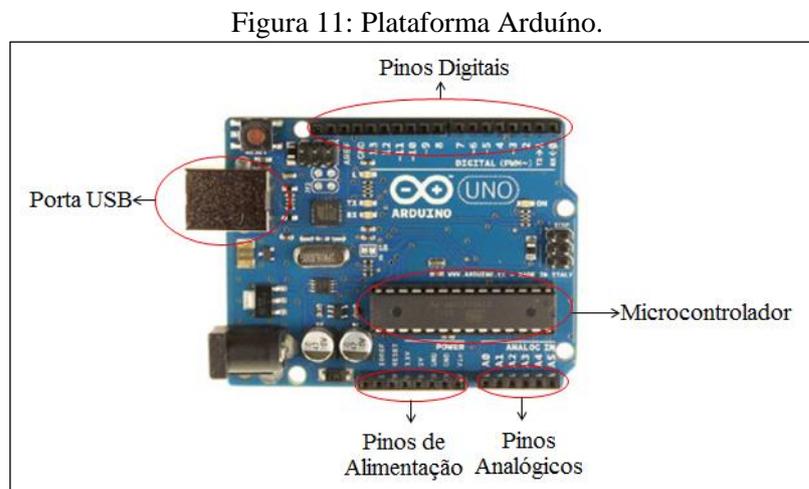
Diante disso, nesta seção são definidos os principais dispositivos de *hardware* e aplicativos de *software* utilizados na implementação do sistema de medição de recalques proposto neste trabalho. Além disso, se expõe de maneira resumida a configuração do campo magnético para dois tipos de imãs, que serão utilizados no procedimento de medição.

2.3.1 *Hardware*

2.3.1.1 Arduino

Este dispositivo tem excelente aceitação e disseminação na área acadêmica. É uma

plataforma *open-source* (códigos, arquivos de projetos e diagramas esquemáticos disponíveis gratuitamente), de prototipagem eletrônica baseada em flexibilidade, na qual o *software* e *hardware* livres são de fácil compreensão, para serem usados e adaptados aos mais diferentes cenários e aplicações (STEVAN; SILVA, 2015). É uma ferramenta de *hardware* que controla o meio físico através de sensores e atuadores. Uma plataforma microcontroladora programável de desenvolvimento, que lhe dá o poder de definir o funcionamento dos sistemas mecânicos, elétricos e de software complexos usando comandos relativamente simples (BLUM, 2016). Na Figura 11, está ilustrada uma das plataformas Arduino, com o microcontrolador inserido a ela.



Fonte: Creative Commons (2014).

2.3.1.2 Microcontrolador

É o responsável pelo processamento do sinal. São circuitos integrados desenvolvidos para manipular, interpretar e transformar os sinais de tensão e corrente vindos dos sensores (entradas) e ativar ações de saídas.

2.3.1.3 Módulo *Real Time Clock* (RTC)

É uma pequena placa que funciona como um controlador de tempo real, com alta precisão e que demanda baixo consumo de energia. Ideal para aplicação de controle e monitoramento de longo prazo (STEVAN; SILVA, 2015). Na Figura 12 pode ser observado um dos modelos de módulo RTC.

Figura 12: Módulo RTC.



Fonte: Rocha et al., (2014).

2.3.1.4 Relé

Funciona como um interruptor eletrônico, quando alimentados pelo circuito de controle atua em um solenoide que, por sua vez, abre ou fecha o circuito (STEVAN; SILVA, 2015). Na Figura 13 estão ilustrados 8 relés.

Figura 13: Relé.

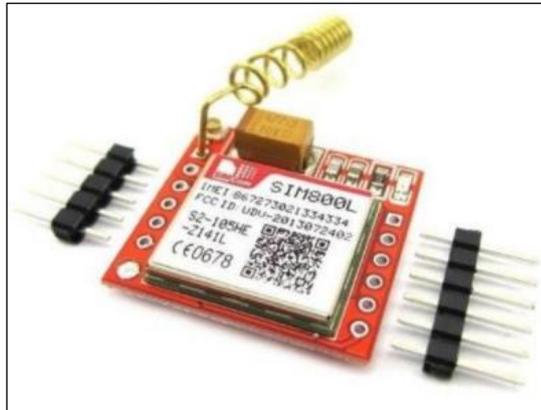


Fonte: Portes (2014).

2.3.1.5 Módulo *Global System for Mobile Communications* (GSM):

É um módulo compatível com o arduino e é programado para operar na rede móvel de celulares, enviando e recebendo os dados. É muito utilizado para telemetria e sensoriamento remoto. Sua função no sistema de medição é transmitir os dados a distância e sem fio. Na Figura 14, pode ser observado o modelo de um dos módulos GSM.

Figura 14: Módulo GSM.

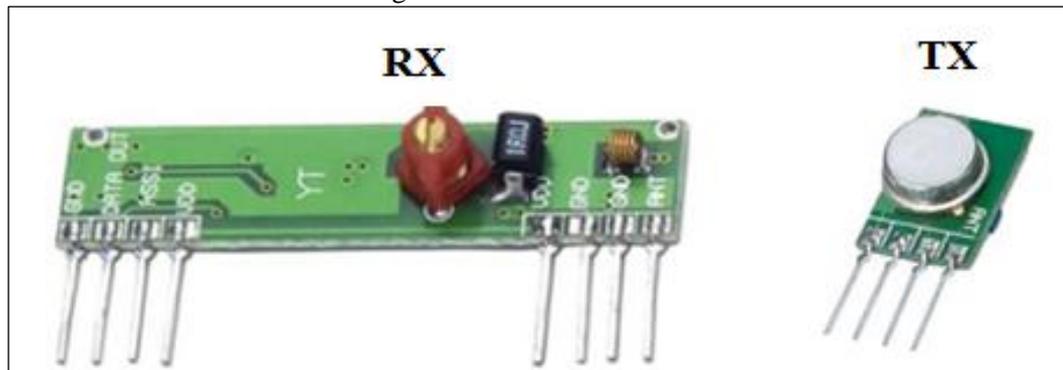


Fonte: Homepage Filipeflop (2017).

2.3.1.6 Módulo de Transmissão e Recepção (TX e RX):

Comunicação sem fio, que transmite e recebe o sinal por rádio frequência através de ondas eletromagnéticas. Seu *hardware* pode ser observado na Figura 15.

Figura 15: Módulo TX e RX.

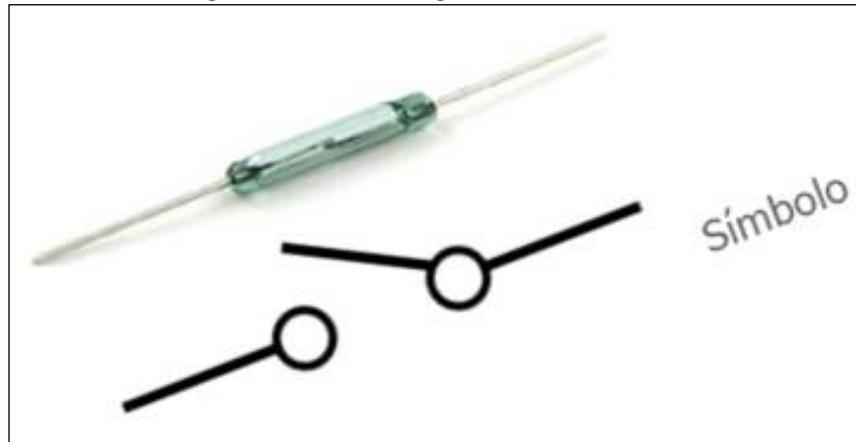


Fonte: Silva (2010)

2.3.1.7 Sensores magnéticos

São interruptores elétricos acionados na presença do campo magnético. Os dois principais tipos são: chave magnética do tipo *reed switch* e sensores de efeito *hall* (STEVAN; SILVA, 2015). Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado o *reed switch* (Figura 17), que são sensores indutivos, invólucros de vidro que na presença do campo magnético fecham um contato elétrico.

Figura 16: Sensor magnético (reed switch).

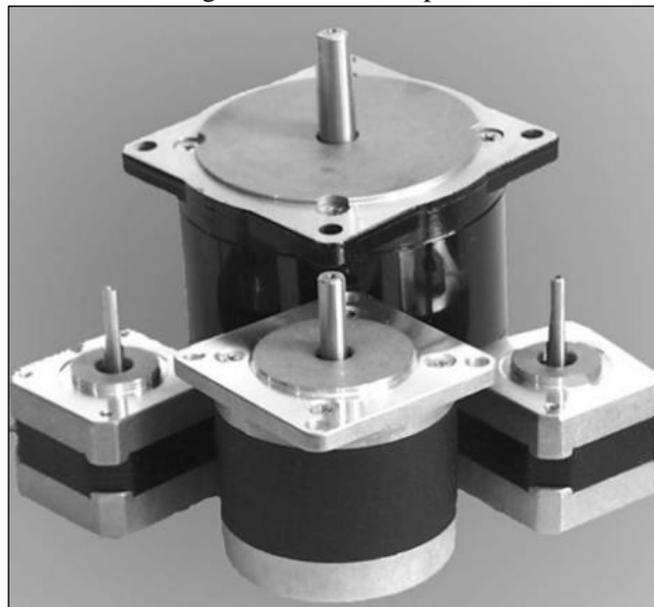


Fonte: Commons (2014).

2.3.1.8 Motor de passo

É um dispositivo eletromecânico, que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos, o rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos” (BRITES; SANTOS, 2008). O motor de passo utilizado para esta pesquisa foi o Nema, que desloca um ângulo de $1,8^\circ$ a cada pulso recebido. Alguns dos modelos existentes podem ser visualizados na Figura 18.

Figura 17: Motor de passo.



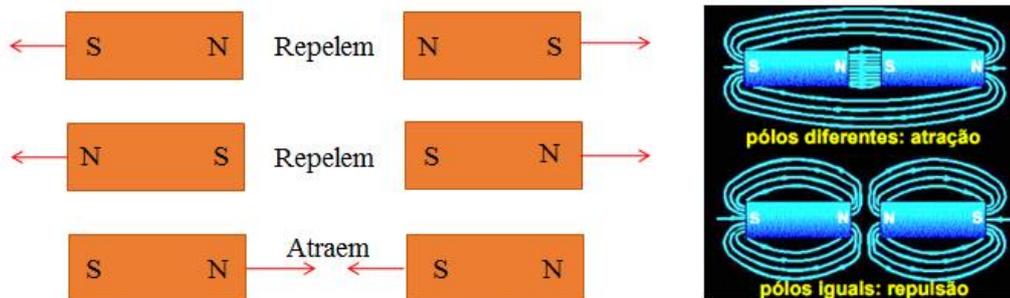
Fonte: Hughes e Drury (2013).

2.3.1.9 Imãs

Nesta subseção são descritos alguns conceitos inerentes a dois grupos de imãs que foram utilizados na confecção de placas magnéticas e aranhas magnéticas, o de ferrite e o de neodímio. As aplicabilidades dos imãs influenciam na escolha do sensor que identifica o campo magnético, no posicionamento do sensor para a identificação e, finalmente nos cálculos para minimização de erros de medidas.

As interações magnéticas são descritas através de uma grandeza vetorial, conhecida como campo magnético, que podem ser representados por linhas de força, que indicam a direção e o sentido do campo magnético, como pode ser verificado na Figura 19.

Figura 18: Interação magnética.



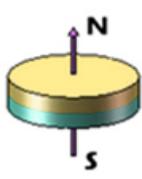
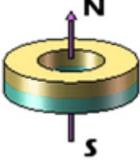
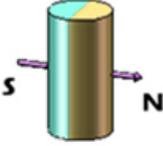
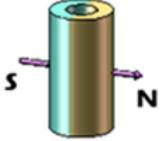
Fonte: Mussoi (2005)

O campo magnético pode ser definido pela medida da força que o campo exerce sobre o movimento das partículas de carga, tal como um elétron (MUSSOI, 2005).

Compreender a direção de magnetização de cada ímã é muito importante, devido as diferentes configurações que serão apresentadas no campo magnético. Esta direção é pré-definida no processo de fabricação.

O ímã de neodímio geralmente são fabricados com direção de magnetização que os tornem mais fortes possíveis, por isso, são conhecidos como super ímãs. As direções de magnetização mais utilizadas são: axial e diametral e podem ser visualizadas no Quadro 6.

Quadro 6: Direções de magnetização de ímã axial e ímã diametral.

| Tipo | Formas | | | |
|-----------|---|---|---|---|
| | discos | cilindros | anéis | anéis cilíndricos |
| Axial |  |  |  |  |
| Diametral |  |  |  |  |

Fonte: Homepage Ímã e neodímio (2018).

2.3.2 Software

2.3.2.1 Linguagem de programação usada no Arduino:

A plataforma de desenvolvimento utilizada para programar o arduino é associada com uma linguagem de programação baseada em C/C++, que utiliza o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*), escrita em Java com múltiplas bibliotecas que facilitam essas programações (TIMMIS, 2011). O Arduino IDE é disponibilizado no site oficial do Arduino e antes de utiliza-la é necessário instalar o driver, para comunicação serial da aplicação com as diferentes distribuições de sistemas embarcados do fabricante. O mecanismo permite ao usuário uma programação de alto nível (ROCHA et al., 2014).

2.3.2.2 Fritzing

É um *software* livre que possui bibliotecas que representam o arduino, facilitando a criação de diagramas e esquemas eletrônicos, prototipagem e *layout* de placas de circuito impresso (PCI). É um programa de automação de desenho eletrônico, passando os protótipos para produtos finais (COMMONS, 2014).

2.3.2.3 *Easily Applicable Graphical Layout Editor (Eagle)*

É um software gratuito, que auxilia no projeto e construção de placa de circuito impresso. Bastante utilizado pela comunidade acadêmica e pelas pequenas empresas de design de placas de circuito impresso, devido ao fato de possuir termos de licença favorável e uma vasta biblioteca de componentes disponíveis na internet (BARATO, 2014).

2.4 Conceitos Estatísticos para a Validação e Calibração do Sistema de Medição

Para desenvolver um sistema de medição confiável é necessário identificar e quantificar fontes de erros que possam interferir nos resultados de medição. A análise estatística desempenha esta função, ao estimar a incerteza associada ao resultado final das medições. A qualidade de um sistema de medição é geralmente determinada pelas propriedades estatísticas dos dados que ele produz (MENEZES, 2013).

Segundo Barbetta et al. (2010), a estatística envolve técnicas para coletar, organizar, descrever, analisar e interpretar dados provenientes de experimentos ou vindos de estudos observacionais.

Cabral (2004) afirma que numa experiência, num ensaio ou numa medição de qualquer outra natureza, é aconselhável repetir as leituras diversas vezes, para gerar a confiabilidade das leituras, reduzindo a incerteza. Esta afirmação é decorrente da ideia de que não existe medida perfeita e todas as medições estão sujeitas a erros que podem passar despercebidos se não houver qualquer parâmetro de comparação. Por isso, uma das principais funções do experimentador é identificar e quantificar essas fontes de erros.

2.4.1 Estatística descritiva

É o ramo da estatística que se preocupa em descrever os dados observados da amostra, sintetizando uma série de valores de mesma natureza, permitindo dessa forma que se tenha uma visão global da variação desses. Algumas das medidas que são normalmente utilizadas para descrever um conjunto de variáveis quantitativas são: medidas de tendência central e medidas de variabilidade.

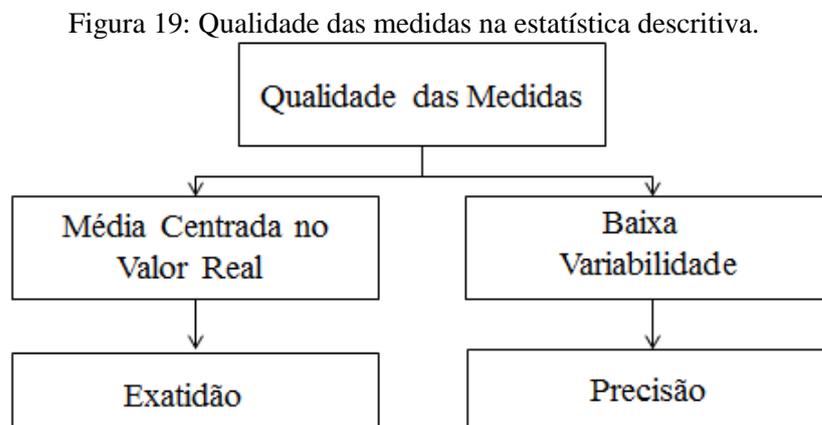
As medidas de tendência central indicam um ponto em torno da concentração dos dados e suas principais medidas são a média, a mediana e a moda. A medida de tendência central mais utilizada para representar a massa de dados é a média, que é o valor mais provável de uma medida de um conjunto de leituras realizadas.

As medidas de variabilidade indicam se os dados estão próximos ou não um do outro, auxiliando as medidas de tendência central a descrever adequadamente o conjunto de dados. De acordo com (PAIVA, 2009), os elementos que são comumente utilizados no estudo da variabilidade dos dados são: a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

O coeficiente de variação mostra o quão maior (ou menor) o desvio-padrão é, em relação à média, sendo de grande importância para comparar distribuições de unidades diferentes, mas que tem pouca utilidade quando a média aritmética se aproxima de zero (SILVA ANDRIOTTI, 2013).

Segundo Paiva (2009) um coeficiente menor ou igual a 15% tem baixa dispersão, se o coeficiente de variação for entre 15 e 30% haverá uma média dispersão e, se maior que 30% uma alta dispersão.

A aplicação dessas propriedades estatísticas pode indicar a qualidade das medidas dos sistemas de medições, conforme a Figura 20.



Fonte: Adaptado de Menezes (2013).

Conforme Menezes (2013), a precisão de um sistema de medição está relacionada com a variabilidade dessa distribuição, ou seja, quanto maior a variabilidade, menor a precisão. A exatidão está relacionada com a média da distribuição, quanto mais perto do valor de referência, maior é a exatidão.

2.4.2 Regressão linear simples

Consiste na obtenção da equação linear que explique a variação da variável dependente (Y) pela variação da variável independente (X), sendo os parâmetros estimados pelo Método dos Mínimos Quadrados, que minimiza a soma dos quadrados das distâncias entre os valores estimados e observados (VIANA e LANZILLOTTI, 2017).

Dessa forma estabelece-se uma relação funcional entre essas variáveis minimizando o erro de estimativa. A partir da Equação 1, obtêm-se a regressão.

$$Y = \alpha + \beta_1 X_i + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

Y = variável dependente.

X = variável independente.

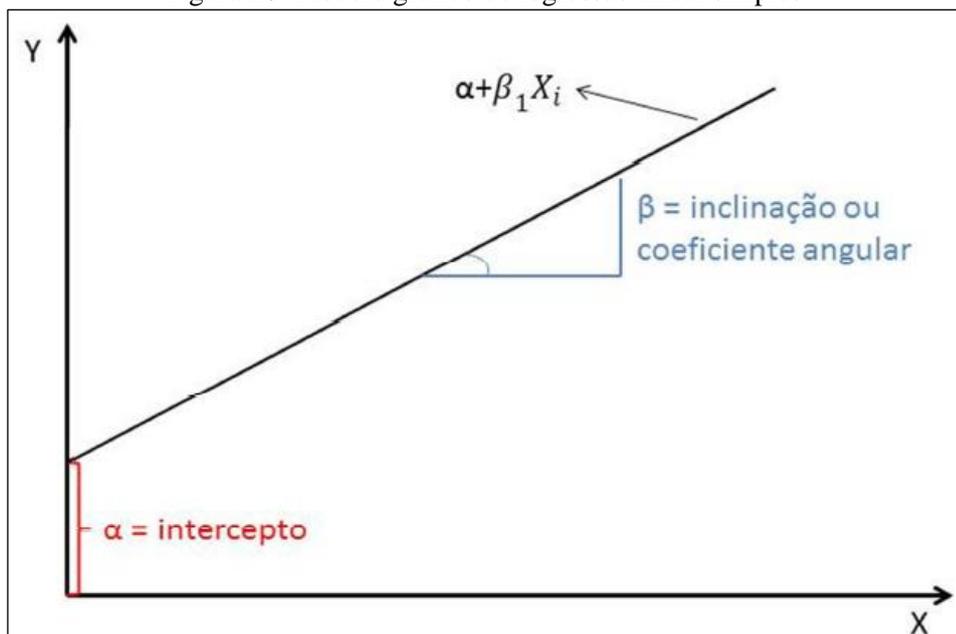
α = intercepto ou a interseção

β = coeficiente angular da reta.

ε = erro associado à distância entre o valor observado (Y) e o correspondente ponto na curva, do modelo proposto, para X.

A representação gráfica da regressão linear pode ser observada na Figura 21.

Figura 20: Modelo gráfico de regressão linear simples.



Fonte: Fávero et al., (2009).

2.4.2.1 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação indica a qualidade do ajustamento, isto é, a proporção da variação explicada pela regressão. Este índice varia no intervalo fechado de 0 à 1, sendo que os valores próximos de 1 são indicativos de adequação do modelo (VIANA; LANZILLOTTI, 2017).

2.4.2.2 Análise de variância (ANOVA)

Análise de variância trata-se de um estudo estatístico, que através do teste de igualdade de médias, se verifica se fatores produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse (PAIVA, 2009). De acordo com Viana e Lanzillotti (2017) a ANOVA consiste de uma tabela que verifica a viabilidade de se utilizar o modelo linear regressivo, ou seja, avaliar se o modelo linear postulado é adequado.

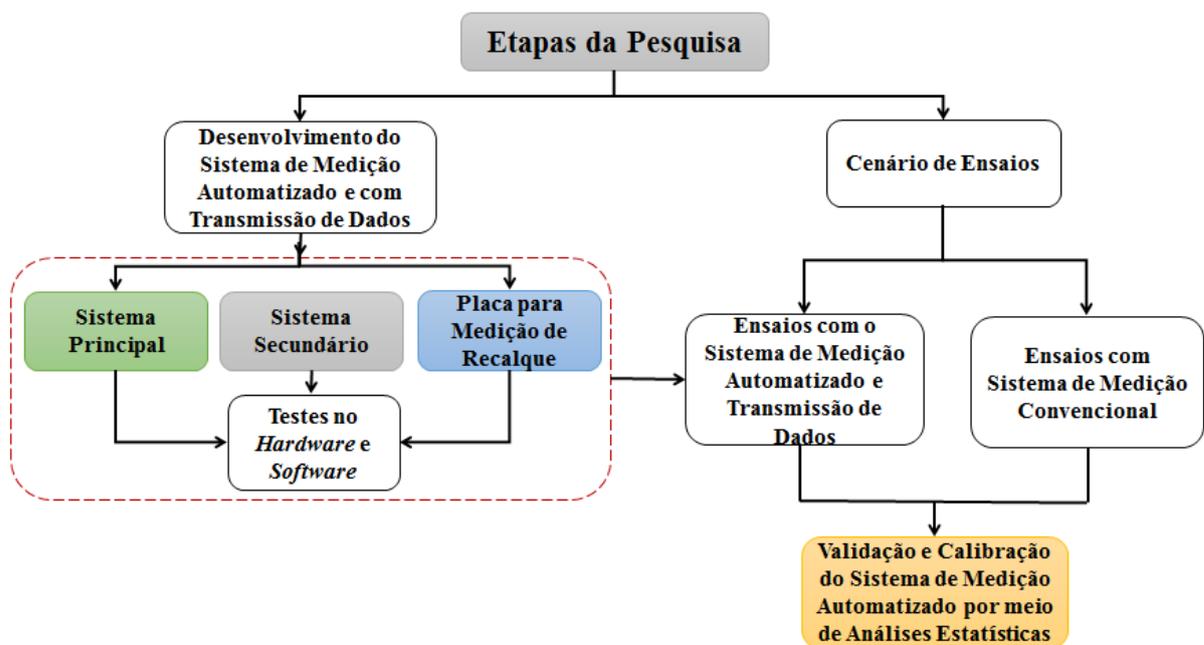
3 METODOLOGIA

Como o desenvolvimento do sistema de medição depende de conhecimentos multidisciplinares, que englobam a geotecnia, a eletrônica, as telecomunicações e a mecânica, foram realizadas parcerias entre os departamentos de engenharia civil, engenharia elétrica e engenharia mecânica da UFCG, através dos Grupos de Geotecnia Ambiental (GGA), Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC) e o laboratório de Mecânica.

Na escolha dos dispositivos eletrônicos, levou-se em consideração o local de aplicabilidade do sistema de medição, no caso, aterro sanitário, verificando nos documentos relativos aos dispositivos, as especificações técnicas, como: frequência de transmissão, sensibilidade, precisão, consumo de energia, torque, entre outros. Além destes condicionantes, considerou-se para a aquisição, o baixo custo dos dispositivos, que podem ser observados no Quadro do Anexo 1 e a facilidade para a compra no mercado nacional.

Para o desenvolvimento deste trabalho seguiram-se as seguintes etapas metodológicas descritas na Figura 22.

Figura 21: Etapas metodológicas da pesquisa.



Fonte: Arquivo da pesquisa.

De acordo com o fluxograma da Figura 22, observa-se na primeira etapa metodológica, que o desenvolvimento do sistema de medição automatizado é dividido em três

etapas de implementação: sistema secundário, sistema principal e placa para medição de recalques. Após a escolha dos dispositivos de *hardware* que são empregados no desenvolvimento de cada etapa de implementação, são realizados testes para a convalidação, verificando o funcionamento de cada componente eletrônico e eletromecânico. No momento da convalidação do *hardware* são utilizados alguns aplicativos de *software*.

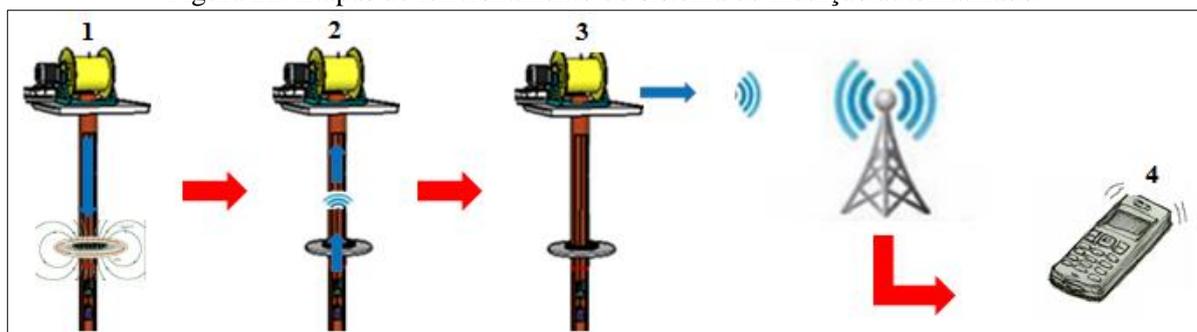
Ao término dos testes de convalidação, o sistema de medição é construído, sendo composto a partir da união das etapas de implementação (sistema secundário, sistema principal e placa para medição de recalques).

Em paralelo ao desenvolvimento do sistema de medição automatizado foi projetado e construído um cenário de ensaios. Nele, foram realizados ensaios de laboratório, para verificar o funcionamento, validação e calibração do sistema de medição automatizado. O cenário de ensaios foi composto por tubo guia e placas magnéticas, que representam o sistema de medição convencional, MMR, utilizado para monitoramento de recalques em profundidade em aterro sanitário.

O funcionamento do sistema de medição automatizado é ilustrado na Figura 23 e é descrito resumidamente da seguinte forma:

- 1) O sistema de medição automatizado após ser acoplado no tubo guia do cenário de ensaios é despertado para iniciar as medições;
- 2) Ao identificar o campo magnético, os sinais codificados de cada placa magnética são enviados para o sistema principal;
- 3) O sistema principal decodifica os sinais e os convertem para distância, enviando posteriormente os dados por GSM;
- 4) O operador cadastrado para recebimento dos dados poderá acessá-los em qualquer lugar que tenha cobertura de telefonia.

Figura 22: Etapas de funcionamento do sistema de medição automatizado.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Posteriormente, são realizadas no cenário de ensaios, medições com o sistema de medição automatizado e convencional, que simulam a aquisição de dados de recalques. As medidas de cada um dos sistemas de medições são analisadas e comparadas com um valor verdadeiro, obtido a partir de uma fita métrica localizada no interior do tubo guia, determinando assim a exatidão, precisão e erros gerados por cada sistema de medição.

Para a validação e calibração do sistema de medição automatizado, são comparadas as medidas obtidas pelos sistemas de medições automatizado e convencional. Neste comparativo, verifica-se por meio de análise estatística, especificamente a estatística descritiva, qual dos sistemas de medições apresenta melhor desempenho.

Para minimizar os erros que são gerados na relação do número de voltas da bobina (ou número de passos do motor) e a quantidade de linha utilizada no descarregamento da bobina, foi utilizada regressão linear simples, para gerar um modelo matemático de ajuste de curva.

Estas etapas metodológicas são detalhas nas seções seguintes.

3.1 Desenvolvimento do Sistema de Medição Automatizado e com Transmissão de Dados

3.1.1 Sistema secundário

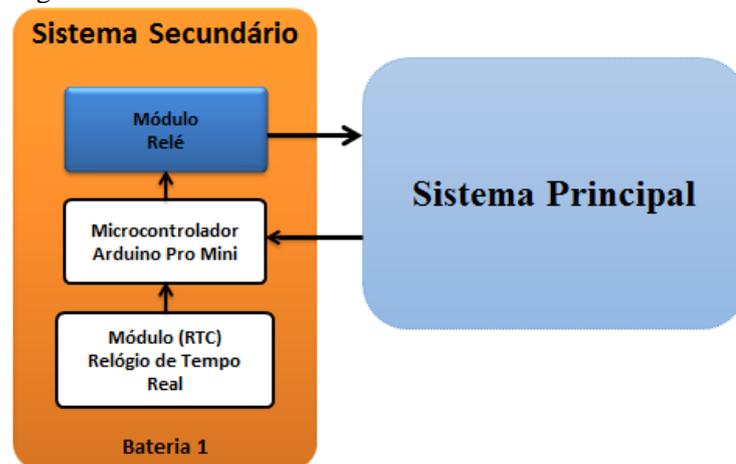
3.1.1.1 *Hardware*

O sistema secundário possui como função principal garantir a periodicidade das medidas através de um alarme que ativa o sistema principal. Este alarme é o módulo *real time Clock* (RTC), programado com datas e horários pré-estabelecidos. Utilizando o RTC é possível assegurar que a contagem de tempo continue mesmo com o desligamento da alimentação do Arduino (em caso de falta de energia, por exemplo), já que o módulo possui uma bateria de *backup*. A bateria que alimenta o circuito secundário é uma bateria de chumbo ácido de 6 V que apresenta autodescarga baixa, ou seja, baixa perda de carga nas baterias quando não estão em uso.

Como o sistema de medição ficará em funcionamento sem interrupções, optou-se em utilizar uma unidade de processamento que demanda baixo consumo de energia. Após receber o comando do módulo RTC, sinalizando que é o dia e a hora de realizar as medições, o microcontrolador do arduíno pró mini, aciona o módulo relé. A escolha do arduino pró mini, está condicionada ao baixo consumo de energia, prolongando o tempo de vida útil do sistema.

O módulo relé funciona como uma chave (interruptor), o qual liga o sistema principal para que o mesmo possa iniciar as suas funções. Após o sistema principal realizar todas as funções que serão, é realizada a comunicação do sistema principal com o microcontrolador do sistema secundário, sinalizando que as atividades foram finalizadas, fazendo que o sistema secundário coloque o sistema principal em modo de hibernação, aguardando o dia e a hora da próxima medição o qual estará programado para realizar, garantindo assim, o baixo consumo de energia do sistema principal. Estas atividades podem ser visualizadas no diagrama em blocos do *hardware*, ilustrado na Figura 24.

Figura 23: Funcionamento do hardware do sistema secundário.

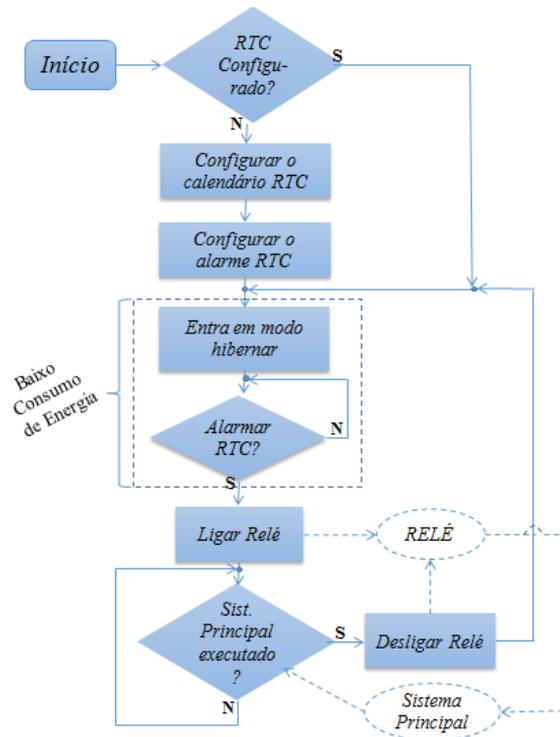


Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.1.1.2 Software

As programações do sistema de medição foram realizadas na interface de desenvolvimento do arduino IDE. A lógica utilizada para o desenvolvimento da programação do sistema secundário está descrita no algoritmo das Figuras 25.

Figura 24: Algoritmo do sistema de secundário.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.1.2 Sistema principal

3.1.2.1 Hardware

O sistema principal possui como funções: realizar as medições de recalques de maneira automatizada, converter o sistema de unidade de medida dos dados e transmiti-los à distância e sem fio para um operador cadastrado. É alimentado por uma bateria de chumbo ácido de 12 V. Como o sistema principal realiza diversas funções, sua unidade de processamento demanda consumo de energia mais elevado, por isso, o sistema secundário realiza o controle de acionar o sistema principal e o coloca no modo de hibernação no final de suas atividades, para economizar a energia.

O microcontrolador do arduíno UNO do sistema principal controla de maneira automatizada o motor de passo que fica acoplado a uma carretilha. Através desse controle, a carretilha libera a linha o qual a placa para medição de recalques está fixada, que desliza pelo interior do tubo guia.

Ao iniciar a descida da placa para medição de recalques, uma chave fim de curso localizada no início do orifício de encaixe do sistema de medição é acionada, sendo considerado o marco de referencia inicial de medida.

Após a detecção do campo magnético das placas magnéticas, os sinais são codificados e transmitidos por ondas de rádio (AM), para a unidade de processamento do sistema principal, que decodifica o sinal e computa a quantidade de passos do motor que foram necessárias para detectar o início e o fim do campo magnético de cada placa magnética.

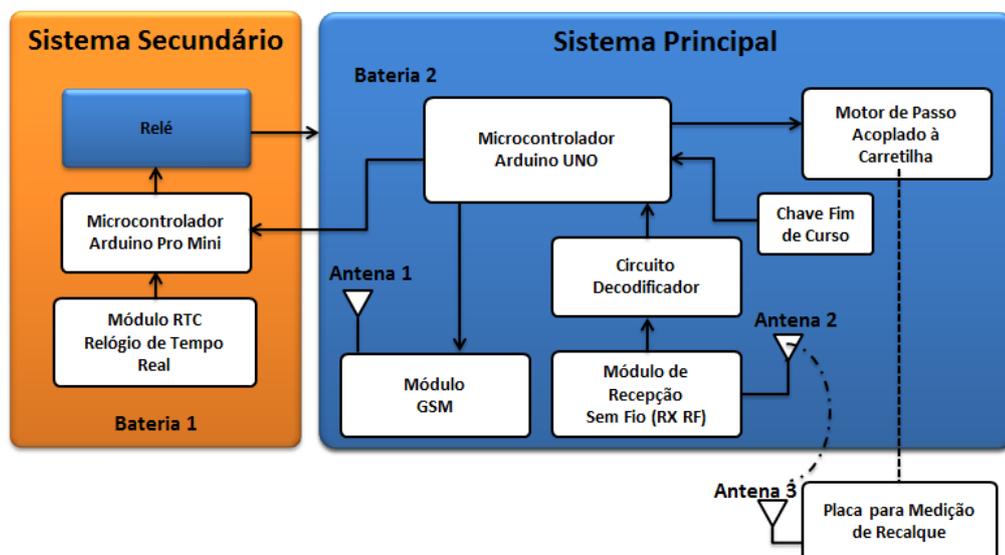
Através do software, calcula-se a média do início e do fim do campo magnético e a quantidade de passos do motor que é dada em graus, será convertida para milímetros, identificando assim, a localização de cada placa magnética no interior do maciço de RSU.

Após a conversão das unidades, o dado é transmitido por um módulo GSM presente no sistema principal, para pessoas cadastradas para recebê-los via computador ou telefone.

Ao término do envio da localização de cada placa magnética, é enviado ao sistema principal um comando que aciona a carretilha no sentido contrário, recolhendo a linha, que ao chegar na chave fim de curso, sinaliza ao microcontrolador do sistema principal que as atividades foram finalizadas.

O microcontrolador do sistema principal informa ao microcontrolador do sistema secundário, que as atividades foram finalizadas e que já está preparado para iniciar o modo de hibernação. As atividades estão apresentadas no diagrama em blocos do *hardware* do sistema principal, da Figura 26.

Figura 25: Funcionamento do hardware do sistema principal.

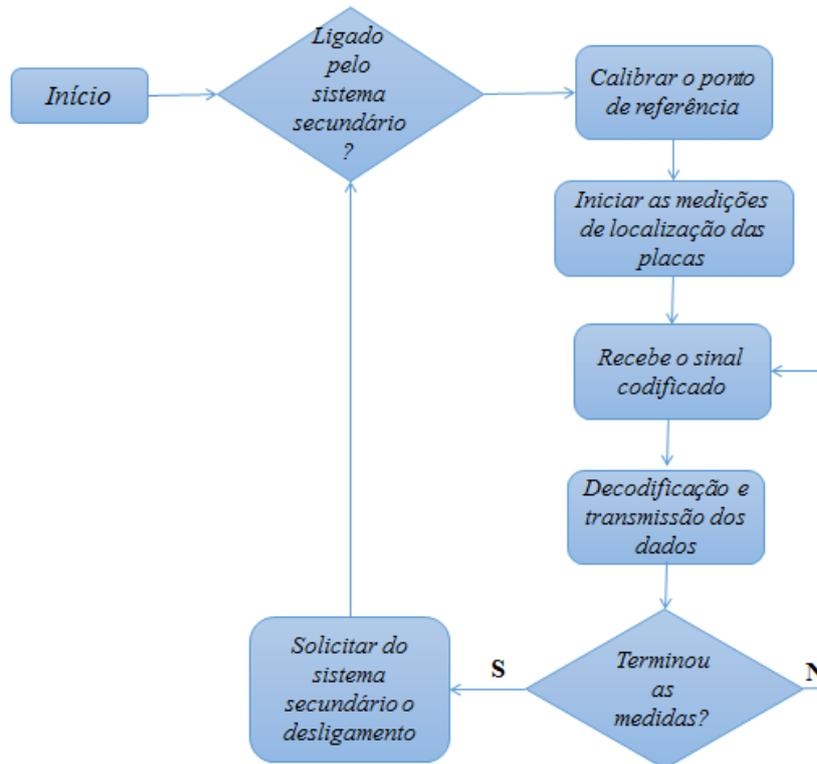


Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.1.2.2 Software

A lógica de programação utilizada para desenvolver o sistema principal está representada no algoritmo da Figura 27.

Figura 26: Algoritmo do sistema principal.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.1.3 Placa para medição de recalques

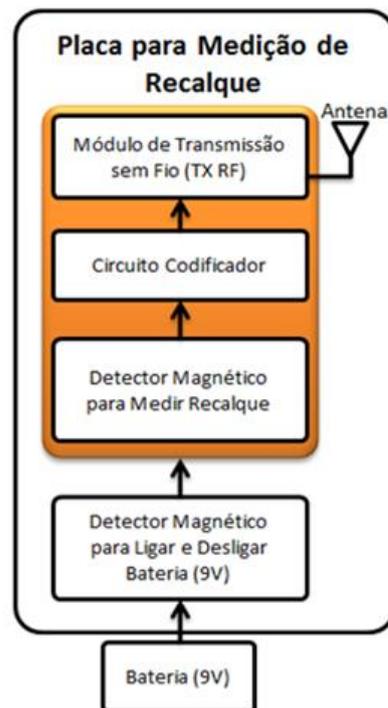
A placa para medição de recalques foi idealizada para detectar o início e o final do campo magnético, codificar a detecção de cada placa magnética distribuída ao longo da profundidade e transmitir o sinal por ondas de rádio (AM) para o sistema principal. O circuito é dotado de sensores que além de detectarem o campo magnético, também servirão de chaves para ligar o circuito na presença do campo magnético e desligar o circuito na ausência do campo magnético, conservando assim o tempo de carga da bateria que o carrega. Para este trabalho, foram selecionados os sensores *reed-switch*.

É fixada por uma linha, controlada pela carretilha que fica acoplada ao motor de passo no sistema principal. Ao finalizar a detecção do campo magnético das placas, a linha é

bobinada no sentido de subida, até encontrar a chave fim de curso, indicando que a placa está novamente localizada no marco inicial de referência e posicionada para a próxima leitura.

O *layout* da placa de circuito impresso (PCI) foi projetado baseado nas dimensões de um tubo guia com diâmetro de 0,50 m. A descrição do seu hardware pode ser observada no diagrama em blocos da Figura 28.

Figura 27: Funcionamento da placa para medição de recalques.



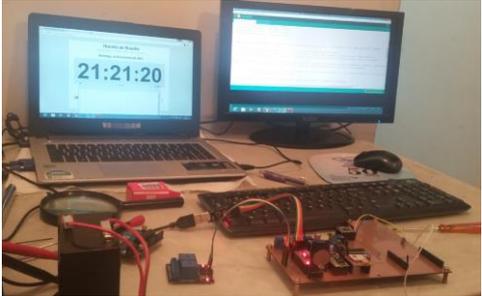
Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.2 Testes no *Hardware* e no *Software* do Sistema de Medição

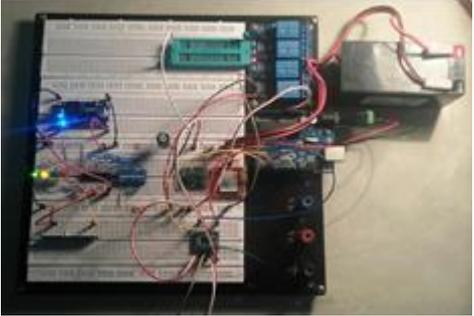
Antes de confeccionar a placa de circuito impresso (PCI), o *hardware* do sistema de medição é montado em *protoboard*, uma placa de circuitos própria para testes. O *hardware* é documentado a partir do desenvolvimento dos esquemáticos dos circuitos, utilizando a plataforma *fritzing* e somente após a finalização dos testes os esquemáticos são transferidos para a plataforma *eagle*, para a confecção da PCI.

No primeiro momento são realizados testes e ajustes nos dispositivos do *hardware*, analisando o funcionamento de acordo com as especificações técnicas. Alguns dos dispositivos são ensaiados concomitantemente ao *software*. No Quadro 7 são descritos alguns desses testes realizados em etapas.

Quadro 7: Testes nos dispositivos de hardware e aplicativos de software do sistema de medição.

| Etapas | Testes | Imagens |
|---|--|---|
| Sistema Secundário | <ul style="list-style-type: none"> • Teste com o módulo RTC: programa-se a data e a hora para acionar o sistema secundário. No tempo pré-estabelecido na programação, emite-se um sinal luminoso, de um led (<i>light emitting diode</i>) indicando o início de funcionamento do sistema; • Teste do funcionamento de todo o sistema secundário: é verificado o acionamento do módulo relé, o acionamento do sistema principal no tempo pré-estabelecido e a execução do modo de hibernação do sistema principal. |  |
| Linha liberada pela carretilha que segura a Placa para Medição de Recalques | <ul style="list-style-type: none"> • Teste com a linha multifilamento: verifica-se a capacidade da linha de suportar o peso da placa, sem deformar ao ponto de interferir nas leituras. São acrescentados vários pesos de chumbo, que variam entre 25 g à 200 g, em uma das extremidades da linha e verifica-se com uma régua milimetrada, se houve deformação da linha. Cabe ressaltar, que a placa para medição de recalques e a bateria que estarão fixos em uma das extremidades da linha, pesam aproximadamente 65,5 g. Este teste é realizado junto ao teste do torque do motor, que será explanado abaixo. |  |
| Baterias | <ul style="list-style-type: none"> • São realizados testes para verificar o funcionamento das baterias que alimentam o sistema principal e o sistema secundário. |  |

| | | |
|--------------------------|--|--|
| <p>Motor de Passo</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Teste para verificação da exatidão do passo do motor: é encaixado um disco com marcação de 0° à 360° no orifício de saída do motor de passo. Programa-se o motor de passo para funcionar com valores aleatórios, variando entre 0 à 200 passos, e verifica visualmente se a quantidade de passos correspondem ao ângulo esperado; • Teste para averiguar se o motor possui torque suficiente para segurar a placa para medição de recalques: são fixados para cada teste, chumbos que variam entre 20 g, 50 g e 200g. Programa-se o motor de passo para carregar e descarregar a bobina da carretilha, verificando se o torque do motor indicado no <i>datasheet</i> segue as especificações; • Ajustes no acoplamento do motor com a carretilha, para garantir que não ocorra trepidação na carretilha, ao acionar o motor. |  |
| <p>Carretilha</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ajuste na carretilha: a carretilha adquirida comercialmente é uma carretilha de pesca, e sua relação de voltas entre a manivela e a bobina é de 3.8:1. Como a determinação da localização da placa magnética no interior do maciço de RSU depende da relação de voltas da bobina, a carretilha foi ajustada para uma relação 1:1, que significa que cada volta na bobina, corresponde a uma volta na manivela que é acoplada ao motor de passo. • Teste para verificar a distribuição da linha no carretel: é analisada a uniformidade da distribuição da linha, da carretilha escolhida para a pesquisa. |  |
| <p>Sistema Principal</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Teste com o microcontrolador e o motor de passo: verifica-se com o software o comando de início e parada do motor de passo. • Teste com a chave fim de curso: é verificado o comando de início e | |

| | | |
|--|--|--|
| | <p>finalização de medição com a placa para medição de recalques;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teste com o módulo de recepção (RX): neste teste, um operador em posse do TX afasta-se 25 m do receptor (RX) e verifica se há transmissão, através de uma emissão luminosa, que permanece acesa para indicar que está ocorrendo a comunicação e desliga quando não há comunicação entre o transmissor e o receptor; • Teste de transmissão com módulo GSM: é cadastrado na programação um número de telefone de um operador e é verificado se existe a comunicação, através do envio de uma mensagem do módulo GSM para o operador cadastrado, através de mensagem de texto. |   |
| <p>Placa para Medição de Recalques</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Teste com os sensores: o sensor que detecta o campo magnético funciona como uma chave e quando o campo magnético é detectado por ele, um sinal luminoso é acionado e na ausência do campo magnético o sinal luminoso é apagado; • Teste de transmissão (TX): é o mesmo teste citado no RX do sistema principal; • Teste na bateria: Realizou-se uma adaptação na bateria de 9 V, o qual foi retirada a película metálica que a revestia, para a bateria não ser atraída pelo imã das placas magnéticas, no momento das medições. | |



Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.3 Construção do Cenário de Ensaio

Para validar e calibrar o sistema de medição automatizado foi desenvolvido um cenário de ensaio em laboratório, constituído de um suporte, para fixação do tubo guia que também o constitui, placas magnéticas e fita métrica.

O sistema de medição automatizado poderá ser acoplado no tubo guia, para a realização dos ensaios. O ensaio com o sistema de medição convencional acontece a partir da inserção da sonda que detecta o campo magnético da placa composta por imã, no tubo guia do cenário de ensaios, que foi construído na seguinte forma:

Suporte (estrutura) do cenário: Trata-se de um suporte que, além de equilibrar o tubo guia em seu interior o protege, para que as medidas não sofram influências externas, que possam afetar negativamente a exatidão e a precisão das medições. O material escolhido para sua construção é a madeira compensada revestida, de 0,02 m de espessura. Suas dimensões são de 1,6 m de altura por 0,30 m de largura. Essas dimensões foram sugeridas para facilitar o acoplamento do novo sistema de medição, que fica na parte superior do tubo guia e a visualização dos ensaios.

Tubo guia: No monitoramento em campo, este tubo é inserido no sentido vertical no interior da massa de RSU. Para o cenário de ensaios, optou-se pelo uso do material em PVC,

com diâmetro de 0,05 m. Em aterros sanitários, o material dos tubos guias apresentam maior resistência, com a função de resistir à impactos e temperaturas elevadas. Na parte frontal do tubo guia, efetua-se um corte transversal de 0,04 m de largura por 1,5 m de altura, para viabilizar a fixação de uma fita métrica de 1,5 m no interior do tubo guia. A função desta fita métrica nos ensaios é garantir a aferição de forma visual das medidas de localização das placas magnéticas, obtendo um valor verdadeiro “conhecido” para realização dos ensaios.

Placas magnéticas: Para o cenário de ensaios, idealizou-se placas mais leves, em madeira de 0,01 m de espessura e o diâmetro de 0,2 m. Os ímãs (de ferrite, com direção de magnetização axial) são fixados no centro dos discos, possuindo orifícios centrais, para deslizarem pelo tubo guia. Para sustentar as placas magnéticas, utilizam-se três cabos de nylon esticados verticalmente, que passam por três furos realizados nas extremidades dos discos, sendo fixados com grampos que permitem regular a altura das placas magnéticas.

O cenário de ensaios pode ser observado na Figura 29.

Figura 28: Cenário para ensaios.



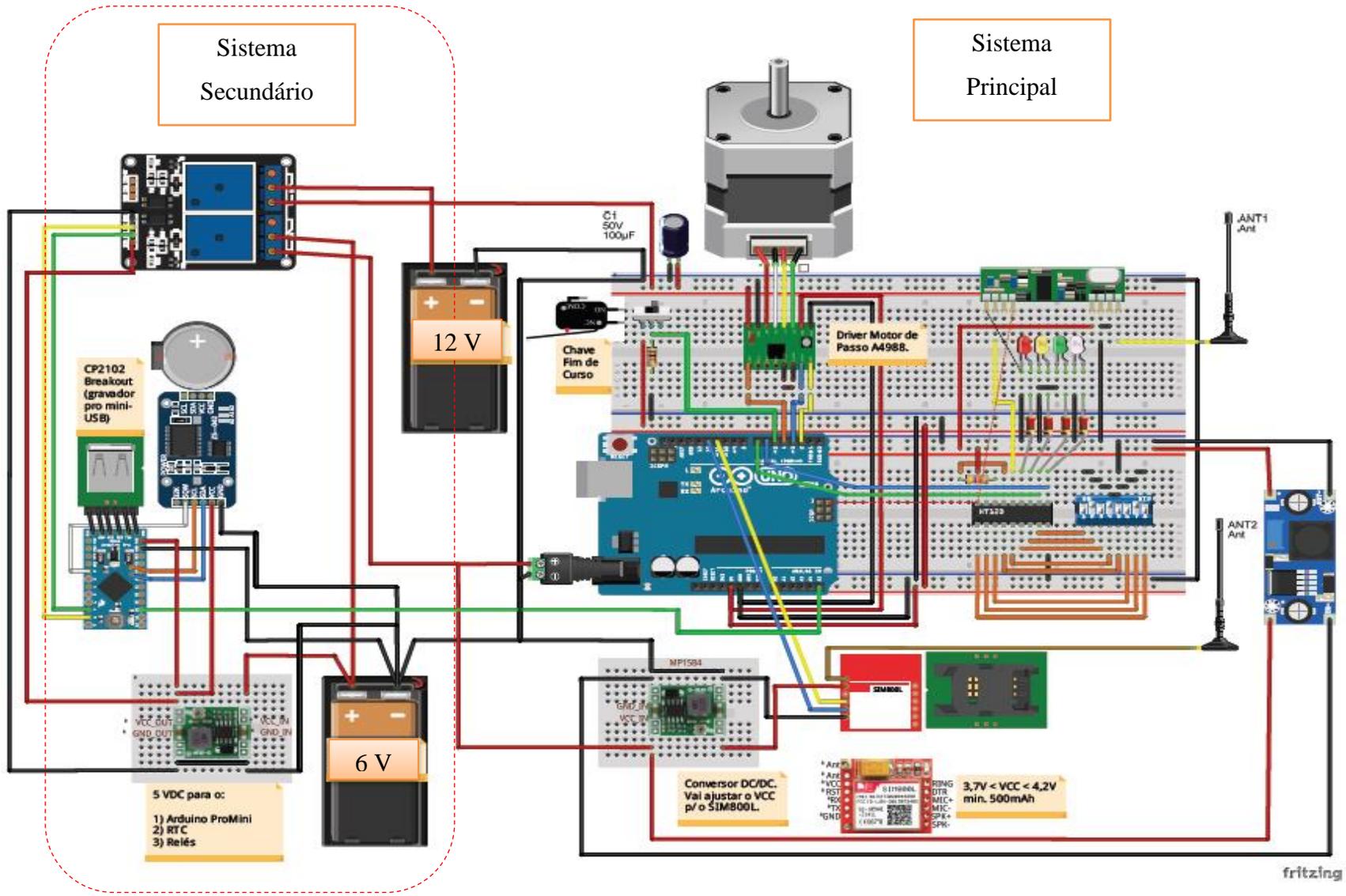
Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.4 Montagem do Sistema de Medição

Após a realização dos testes e ajustes, foi iniciado o processo de união das implementações entre o sistema secundário, sistema principal e placa para medição de

recalques, incluindo os desenvolvimentos das placas de circuito impresso e o acondicionamento do sistema de medição. O esquemático do *hardware* desenvolvido para o sistema principal e para o sistema secundário pode ser observado na Figura 30.

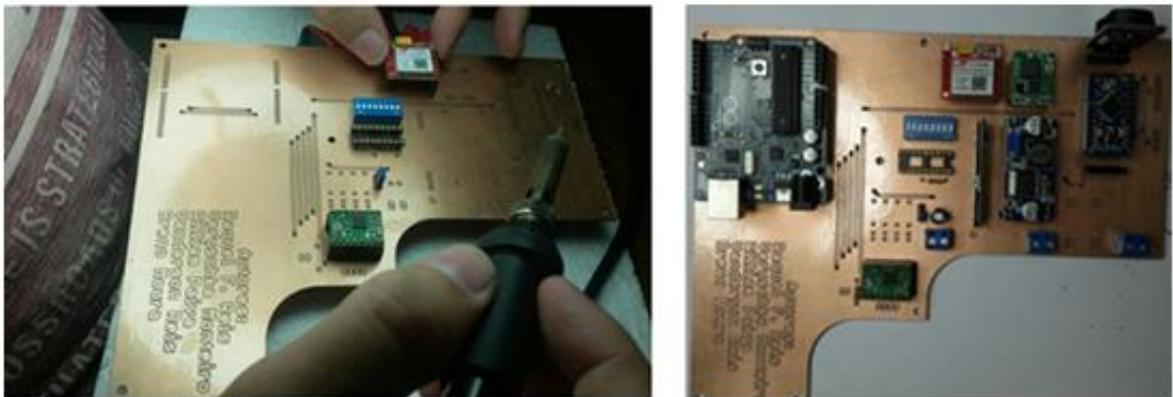
Figura 29: Esquemático do hardware do sistema principal e do sistema secundário.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

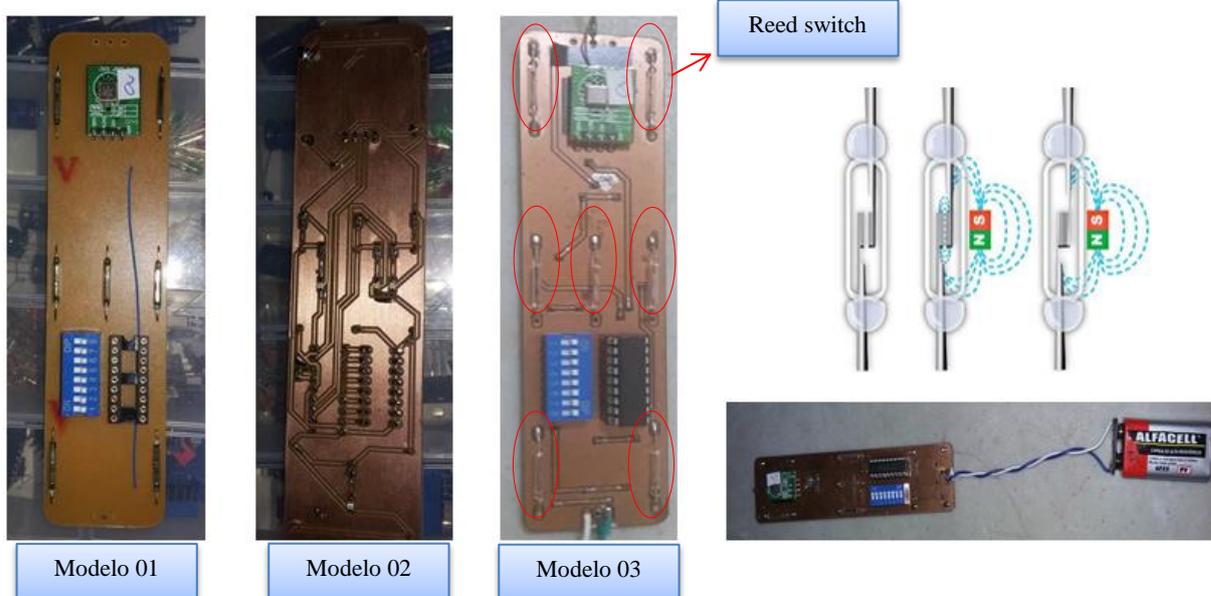
As PCI's foram confeccionadas no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científica da UFCG. A placa do sistema principal e secundário foi desenvolvida com o *layout* apropriado para as dimensões da caixa de acondicionamento do sistema de medição e a placa para medição de recalques foi desenvolvida com o *layout* apropriado para deslizar internamente pelo tubo guia localizado no interior do maciço. Antes de soldar os dispositivos, as placas receberam um tratamento de proteção, permitindo assim prolongar o tempo de vida útil dos circuitos e dos dispositivos eletrônicos, evitando corrosão. Nas Figuras 31 e 32, podem ser observadas as placas no processo de confecção e acabamento.

Figura 30: PCI do sistema principal e secundário.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Figura 31: PCI da placa para medição de recalques.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Como pode ser observado na Figura 32, foram propostos alguns modelos, até a escolha da versão final. No modelo 3 estão destacados 7 sensores de identificação do campo magnético, os sensores das extremidades superiores e inferiores possuem como função ligar e desligar o circuito, servindo como um interruptor da placa. Os dois sensores centrais realizam as medições do início e do fim do campo magnético de cada placa magnéticas localizada no interior do maciço de RSU.

Ainda na Figura 32, atenta-se para as posições que os sensores (*reed switch*) foram soldados na PCI. Estas posições só foram definidas após o estudo de direções de magnetização dos ímãs que são geralmente utilizados para este tipo de metodologia. Neste caso os ímãs de anel axial de ferrite e o disco axial de neodímio.

Para o teste de transmissão do sinal por rádio frequência entre a placa para medição de recalques e o sistema principal, foi ensaiada a transmissão para uma distância de 30 m, embora que no documento técnico do RX e TX utilizados neste trabalho, essa transmissão possa ocorrer para até 100 m. Como as dimensões dos aterros sanitários variam de acordo com os locais de implantação, as alturas dos maciços podem variar, por isso, as PCI's foram projetadas com a opção de instalação de antenas, para garantir a melhoria de transmissão, caso a altura do aterro sanitário chegue a proporções maiores que 30 m.

3.4.1 Acondicionamento e montagem do *hardware*

A caixa que condiciona o sistema de medição (Figura 33) foi adaptada para ser acoplada ao tubo guia do cenário para ensaios. Optou-se por uma caixa metálica e resistente, com dimensões de 0,40 x 0,40 m de base e 0,15 m de altura. Seu sistema de fechamento possui uma borracha para vedação, evitando a infiltração de fluidos em seu interior, preservando assim os dispositivos do *hardware*. No centro da base foi feito um orifício, para o acoplamento e o acesso ao tubo guia.

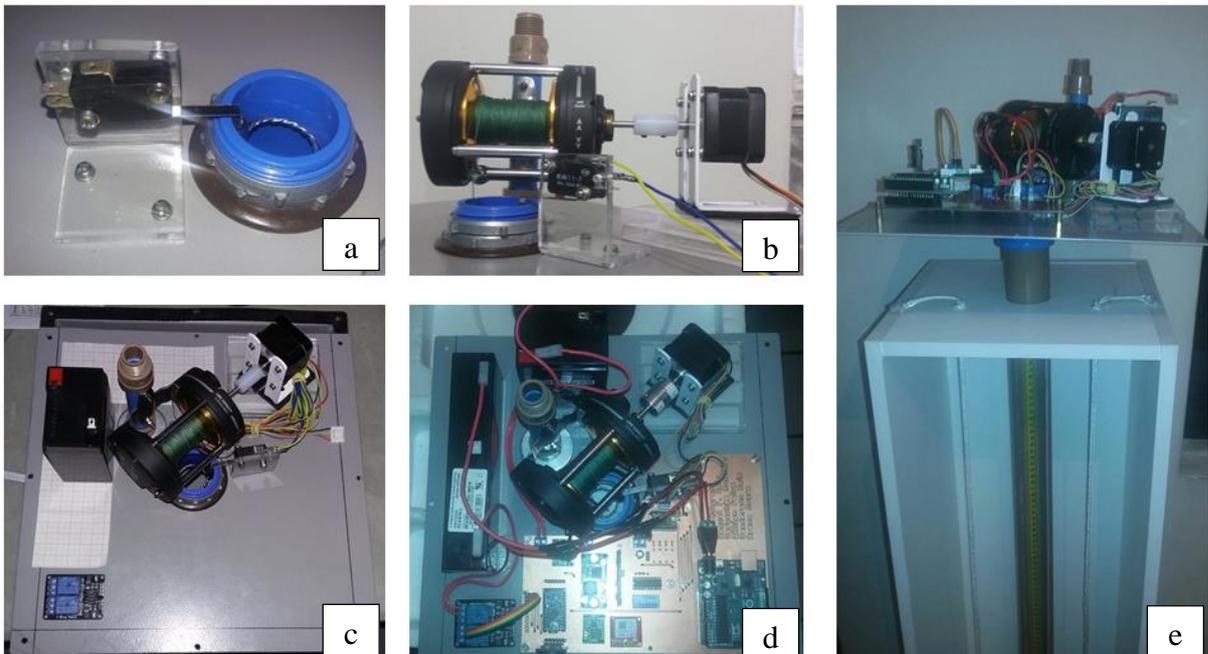
Figura 32: Caixa do sistema de medição.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Na Figura 34 são apresentadas algumas etapas finais de montagem do *hardware* na caixa de acondicionamento.

Figura 33: Montagem do hardware.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

É ilustrado na Figura 34 a, o posicionamento da chave fim de curso no orifício central da caixa. Esta etapa é muito importante, pois este é um dos marcos de referência das medições e a exatidão da medida dependerá do acionamento correto desta chave. No sistema de medição convencional, o marco de referência das leituras fica sempre na base do tubo, que é indeslocável (AFFONSO, 2004). No caso do sistema de medição automatizado, podem ser utilizados os marcos de referência da chave fim de curso e do ímã de referência da base, proporcionando a análise dos dois pontos.

Nas Figuras 34 b e c, estão ilustradas as localizações do motor e da carretilha dentro da caixa. Observa-se que a carretilha está sobreposta ao orifício central, e a linha que segura a placa para medição de recalques terá acesso pelo orifício.

A configuração final do sistema principal e secundário pode ser observada nas Figuras 34 d e 34 e.

3.4.2 Localização da placa magnética

A localização da placa magnética no interior do maciço sanitário é determinada a partir da quantidade de passos que o motor precisou efetuar entre o marco de referência e o campo magnético. Entretanto, o campo magnético possui uma amplitude, que pode variar em função de vários fatores, como: direções de magnetização, posição, classificação e temperatura.

Para minimizar o erro gerado pela amplitude do campo, aproximando o valor medido do valor verdadeiro da localização da placa magnética, foi inserida na programação do sistema de medição automatizado a Equação 2.

$$DPM = N1 + \frac{(N2 - N1)}{2} \cdot (P) \quad (2)$$

Onde:

DPM = Distância da Placa Magnética.

N1 = Quantidade de passos até o início do campo magnético.

N2 = Quantidade de passos até o final do campo magnético

P = Número de Passos

A placa para medição de recalques detecta o início e o final do campo magnético do ímã de cada placa distribuída ao longo da profundidade. Posteriormente, envia o sinal

codificado da detecção para a unidade de processamento do sistema principal, que decodifica os sinais e aplica a Equação 2, resultando na distância de localização da placa em relação ao marco de referência.

Para converter a quantidade de passos para distância em milímetros, foi realizado um ensaio com a linha e o motor de passo. Programou-se o sistema de medição para efetuar 10 passos no motor, no sentido de descarregamento da linha (para o descarregamento da linha, utiliza-se o sinal negativo na programação e para o carregamento o sinal positivo). A bobina da carretilha foi carregada sem sobreposição de linha, para não gerar erros em relação à quantidade de passo. Em seguida, foi medido quanto de linha foi descarregada em função dos 10 passos do motor, e verificou-se que 1 passo equivale à 0,5824 mm.

3.5 Ensaio com o Sistema de Medição Automatizado e com Transmissão de Dados

Após a realização dos testes no *hardware* e no *software*, acopla-se o novo sistema de medição no cenário de ensaios. A placa magnética foi alocada à 0,70 m a partir da chave fim de curso que fica na parte superior do tubo guia. Esta localização da placa é aferida com a fita métrica fixada no interior do tubo guia.

Programa-se o RTC para inicializar o sistema de medição, conforme o horário pré-estabelecido, repetindo as medições a cada 10 minutos, 3 vezes consecutivas.

O objetivo deste ensaio é verificar a exatidão e a precisão do sistema de medição em relação ao valor verdadeiro, obtido pela fita métrica.

3.6 Ensaio com o Sistema de Medição Convencional

O sistema de medição convencional para medir recalques em profundidade que foi analisado, pertence ao Grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG. Este grupo de pesquisa realiza monitoramento em células experimentais de RSU, localizadas no campus da UFCG e monitora o aterro sanitário em Campina Grande – PB desde o ano de 2016 até a presente data.

O sistema de medição foi desenvolvido pelo próprio grupo de pesquisa e é baseado em sistemas de medições comerciais. É constituído de um cabo graduado, de 30 m de extensão, possuindo em uma de suas extremidades uma sonda que possui um sensor que detecta o campo magnético e em outra extremidade um equipamento que após a detecção do campo magnético, emite um sinal luminoso e sonoro.

Cabe ressaltar, que os sensores utilizados na detecção do campo magnético dos dois sistemas de medições é o *reed-switch*, com as mesmas especificações técnicas. A inserção da sonda no interior do tubo guia ocorre manualmente com o auxílio de um operador habilitado para realizar da atividade. O sistema de medição convencional, pode ser observado na Figura 35.

Figura 34: Sistema convencional de medição de recalques em profundidade.



Fonte: Grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG (2018).

3.6.1 Metodologia do ensaio com o sistema de medição convencional

Para analisar o sistema de medição convencional e, posteriormente, realizar a comparação com o sistema de medição proposto neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia de ensaio, seguindo os seguintes procedimentos:

- 1) Selecionam-se cinco pessoas (operadores), que usualmente realizam o monitoramento com o sistema de medição convencional;
- 2) Aloca-se a placa magnética a uma altura de 0,70 m do marco de referência localizado na parte superior do tubo guia do cenário de ensaios. A medida de localização da placa magnética é aferida com a fita métrica fixada no interior do tubo guia;
- 3) Lacra-se o tubo guia, para que os operadores não visualizem a localização da placa a partir da fita métrica do interior do tubo;
- 4) Cada operador realiza três medições com o sistema convencional, de maneira individual, sem que os operadores mantenham contato uns com os outros. Os dados coletados por cada operador são armazenados para análises.

Partes da realização do ensaio podem ser visualizadas na Figura 36.

Figura 35: Ensaio com o sistema de medição convencional.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

3.7 Calibração e Validação do sistema de medição automatizado

A calibração e a validação do novo sistema de medição são baseadas em cálculos da estatística descritiva e regressão linear simples.

No primeiro momento é comparado o valor medido por cada sistema de medição ao valor verdadeiro obtido pela fita métrica fixada no interior do tubo guia. Cabe ressaltar que as variáveis de estudo geradas nestas medidas são quantitativas contínuas.

Posteriormente, é realizado o comparativo entre os sistemas de medições, a partir de estimativas, como: a média e o coeficiente de variação, para verificar a exatidão e a precisão dos dados. Além disso, é analisado e comparado o tempo necessário para realizar as medidas.

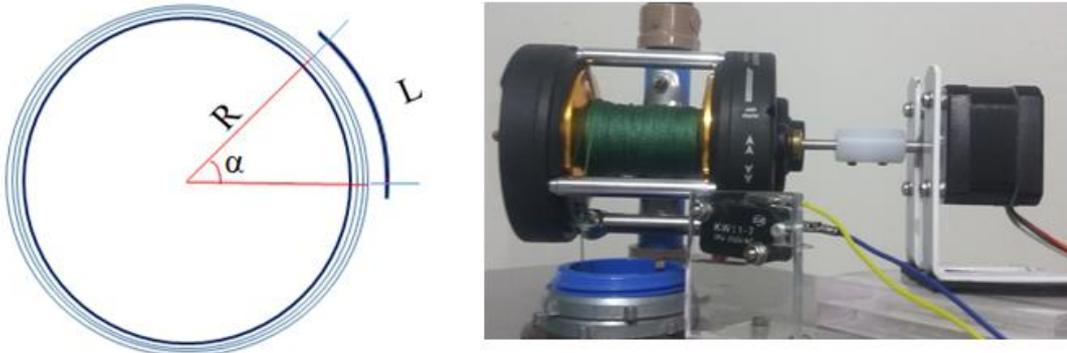
Geralmente, para analisar os dados obtidos no monitoramento dos recalques, a unidade de medida utilizada é o milímetro. Por isso, no comparativo dos sistemas de medições e nas análises dos próprios sistemas de medições automatizado e convencional, os dados são analisados na ordem de milímetros.

3.7.1 Relação número de passos do motor e descarregamento da linha

O sistema de medição automatizado utiliza como um de seus dispositivos mecânicos, uma carretilha. Dependendo da configuração da bobina da carretilha, do mecanismo de distribuição da linha na bobina e do tipo de linha utilizada na bobinagem, ocorrem

modificações dinâmicas no raio, ao carregar ou descarregar a bobina. Esta relação pode ser observada na Figura 37.

Figura 36: Modificações dinâmicas no raio.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Como a localização da placa magnética no interior do maciço é baseada na quantidade de passos que o motor efetuou até a detecção do campo magnético e essa quantidade de passos depende do descarregamento da linha, é necessário realizar a calibração do sistema de medição devido a esta relação de voltas, reduzindo assim este erro sistemático.

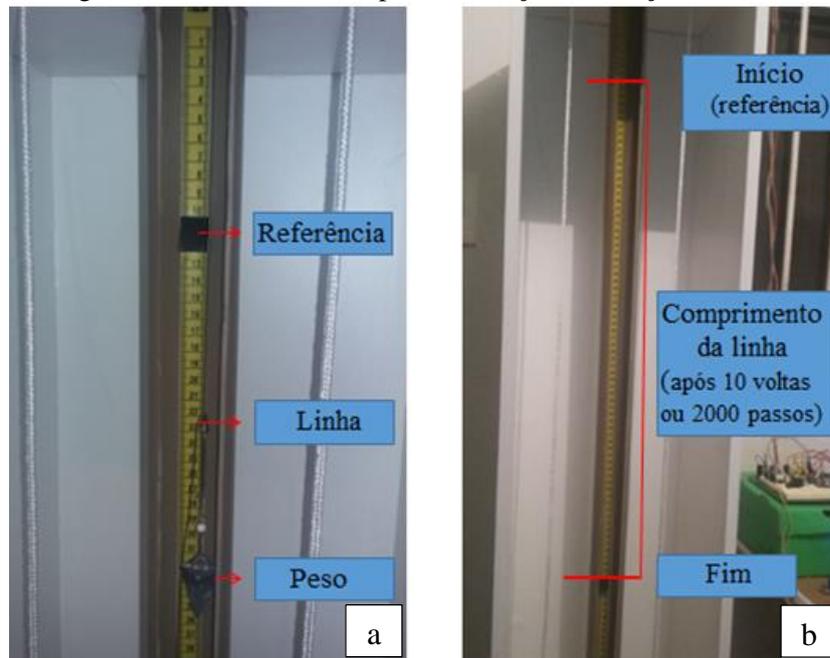
Para a coleta dos dados, segue-se a seguinte metodologia:

- 1) Acopla-se o sistema de medição no cenário de ensaios;
- 2) O motor de passo é programado para realizar 10 voltas completas na bobina da carretilha, no sentido de descarregamento da linha. Cabe ressaltar que 1 volta, equivale a 200 passos e um passo equivale a $1,8^\circ$;
- 3) É delimitada na linha que segura a placa para medição de recalques, um ponto de referência inicial;
- 4) Fixa-se um chumbo, com aproximadamente o peso da placa para medição de recalques na extremidade da linha, para deixá-la esticada e não prejudicar a leitura;
- 5) Após a bobina realizar as 10 voltas verificam-se visualmente na fita métrica fixada no interior do tubo guia, qual o comprimento da linha descarregada neste intervalo e posiciona-se novamente a referência.

Ao realizar 350 voltas, para varrer todos os 25 m de altura definidos para as análises estatísticas, evitando assim a extrapolação no modelo de regressão linear simples, a bobina é novamente carregada e o ensaio é novamente iniciado. O procedimento é realizado 3500

vezes, sendo dividido em 10 ensaios de 350 voltas cada. Parte da metodologia pode ser verificada na Figura 38.

Figura 37: Coleta de dados para calibração da relação de voltas.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Na Figura 38 a está ilustrado o peso utilizado para manter a linha tracionada, a referência, para verificar na fita métrica, após a quantidade de voltas (ou passos) o quanto foi descarregado de linha e a linha utilizada. Na Figura 38 b, está representado como foi a obtido a aquisição dos dados.

Para relacionar o número de voltas da bobina com o comprimento da linha no descarregamento, foi utilizado modelo de regressão linear simples. A equação gerada na regressão poderá ser utilizada no tratamento dos dados, minimizando os erros a partir da determinação da quantidade de linha descarregada, em função do número de passos.

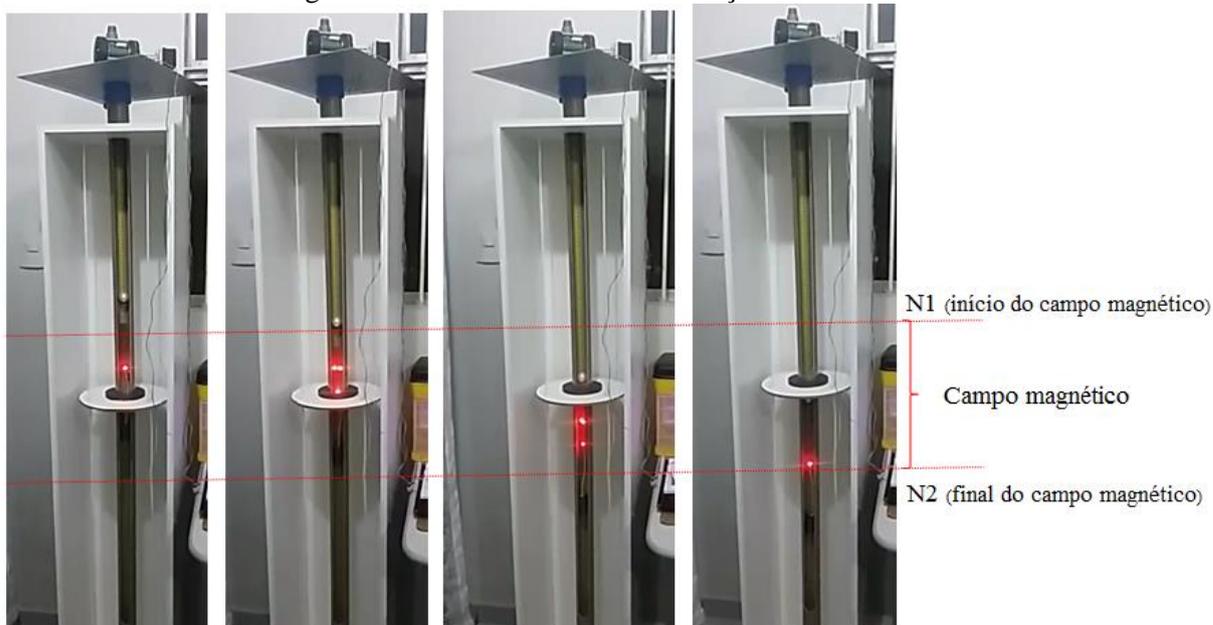
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados inerentes ao desenvolvimento do sistema de medição proposto neste trabalho, assim como as calibrações e validações, que foram realizadas em laboratório, com o auxílio de um cenário para ensaios.

4.1 Ensaio com sistema de medição automatizado e com transmissão de dados

Após a montagem dos dispositivos de *hardware* e a finalização dos aplicativos de *software*, foi ensaiado o funcionamento do sistema de medição automatizado (Figura 39).

Figura 38: Ensaio do sistema de medição automatizado.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Conforme citado, a película metálica da bateria que alimenta o circuito da placa de medição de recalques foi retirada, para evitar ser atraída pelo campo magnético. Ao iniciar o ensaio do sistema de medição, a bateria sem a película não foi atraída pelo ímã da placa magnética e permaneceu realizando as medidas sem interferências.

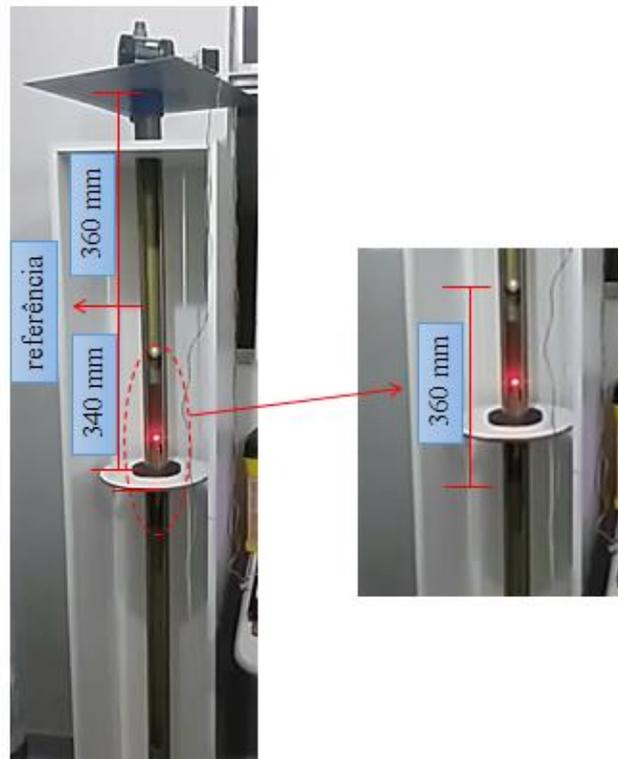
O sistema de medição detectou o início e o final do campo magnético da placa. Embora Affonso (2004) mencione que na coleta dos dados com o sistema de medição convencional, o operador pode analisar os dados da leitura superior (início do campo magnético), inferior (final do campo magnético) ou da média das duas leituras, optou-se no

desenvolvimento deste trabalho em analisar os dados a partir da média do campo magnético, utilizando a Equação 2. Essa escolha baseou-se na carência de informações inerentes ao comportamento da amplitude do campo magnético no interior de maciços de RSU. Outro fator que foi levado em consideração, foi a possibilidade de instalação de placas magnéticas e aranhas no mesmo tubo guia, que podem apresentar ímãs com endereçamentos magnéticos distintos.

A localização da placa magnética foi visualizada pela fita métrica antes da realização do ensaio a 0,70 m após a chave fim de curso. Entretanto, na hora da realização do ensaio, o valor da distância de 0,36 m (que se refere ao comprimento da placa para medição de recalques e a bateria) não foi considerada, resultando numa altura de localização da placa magnética de 0,34 m da nova referência (Figura 40). Este valor de 0,36 m é adicionado ao valor final medido (valor medido + 360 mm).

Como os recalques são geralmente analisados na ordem de milímetros, para validar o sistema de medição proposto neste trabalho, as medidas que estavam na grandeza metros foram convertidas para milímetros. Tedeschi et al., (2017) em seu trabalho, adotou o milímetro como unidade de medida para validar um sistema de medição automatizando nível digital para medir recalques.

Figura 39: Altura de referência do ensaio.



Fonte: Arquivo da Pesquisa

Neste ensaio, o sistema de medição automatizado detectou o início e o final do campo magnético, codificou e transmitiu os sinais para o sistema principal, que os recebeu e os decodificou, convertendo posteriormente a quantidade de passos do motor, para unidade de milímetros, resultando assim, na localização da placa magnética, conforme a Figura 41.

Figura 40: Dados de saída da localização da placa magnética.

The screenshot shows a serial monitor window titled 'COM5 (Arduino/Genuino Uno)'. The text displayed is as follows:

```

Numero de passos no inicio do Campo Magnetico:
-405
Numero de passos no fim do Campo Magnetico:
-829
Numero de passos durante o Campo Magnetico:
-424
O valor da distancia em [mm]
-359.402496
  
```

The last line, '-359.402496', is enclosed in a red dashed box.

Fonte: Arquivo da Pesquisa

O valor observado na leitura do ensaio foi de 359,40 mm (0,35 m), somando este valor à medida inicial antes da referência, obtêm-se um valor final de 719,40 mm (360 mm + 359,40 mm).

O erro absoluto apresentado nas medidas é de 19,40 mm (0,0194 m). A faixa de erro média é de 0 mm, indicando que o sistema de medição apresenta alta exatidão.

A precisão das medições apresentadas pelos sistemas de medições são analisadas na estatística a partir da estimativa do coeficiente de variação (RIBANI et al., 2004). Ao analisar a precisão do sistema de medição automatizado, observou-se que os valores obtidos na medição são todos próximos. O coeficiente de variação apresentou um resultado de 0%, de acordo com Paiva (2009), abaixo dos 15% significa baixa dispersão, ou seja, as medidas são precisas. Estes valores podem ser observados no Quadro 8.

Quadro 8: Coeficiente de variação da análise do sistema de medição automatizado.

| Medidas (mm) | Desvio da Média (mm) | Desvio Padrão (mm) | Coeficiente de Variação (%) |
|--------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
| 719,40 | 19,40 | | |
| 719,40 | 19,40 | 0 | 0 |
| 719,40 | 19,40 | | |

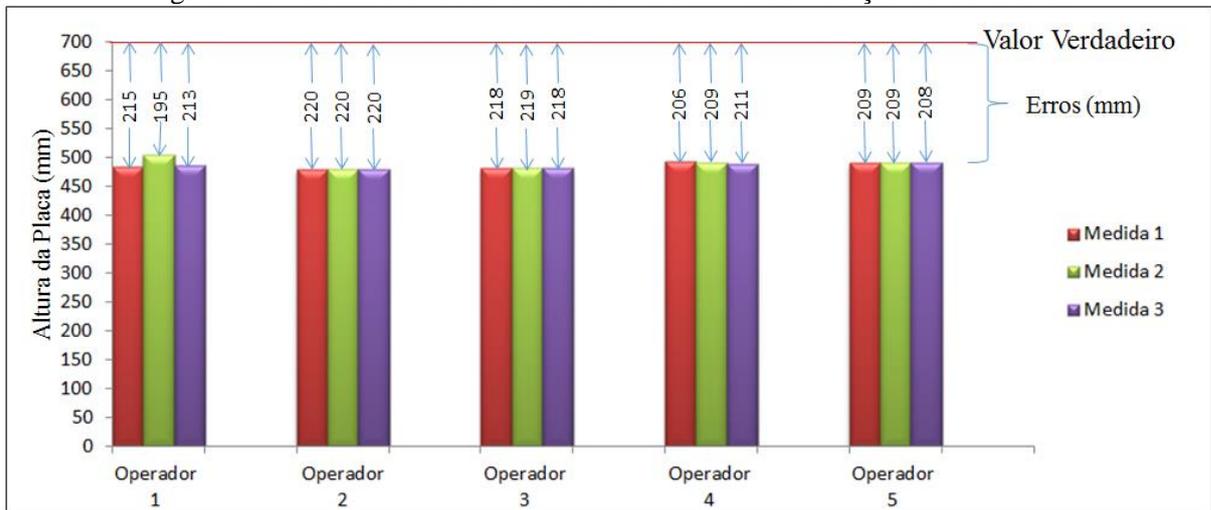
Fonte: Dados da Pesquisa

O tempo entre o início e finalização do processo de medição foi de aproximadamente 40 segundos, para a altura de 1,5 m.

4.2 Ensaio com o Sistema de Medição Convencional

O ensaio com um dos sistemas de medições convencionais utilizados para medir recalques foi realizado, para servir de parâmetro de comparabilidade com as medidas do sistema de medição automatizado. Os dados obtidos para análise do sistema de medição convencional são apresentados na Figura 42.

Figura 41: Medidas e erros do ensaio com o sistema de medição convencional.



Fonte: Dados da Pesquisa

Ao analisar a Figura 42, constata-se que existem diferenças nas medições que são realizadas manualmente e, que essas diferenças de medições não ocorrem somente entre os operadores. Em alguns casos, ocorrem diferenças de medidas com o mesmo operador.

Estas situações podem ser decorrentes de erros grosseiros e erros aleatórios. Townsend (2017) afirma que, para a utilização de equipamentos de medições em aterros é necessário treinamento para instalação e operação, para garantir o bom funcionamento e sustentabilidade da obra. Esta afirmação engloba os conhecimentos da dinâmica de todo o sistema de medição, as características do local de investigação e, principalmente, da importância das escalas de medidas, que necessitam ser obtidas para análises.

De acordo com Klein et al., (2012), os erros grosseiros devem ser evitados ou devidamente identificados nas observações, para que sua influência nos parâmetros estimados possa ser removida ou minimizada.

O erro absoluto apresentado pelo sistema de medição convencional é de 212,67 mm. A faixa de erro média obtida pelo sistema de medição convencional é de $\pm 12,5$ mm, podendo ser consideradas com pouca exatidão.

As estimativas para a análise da precisão estão ilustradas no Quadro 9.

Quadro 9: Coeficiente de variação da análise do sistema de medição convencional.

| Medidas (mm) | Desvio da Média (mm) | Desvio Padrão (mm) | Coeficiente de Variação (%) |
|--------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
| 485 | -2,33 | 6,99 | 1,43 |
| 505 | 17,67 | | |
| 487 | -0,33 | | |
| 480 | -7,33 | | |
| 480 | -7,33 | | |
| 480 | -7,33 | | |
| 482 | -5,33 | | |
| 481 | -6,33 | | |
| 482 | -5,33 | | |
| 494 | 6,67 | | |
| 491 | 3,67 | | |
| 489 | 1,67 | | |
| 491 | 3,67 | | |
| 491 | 3,67 | | |
| 492 | 4,67 | | |

Fonte: Dados da Pesquisa

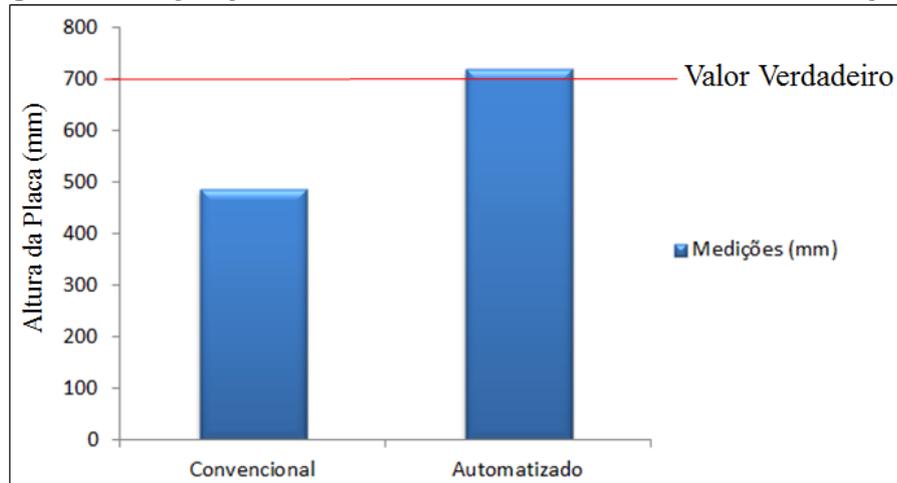
Verifica-se que os dados apresentaram uma dispersão muito baixa com coeficiente de variação de 1,43 % (abaixo de 15%), significando que as medidas são precisas.

O tempo aproximado para cada medição foi de aproximadamente 180 segundos, considerando o tempo de retirada do equipamento da caixa, medição e anotação dos dados.

4.3 Comparação entre os Sistemas de Medições

Para comparar os sistemas de medições, retirou-se a média das medidas obtidas por cada um dos sistemas. Na Figura 43 é possível observar as diferenças de medições entre o sistema de medição convencional e o automatizado.

Figura 42: Comparação das médias das medidas entre os sistemas de medições.



Fonte: Dados da Pesquisa

Comparando os erros que foram gerados em cada sistema de medição, é possível verificar que o automatizado apresenta dados com maior confiabilidade. De acordo com Hora et al., (2010), a confiabilidade reflete o quanto os valores observados estão correlacionados aos verdadeiros valores. No Quadro 10 são apresentados de forma resumida os principais parâmetros de comparação.

Quadro 10: Principais parâmetros de comparação entre os sistemas de medições.

| Sistema de Medição | Média das Medidas (mm) | Erro (mm) | Exatidão | Precisão | Tempo de Leitura |
|--------------------|------------------------|-----------|----------|----------|------------------|
| Automatizado | 719,40 | 19,40 | Sim | Sim | ± 40 segundos |
| Convencional | 487,33 | 212,67 | Não | Sim | ± 180 segundos |

Fonte: Dados da Pesquisa

Mensurar os erros gerados pelos sistemas de medições é importante, pois a falta de análise pode comprometer a estabilidade estrutural e o gerenciamento operacional do aterro sanitário.

Oliveira (1996), propõe em seu trabalho recomendações de níveis de alerta para deslocamento de aterros sanitários, baseado no cálculo da velocidade dos deslocamentos, comparados com recomendações teóricas de limites destas velocidades. Estes níveis podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios para velocidades de deslocamento em aterros sanitários.

| Atenção | Alerta | Intervenção |
|--------------------|--------------------------|------------------|
| $V \leq 25$ mm/dia | $25 < V \leq 100$ mm/dia | $V > 100$ mm/dia |

Fonte: Adaptado de Oliveira (1996).

Não considerar os erros de medições, podem gerar interpretações errôneas, pois são medidas que podem ser adicionadas ou subtraídas no valor verdadeiro, não correspondendo ao real comportamento do aterro. Ao comparar os níveis de alerta com os erros gerados pelo sistema de medição automatizado, verifica-se que o valor de 19,40 mm se enquadraria no critério de atenção e teoricamente, não afetaria nas análises de estabilidade do aterro. Ao analisar na mesma ótica o sistema de medição convencional, observa-se que o erro de 212,67 mm se enquadraria no critério de intervenção do aterro.

Como os aterros sanitários apresentam magnitudes diferentes de recalques ao longo do tempo, ROCHA et al., (2016) propuseram critérios de níveis de alertas para aterros encerrados, como pode ser observado na Tabela 2. Neste caso, o erro gerado pelo sistema de medição automatizado, englobaria o critério de alerta e o sistema de medição convencional se enquadraria no critério de intervenção novamente.

Tabela 2: Proposta de critérios para velocidades de deslocamento para aterros sanitários encerrados.

| Atenção | Alerta | Intervenção |
|--------------------|-------------------------|-----------------|
| $V \leq 10$ mm/dia | $10 < V \leq 25$ mm/dia | $V > 25$ mm/dia |

Fonte: Adaptado de Rocha et al., (2016).

Em relação ao gerenciamento do aterro, quando não se quantificam os erros de medidas, não é possível estimar corretamente o aproveitamento da capacidade de disposição. Melo (2011) enfatiza que uma das funções do monitoramento dos recalques em aterros sanitários é a possibilidade de estimar o tempo de vida útil e até o seu aproveitamento futuro.

Ao averiguar a quantificação dos erros que são gerados pelos sistemas de medições, em função da capacidade de carga que deixam de ser analisadas, observa-se a quantidade em

volume de disposição de RSU que não são previstos, comprometendo o cálculo de estimativa do tempo de vida útil do aterro e aproveitamento de áreas. No Quadro 11 são destacados alguns cálculos dos erros em função da capacidade do volume de disposição e a capacidade de carga, expressa em quantidade de caminhões coletores, para aterro sanitário, com 10000 m^2 de área.

Quadro 11: Aproveitamento da capacidade de disposição de RSU em relação aos erros.

| Sistema de Medição | Erros (mm) | Capacidade de disposição de RSU (área x erro) m^3 | Capacidade de Carga de RSU Compactados em Caminhões Coletores |
|--------------------|------------|---|--|
| Automatizado | 19,40 | 194 | 10 m^3 : 19 caminhões 12 m^3 : 16 caminhões 15 m^3 : 12 caminhões |
| Convencional | 212,67 | 2.126 | 10 m^3 : 212 caminhões 12 m^3 : 177 caminhões 15 m^3 : 141 caminhões |

Fonte: Dados da Pesquisa

Diante disso, a necessidade em identificar, quantificar e minimizar ou eliminar os erros no desenvolvimento ou adaptações de sistemas de medições são fundamentais para gerar dados confiáveis e análises consistentes.

Outro importante parâmetro de análise observado nos ensaios é inerente ao tempo de leitura utilizado nas medições. Para uma altura de 1,5 m, o sistema de medição automatizado consumiu um tempo de ± 40 segundos. Ao aplicar o tempo obtido no ensaio para medição de recalques de um maciço com 25 m de altura de RSU, levará em média o tempo de 666,6 segundos (11,11 minutos), por furo. O sistema de medição automatizado foi desenvolvido com codificadores e endereçadores, o que significa que cada sinal emitido na detecção do campo magnético tem um local de armazenamento único, evitando a mistura dos dados obtidos, permitindo assim, que possam ser instalados diversos sistemas de medições no aterro, e essas medições podem ser programadas para acontecerem concomitantemente.

Analisando o sistema de medição convencional, observa-se que cada leitura foi realizada em aproximadamente 180 segundos (3 minutos). Aplicando este valor aproximado de tempo, para um monitoramento num aterro de 25 m, o tempo necessário para realizar as medidas seria de 3000 segundos (50 minutos) por furo. Este tempo, não considera o deslocamento do operador e do sistema de medição até o local de investigação.

Ressaltando ainda que, após a aquisição dos dados obtidos pelo sistema de medição automatizado, os dados são processados e enviados para os operadores cadastrados, descartando a necessidade de operadores em campo para coletar e transmitir os dados. Ao realizar as medidas com o sistema de medição convencional, além de coletar os dados no campo, considerado insalubre e distante dos centros urbanos, é necessário enviar as medidas para um banco de dados, para posterior análise.

Os ensaios com a transmissão dos dados a distância e sem fio, a partir do módulo GSM foram realizados em área urbana e ocorreu conforme a programação.

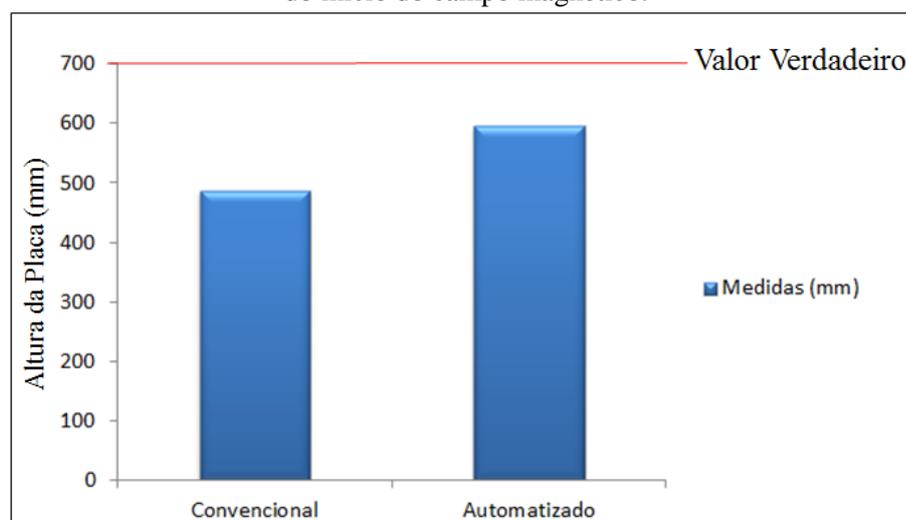
4.3.1 Comparação das medidas considerando o início do campo magnético

Como as metodologias nas obtenções dos dados entre os sistemas de medições em análise são distintas, no qual, com o automatizado é considerada a média do início e término do campo magnético e no convencional é considerado somente o início do campo magnético, realizou-se uma análise em outra perspectiva.

O sistema de medição automatizado também gera na saída dos dados, a quantidade de passos utilizados até a detecção do início do campo magnético. Ao considerar na análise somente esta medida é possível quantificar e comparar os erros gerados pelos sistemas de medições.

Convertendo a quantidade de passos para distância, obteve-se no valor da medida do início do campo magnético, 595,87 mm. A diferença entre as medidas do sistema de medição convencional e o automatizado, ao analisar os dados do início do campo magnético, são apresentadas no gráfico da Figura 44.

Figura 43: Comparação das medidas entre os sistemas de medições considerando somente as medidas do início do campo magnético.



Fonte: Dados da Pesquisa

É observado que o automatizado, mesmo detectando somente o início do campo magnético da placa magnética, apresenta maior proximidade do valor verdadeiro quando comparado ao sistema de medição convencional. O erro do sistema de medição automatizado é de 104,13 mm e no convencional o erro é de 212,67 mm.

Esta diferença nas leituras é explicada por Narasimhan e Jordache (2000) ao enfatizar que a automação pode eliminar a possibilidade de erros advindos da leitura manual de variáveis. Charles e Wolf (2012) afirmam que o grande benefício da automação e mecanização encontra respaldo quando se pensa em um sistema voltado ao monitoramento contínuo, envolvendo grande volume de dados e minimizando erros de observação.

4.3.2 Vantagens e desvantagens entre os sistemas de medições

Ao comparar os sistemas de medições em relação à sua viabilização de utilização em aterros sanitários, observam-se algumas vantagens e desvantagens apresentada por cada equipamento, listadas no Quadro 12.

- **Sistema de medição automatizado**

Quadro 12: Vantagens e desvantagens do sistema de medição automatizado.

| Vantagens | Desvantagens |
|---|--|
| . Por realizar as medidas de forma automatizada | . No desenvolvimento do sistema de medição |

| | |
|--|---|
| <p>e transmitir os dados a distância e sem fio, este método demanda a presença mínima do operador em campo, não o expondo ao ambiente insalubre do aterro sanitário;</p> <ul style="list-style-type: none"> . Os custos com transporte do operador e dos equipamentos só serão necessários em dias de manutenção do sistema de medição; . A automação propicia a eliminação de erros grosseiros gerados nas medidas, além de utilizar sensores com maior sensibilidade, gerando medidas com exatidão e precisão; . As medidas são realizadas em tempo pré-estabelecido, assegurando a periodicidade das medidas; . O equipamento poderá aproveitar partes de uma metodologia convencional; . Não é necessária a remoção do equipamento após a realização das medidas; . A transmissão dos dados remotamente proporciona o acompanhamento dos recalques em tempo real; . Demanda pouco tempo para realizar as medições; . O sistema de medição foi desenvolvido, levando em consideração o local de aplicação, no caso, aterro sanitário, embora possa ser aplicados para obras geotécnicas de um modo geral. . O sistema de medição automatizado demandou baixo custo, quando comparado ao valor comercial do sistema de medição convencional. Este comparativo, pode ser observado no anexo 1. | <p>automatizado, optou-se pela utilização de baterias como fontes de energia para ligar os circuitos. Diante disso, o sistema de medição necessitará de manutenção, para recarga das baterias com o passar do tempo;</p> <ul style="list-style-type: none"> . Para transmissão dos dados é necessário haver cobertura do sinal de telefonia; |
|--|---|

Fonte: Arquivos da Pesquisa

Uma limitação encontrada no desenvolvimento deste trabalho refere-se à transmissão dos dados para os operadores cadastrados. Nos ensaios foram utilizados chips comuns de telefonia, entretanto, o chip ideal para monitoramento em áreas de difícil acesso é o de telemetria (M2M), uma tecnologia que permite o sistema comunicar-se com outros dispositivos que possuem a mesma configuração. Conforme Almeida (2015), as operadoras de redes celulares passaram a disponibilizar serviços para o mercado de M2M, decorrente do

aumento do número de dispositivos de comunicação em locais remotos. A não utilização deste chip neste trabalho decorre dos critérios impostos pelas operadoras para a aquisição dos chips, entre eles, o oferecimento do serviço somente para pessoa jurídica.

Cabe ressaltar, que o ineditismo deste trabalho gerou um depósito de patente, no ano de 2017, no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual - INPI, com o nº de pedido BR 10 2017 027475 6 (REIS et al., 2017).

- **Sistema de medição convencional**

Quadro 13: Vantagens e desvantagens do sistema de medição convencional.

| Vantagens | Desvantagens |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> . A manutenção do sistema de medição ocorre de maneira simplificada; . O método de medição não demanda de grandes conhecimentos em relação ao ajuste do equipamento; . Alta durabilidade do equipamento. | <ul style="list-style-type: none"> . Necessita de mais de um operador para realizar as medidas; . Os operadores ficam expostos ao ambiente insalubre dos aterros sanitários. Quando os aterros ainda estão em operação, trafegam no mesmo ambiente de caminhões de disposição e compactação; . É necessária a locomoção de operadores e equipamentos para o local de investigação. Como os aterros sanitários geralmente são implantados distantes dos grandes centros geram-se gastos com o transporte e alimentação. . As medidas não podem ser realizadas em dias de chuva, para não danificar o equipamento e a planilha de coleta de dados, comprometendo a periodicidade das medidas; . Nas medidas pode haver erros grosseiros gerados pelo operador, decorrente da má visualização de escalas, fadiga, entre outros; . Elevado tempo para realizar as medições. |

Fonte: Arquivos da Pesquisa

4.3.3 Relação número de passos do motor e descarregamento da linha

Após a realização do processo de calibração do equipamento, observa-se um desvio médio de 20mm entre o valor real e o medido, entende-se que a maior parte deste erro pode ser atribuído a variação do diâmetro da bobina, no estado carregado e descarregado, o que altera significativamente o comprimento da circunferência ($2 \cdot \pi \cdot r$). Tal condição ocasiona oscilações entre o número de voltas e o comprimento de linha liberado pelo sistema, impedindo assim a utilização da relação direta, apresentada na Equação 3.

$$L = Nv \cdot Cc \quad (3)$$

Onde:

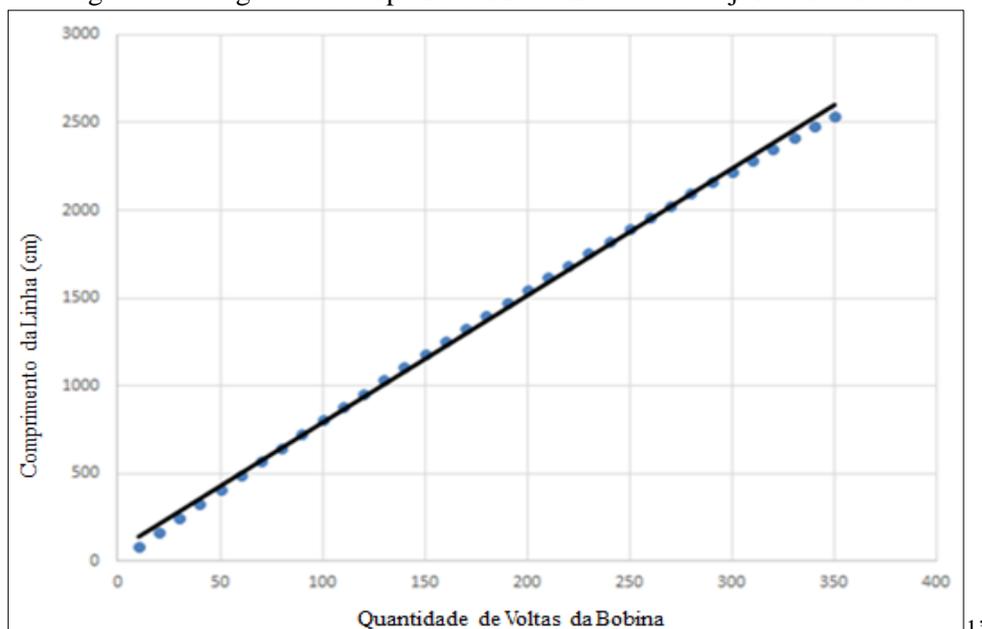
L: Comprimento de linha liberado pela carretilha (descarregamento);

Nv: Número de voltas da carretilha;

Cc: Comprimento da circunferência

Desta forma, resolveu-se estudar um modelo estatístico que se ajustasse bem a estas variações no desenrolar dos 25 m de profundidade a ser percorrido pelo sensor de campo magnético. Como melhor ajuste foi observado o modelo de regressão linear simples, a Figura 45 mostra, o digrama de dispersão dos dados experimentais e a linha de ajuste do modelo adotado.

Figura 44: Diagrama de dispersão dos dados e linha de ajuste do modelo.



Fonte: Dados da Pesquisa

Observa-se que o ajuste foi semelhante ao encontrado nos dados experimentais, apresentando uma pequena tendência de desalinhamento no início para valores de profundidade da ordem de aproximadamente 82mm e no final para valores em torno de 2540 mm. Todavia ao verificar os parâmetros de ajuste, observa-se um coeficiente de determinação (R^2) de 99,99% mostrando que quase 100% da variabilidade dos valores de Y são explicados pelo modelo. Um coeficiente de correlação de 0,99, considerado muito bom, de acordo com Paiva (2009).

Para verificação da significância do modelo, foi realizada uma ANOVA e para verificação da não nulidade dos coeficientes de correlação foi realizada um teste de significância com os coeficientes da regressão linear simples. As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados destas análises.

Tabela 3: Tabela ANOVA.

| ANOVA | | | | | | |
|------------------|-------------|----|-------------|-------------|-------------------|---------|
| | SQ | gl | MQ | F | F de significação | p_valor |
| Regressão | 18667603,85 | 1 | 18667603,85 | 21947,65206 | 3,56051E-48 | 0,000 |
| Resíduo | 28068,19268 | 33 | 850,5512934 | | | |
| Total | 18695672,04 | 34 | | | | |

Fonte: Dados da Pesquisa

Verifica-se pela Tabela 4, que o p-valor apresentou uma magnitude muito inferior ao nível de significância (α), denotando assim a validade do modelo para descrever os dados em estudo.

Tabela 4: Teste de significância.

| | Coeficientes | Erro padrão | Star T | Valor_P | Inferior 95% | Superior 95% |
|--------------------|--------------|-------------|---------|-----------|--------------|--------------|
| Interseção | 67,415 | 10,074 | 6,691 | 1,278E-07 | 46,918 | 87,911 |
| Variável X1 | 7,231 | 0,048 | 148,147 | 3,560E-48 | 7,131 | 7,330 |

Fonte: Dados da Pesquisa

A Tabela 4, apresenta o teste de significância para os coeficientes do modelo de regressão linear simples, observa-se que o p-valor apresentou valores muito inferiores ao do nível de significância adotado (α) caracterizando na validação destes coeficientes para a composição do modelo estatístico que é apresentado na Equação 4.

$$L = 67,41 + 7,23.Nv + \varepsilon \quad (4)$$

Onde:

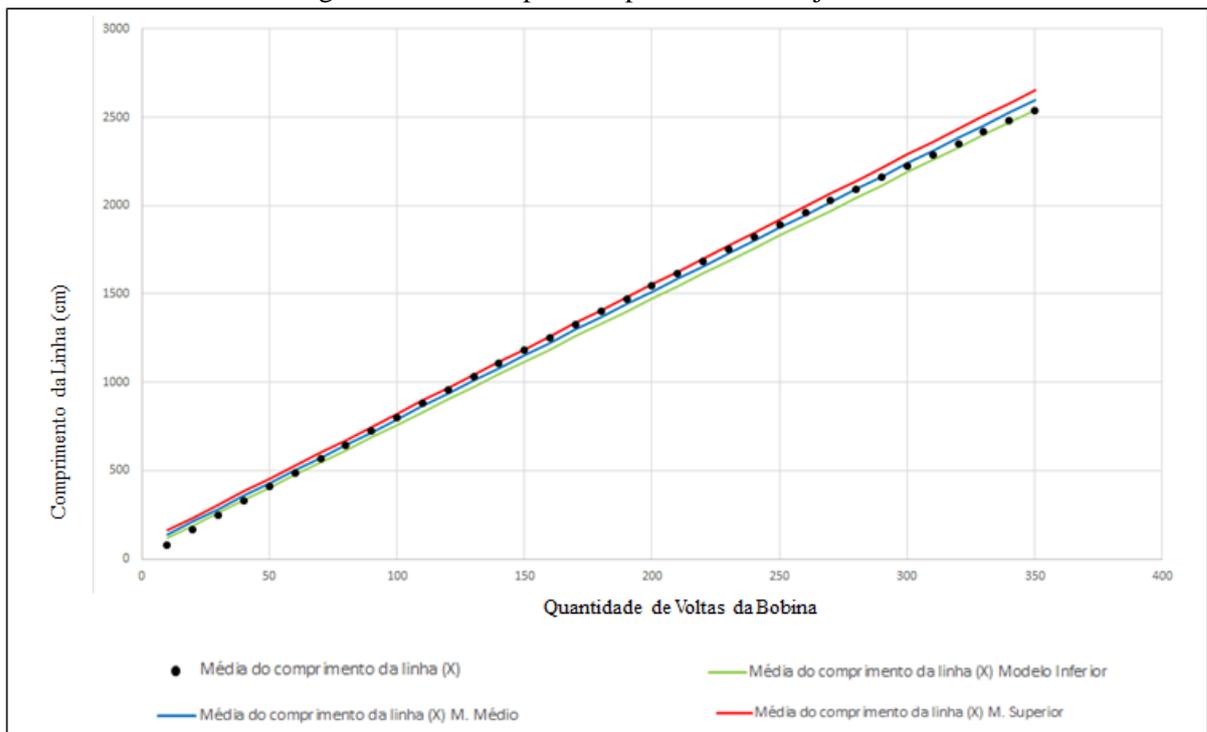
L: Comprimento da linha liberada pela carretilha;

Nv: número de voltas da carretilha.

ε : erro associado ao modelo

A Figura 46 são apresentados os dados experimentais, plotados concomitantemente as Equações do modelo e os limites superiores e inferiores. Pode-se observar que os valores experimentais se encontram dentro de tais limites, podendo assim afirmar com 95% de certeza, que o modelo estudado representa um ótimo estimador por intervalo do processo em estudo e para a carretilha utilizada. Outras análises para adequação e ajuste do modelo poderiam ser realizadas, tais como: estudo dos resíduos, teste de normalidade, dentre outras, todavia devido a perfeição do ajuste aqui encontrado, dos coeficientes de correlação e regressão entende-se que não existe necessidade de tais estudos.

Figura 45: Valores preditos pelos modelos ajustados.



Fonte: Dados da Pesquisa

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

- O desenvolvimento do sistema de medição automatizado mostrou-se como uma metodologia alternativa e eficaz no monitoramento dos recalques em superfície e em profundidade de aterros sanitários, bem como, mediu a posição das placas magnéticas em tempos pré-estabelecidos, favorecendo a periodicidade das medidas e não demandou de operador para a aquisição dos dados.
- Após aquisição e processamento, os dados são transmitidos a distância e sem fio para os operadores cadastrados. Entretanto, esta transmissão só é possível, se no local em investigação houver cobertura do sinal de telefonia.
- Os dispositivos eletrônicos e eletromecânicos escolhidos para o desenvolvimento do sistema de medição se adequaram tecnicamente ao uso pretendido;
- Os dados obtidos pelo sistema de medição apresentaram um erro absoluto de 19,40 mm, com uma faixa de erro média de 0 mm e o coeficiente de variação de 0, significando que as medidas obtidas pelo sistema de medição apresentam exatidão e precisão, conseqüentemente, geram dados confiáveis.
- O tempo aproximado para realizar a aquisição e a transmissão dos dados, no cenário de ensaio de 1,5 m de altura com o sistema de medição automatizado, foi de 40 segundos, otimizando o tempo, quando comparado ao tempo utilizado pelo sistema de medição convencional, que foi de 180 segundos.
- O modelo de regressão linear simples gerado a partir dos dados da relação número de voltas (ou passos) da bobina e comprimento da linha no descarregamento da bobina apresenta um bom ajuste para a calibração do sistema de medição, com um coeficiente de determinação (R^2) de 99,99% e um coeficiente de correlação de 0,99, considerado muito bom para a calibração do sistema de medição, podendo ser utilizado no processamento dos dados, minimizando ainda mais os erros.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Inserir na programação a equação gerada pela regressão linear que relaciona o número de passos do motor e o descarregamento da linha, em função da carretilha adotada, para refinar o processamento dos dados;
- Adaptar e aprimorar as fontes de energia que carregam os circuitos, por fontes de energia solar fotovoltaica;
- Realizar os ensaios de transmissão dos dados a distância e sem fio em áreas remotas, com o chip de telemetria;
- Propor o armazenamento dos dados em cartão de memória interno ao sistema de medição, para o *backup* das medidas;
- Usar outros sensores para detecção do campo magnético, como o sensor de efeito *hall*;
- Melhorar a mecânica da carretilha;
- Inserir novos sensores no mesmo equipamento, para obtenção de novos parâmetros, como: temperatura, umidade e gás;
- Correlacionar a temperatura interna do maciço em função da variação do campo magnético.
- Correlacionar os dados obtidos pelo sistema de medição e verificar de maneira automatizada, quais condições podem influenciar na geração do biogás.
- Aperfeiçoar a caixa de acondicionamento do sistema de medição, com isolamento térmico.
- Realizar as medidas considerando como marco de referência, o ímã fixado na base do maciço, podendo realizar as medidas de cima para baixo e de baixo para cima do tubo guia.

REFERÊNCIAS

- ABICHOU, T. et al. The Outer Loop Bioreactor: A Case Study of Settlement Monitoring and Solids Decomposition. **Waste management**, p. 2035–2047, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**, 2004.
- _____. **NBR 15.849: Resíduos Sólidos Urbanos - Aterros Sanitários de Pequeno Porte-Diretrizes para Localização, Projeto, Implantação, Operação e Encerramento**, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**, 2016.
- AFFONSO, H. M. M. **Instrumentação para Medir Deslocamentos em Barragens de Enrocamento**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.
- ALMEIDA, M. R. Sistema de Transmissão de Dados para Lugares Remotos: Análise de Soluções e um Estudo de Caso com Modem GPRS. Trabalho de Conclusão de Curso—Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2015.
- AL-YAQOUT, A.; HAMODA, M. Movement of unlined landfill under preloading surcharge. **Waste Management**, p. 448–458, 2007.
- ANDERSEN, E. O. et al. Field Monitoring of the Compressibility of Municipal Solid Waste and Soft Alluvium. **Proceedings: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, n. Paper 6, 2004.
- ANDOLFATO, S. H. D. **Sistema de Automação de Nível Digital**. Tese de Doutorado—Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2010.
- ARAÚJO NETO, C. et al. Statistical Modeling of Municipal Solid Waste Settlement From a Landfill Lysimeter. **SOILS & ROCKS**, N^o 40, p. 51–59, 2017.
- ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do Comportamento dos Resíduos Sólidos Urbanos e Desenvolvimento de Modelos Estatísticos para Previsão das Deformações de Aterros Sanitários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- BABU, G. L. et al. Prediction of Long-term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management. **ASCE**, p. 139–150, 2010.
- BACHUS, R.; ZETTLER, T. ; FLEMING, J. Development of a Settlement Profiling System to Assess MSW Compression Characteristics. In **GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology**, n. 1–6, 2006.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**: volume 1. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2011.

BARATO, B. Projeto de um Sistema de Controle para Veículo Aéreo não tripulável. Trabalho de Conclusão de Curso—[s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. São Paulo (SP): Atlas, 2010.

BAREITHER, C. A.; KWAK, S. Assessment of Municipal Solid Waste Settlement Models Based on Field-scale Data Analysis. **Waste Management**, n. 42, p. 101–117, 2015.

BATISTA, H. P. **Desenvolvimento de diretrizes para monitoramento geotécnico e plano de contingência/emergência em aterros sanitários**. Dissertação de Mestrado—Escola de Engenharia: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010

BENNATI, J. C. B., J.L. Paixão Filho, M.A.G. Leme and M.G. Miguel. Construction of a large-scale experimental cell to obtain hydro-geomechanical parameters of MSW of the City of Campinas, Brazil. **Proceedings of the 14th International Waste Management and Landfill Symposium**. Cagliari, Italian, p.1-13, 2013.

BLUM, J. **Explorando o Arduino: Técnicas e Ferramentas para Mágicas de Engenharia**. Rio de Janeiro. Ed: Alta Books, 2016. ISBN 978-85-7608-991-9.

BORGES, T.; VIMIEIRO, G. V.; CATAPRETA, C. A. A. Guia para Monitoramento Ambiental em Aterros Sanitários. **VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, 2016.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo, SP- Brasil. Ed: Oficina de Textos, 2008, 248p. ISBN 978-85-86238-73-4.

BRASIL. Competências do Conmetro e do Inmetro e instituição da Taxa de Serviços Metrológicos, Lei N° 9.933, 1999. Decreto N° 6.275 de 2007. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 1999. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 15 mar. 2017.

BRITES, F. G.; SANTOS, V. P. de A. **Tutorial: Motor de Passo**, 2008.

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas Medições**. IEP - Instituto Eletrotécnico Português e ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004.

CARIBÉ, R. DE M. **Análise Multivariada no Comportamento dos Recalques em Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de Mestrado - Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A.; GALVÃO, T. C. B.; BATISTA, H. P. Avaliação da Compactação de Resíduos Sólidos Dispostos no Aterro Sanitário da BR 040 em Belo Horizonte - MG. **5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO 2003**. ABMS, n. Anais do 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003

CATAPRETA, C. A.; SIMÕES, G. F. Evaluation of the Relation Between Precipitation and Leachate Flow in an Experimental Sanitary Landfill. **XXXI Congresso Interamericano Aidis. Santiago - Chile**, 2008.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. Monitoramento Ambiental e Geotécnico de Aterros Sanitários. **VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, nº 21, 2016.

CEPOLLINA, M.; KAIMOTO, L. S. A.; MOTIDOME, M. J.; LEITE, E.F. Monitoramento em Aterros Sanitários Durante a Operação, Desempenho Mecânico e Ambiental. In: RESID. Seminário sobre Resíduos Sólidos, 2004.

CHARLES D, G.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying- An Introduction to Geomatics**. New Jersey. Ed: Pentrice Hall, 2012.

COMMETRO, 2018. Disponível em: <http://www.commetro.com.br/instrumentos-cat/1/19>. Acesso em: 10 nov. 2017.

COX, J.; HANSON, J.; YESILLER, N. Measuring Settlement of Individual Waste Layers Using a Magnetic Extensometer Settlement System at a MSW Landfill. **In:Global Waste Management Symposium**, 2016.

CREATIVE COMMONS. **Arduíno: Guia Iniciante**. Disponível em: http://www.multilogica-shop.com/download_guia_arduino Acesso em: 20 dez. 2017.

DENARDIN, GA. P. **Estudo dos Recalques do Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio – Minas do Leão/RS**. Dissertação de Mestrado - Santa Maria - RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

DONHA, M. S. **Conhecimento e Participação da Comunidade no Sistema de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: o caso de Marechal Cândido Rondon /PR**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2002.

DUNNICLIFF, J.; POWDERHAM, A.;MACDONALD, M. Recommendation for Procurement of Geotechnical Instruments and Field Instrumentation Services. **Geotechnical instrumentations news**. 2001.

DURMUSOGLU, E.; CORAPCIOGLU, M.; TUNCAY, K. Landfill settlement with decomposition and gas generation. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, N° 9, p. 1311–1321, 2006.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). International Decontamination Research and Development Conference. **Environmental Protection Agency, Washington. US**, 2015.

EYAY, N. Previsão de Recalques em Aterros Sanitários Novos: Caso do Aterro de São Leopoldo. Trabalho de Conclusão de Curso - Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

FARIAS, R. M. **Estudo dos Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Estatística e Experimental**. Dissertação de Mestrado - Campina Grande-PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F.L.; CHAN, B.L. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. Rio de Janeiro: Campus /Elsevier, 2009. 646p.

FERNANDES, W. D.; NETO, C.; SILVA, J. R. Metrologia e Qualidade - Sua Importância como Fatores de Competitividade nos Processos Produtivos. **A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão**, 2009.

FERREIRA, R.; ET AL. State of the art total stations. A look at new technologies. **GIM International**, v. 25, N°10, 2011.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Orientações Básicas para Operação de Aterro Sanitário**. Belo Horizonte, 2006.

G. GRESCHIK; GÁLOS, M. Environmental Geotechnics – An Overview. **Environmental Geology**, 1998.

GARCEZ, L. R. **Estudo dos Componentes Tóxicos em um Biorreator de Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande – PB**. Dissertação de Mestrado - Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

GOMES, A. S. Sistema de Observação em Obras Geotécnicas. Planejamento, Instalação e Exploração. **VII Congresso Nacional de Geotecnia**. Lisboa, n. 2002.

GOMES, N. A. **Análise da Toxicidade do Lixiviado Gerado em uma Célula do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

GRAÇA, N. L. S. de S.; FAGGION, P. L. Validação da Determinação de Deslocamentos Relativos em Barragens Utilizando Topografia e Medidores Triortogonais de Junta. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 4, n° 2, p. 89–98, 2016.

HORA, H. R. M.; MONTEIRO, G. T. R.; ARICA, J. Confiabilidade em Questionários para Qualidade: Um Estudo com o Coeficiente Alfa de Cronbach . **Produto & Produção**, v. 11, N° 2, p. 85–103, 2010.

IMA E DEODIMIO, 2016. Disponível em: <http://www.imaenedimio.com.br>. Acesso em: 02 de nov. 2017.

HUGHES, A.; DRURY, W. **Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications**. Newnes, 2013.

HUNTE, C. et al. **Settlement of Bioreactor Landfills During Filling Operation**. Geoenvironmental Engineering, p. 1–10, 2007.

IBAM. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**, 2001. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2017.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. 3ª ed. Duque de Caxias - Rio de Janeiro, 2012. ISBN 978-85-86920-09-7.

JANG, Y. S. Field-monitored settlement and other behavior of a multi-stage municipal waste landfill, Korea. **Environmental earth sciences**, v. 69, N° 3, p. 987–997, 2013.

JUCÁ, J. F. et al. **Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca**. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 1999.

KLEIN, I. et al. Planejamento de Redes Geodésicas Resistentes a Múltiplos outliers. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, N° 3, p. 480–507, 2012.

LOPES, M. L.; GOMES, C. C. Geotechnical landfill monitoring; adaptations needed. **Environmental Geotechnics**, 2013.

MANCONI, A. Monitoring. **Encyclopedia of Engineering Geology**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 1–8. DOI: 10.1007/978-3-319-12127-7-208-1.

MARINHO, F. A. M. Investigação Geotécnica Para Quê?. **IV COBRAE**, v. 2, 2005.

MARQUES, A. C. **Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos em Geotecnia**. Tese de Doutorado - São Carlos-SP: Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.

MELO, M. C. **Uma Análise de Recalques Associada a Biodegradação no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

MELO, M. C. **Estudo da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

MELO, M. C.; AIRES, K. O.; ALMEIDA, M.V.A.; MONTEIRO, V.E.D. Microbiologia de resíduos sólidos urbanos e sua relação com a deformação vertical da massa aterrada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, N° 3, 2014.

MELO, V. L.; JUCÁ, J. F. Estudos de Referência para Diagnóstico Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos. **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 3–8, Dezembro de 2000.

MENEZES, F. M. **MSA - Análise dos Sistemas de Medição**. Porto Alegre. Ed: Produttore, 2013.

MIRANDA, F. das D. A. **Monitoramento Topográfico em Tempo Real com a Utilização de um Sistema Semi Automatizado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, 2012.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro da Muribeca**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

MOREIRA, F. G. DOS S. **Emissões Fugitivas de Biogás em Célula de Aterro Sanitário**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

MUSSOI, F. L. R. **Fundamentos de Eletromagnetismo**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET/SC), 2005.

MYRA J. HIRD. Waste, landfills, and an environmental ethic of vulnerability. **Ethics & the Environment**, 2013.

NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. **Data Reconciliation and Gross Error Detection: an Intelligent Use of Process Data**. Houston: Gulf Professional Publishing, 2000.

NASCIMENTO, J. C. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de Mestrado - São Carlos-SP: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

NEVES, C. et al. Os Dez Maiores Desafios da Automação Industrial: As Perspectivas para o Futuro. **CONNEP - II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica.**, 2007.

O LIVEIRA, F. J. P. Geotechnical Problems & Solutions for Design & Operation of a Landfill of Municipal Waste. **Proceedings of the Fourth International Conference. London**, 1996.

P AIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

PERBOYRE, BARBOSA, ALCÂNTARA. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos: em 16 aulas**. 3. ed., Ed: São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2006.

PORTES, W. A. D. O. Utilização de Arduino e Eletrônica na Automação Residencial Com Acessibilidade A Pessoa Portadora de Deficiência. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, 2014.

RAPOSO, E. M. S. **Observação de deslocamentos em obras geotécnicas**. Dissertação de Mestrado - Portugal: Universidade Nova de Lisboa, 2011.

RECESA. **Resíduos Sólidos: Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários**. Belo Horizonte: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.), 2008.

REIS, R. F. et al. **Sistema de Medição de Deslocamentos Verticais em Obras Geotécnicas com Automação e Transmissão de Dados.**, 2017.

RIBANI, M. et al. **Validação em Métodos Cromatográficos e Eletroforéticos**. Quim. Nova, v. 27, n. 5, p. 771–780, 2004.

ROCHA, A. A. A. et al. **Níveis de Alerta para Monitoramento de Aterros Sanitários Encerrados**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas. COBRAMSEG, 2016.

ROCHA, F. B. et al. Plataforma de Comunicação Sem Fio Aplicada a Sistemas de Irrigação, 2014.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.

SCHULER, R. **Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado**. Dissertação de Mestrado. UFRJ/COPPE, 2010.

S HARMA, H. D. Solid waste landfills: Settlements and post-closure perspectives. **In: Environmental and Pipeline Engineering**, p. 447–455, 2000.

SHARMA, H. D.; LIN, J.; BERNARDINI, J. . Settlement Monitoring Program for a Proposed Multipurpose Site Development. **Director**, v. 836, n. 3034, 2012.

SHI, D. et al. Low Trap-State Density and Long Carrier Diffusion in Organolead Trihalide Perovskite Single Crystals. **Science, United State**, v. 347, n. N° 6221, p. 519–522, 2015.

S ILVA, A. M. **Monitoramento de Ambiente Através de Uma Unidade Móvel Controlada pelo Computador**. Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), 2010.

S ILVA ANDRIOTTI, J. L. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. 2ª reimpressão. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2013.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A.; MARTINS, H. L. Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários – Trabalhos Realizados na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte, MG. **Anais do Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamento de Resíduos Sólidos**, 2006.

SOUSA, R. B. . et al. Recalques e Sólidos Voláteis Associados à Atividade Microbiana em um Lisímetro com Resíduos Sólidos Urbanos. **In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia -CONTECC**, n. Fortaleza, 2015.

SOWERS, G. F. **Settlement of Waste Disposal Fills**. In: Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Anais...Moscow**: 1973.

STEVAN JUNIOR, S. L.; SILVA. **Automação e Instrumentação Industrial com Arduino: Teoria e Projetos**. São Paulo, SP. Ed: Érica/Saraiva, 2015. ISBN 978-85-365-1478-9.

SWATI, M.; JOSEPH, K. Settlement analysis of fresh and partially stabilised municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills. **Waste Management, United Kingdom**, v. 28, n. N° 8, p. 1355–1363, 2007.

SWATI, M.; JOSEPH, K. Settlement Analysis of Fresh and Partially Stabilised Municipal Solid Waste in Simulated Controlled Dumps and Bioreactor Landfills. **Waste Management, United Kingdom**, v. 28, N° 8, p. 1355–1363, 2008.

APAHUASCO, W. F. C. **Avaliação de Modelos de Previsão de Recalques dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro do Jockey Clube de Brasília**. Dissertação de Mestrado. Brasília-DF: Universidade de Brasília, 2005.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação.** Tese—Brasília-DF: Universidade de Brasília, Setembro de 2009.

TEDESCHI, A. L.; FAGGION, P. L.; ANDOLFATO, S. H. D. Validação do Sistema de Automação de Nível Digital Aplicado na Determinação de Recalques. p. 352, 2017.

TIMMIS, H. **Practical Arduino Engineering.** 1^a ed. EUA: APRESS ACADEMIC, 2011

TOWNSEND, T. G. Sustainable Practices for Landfill Design and Operation, 2017.

WRTH, J.; DESFORGES, J. F. Determinants of Intracellular pH in the Erythrocyte. **British Journal of Haematology**, v. 29, n. 3, p. 369–372, 1975.

W ERTHEIN, J. A Sociedade da Informação e Seus Desafios. **Ci. Inf., Brasília**, v. 29, n. N^o 2, p. 71–77, 2000.

YUEN, S. T. . et al. The Design, Construction and Instrumentation of a Full-Scale Bioreactor Landfill. **In: GeoEnvironment**, p. 345–352, 1997.

ZHAO, Y. R. et al. A Study of Shear Strength Properties of Municipal Solid Waste in Chongqing Landfill, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 22, p. 12605–12615, 2014.

