CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

TATHIANA RODRIGUES CAETANO

Detecção de vazamentos em adutoras de água por meio de métodos geofísicos

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, fevereiro de 2019

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Tathiana Rodrigues Caetano

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM ADUTORAS DE ÁGUA POR MEIO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profª. Dra. Hersília de Andrade e Santos

Co-Orientador: Prof. Dr. Remke Van Dam

Belo Horizonte, fevereiro de 2019

Caetano, Tathiana Rodrigues
C128d Detecção de vazamentos em adutoras de água por meio de métodos geofísicos / Tathiana Rodrigues Caetano. – 2019.
xvi, 96 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Hersília de Andrade e Santos.
Coorientador: Remke Van Dam
Bibliografia: f. 92-96.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Abastecimento de água – Medição – Teses. 2. Detectores de vazamento 3. Geofísica – Dinâmica dos fluidos – Teses. I. Santos, Hersília de Andrade e. II. Van Dam, Remke L. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 628.16

Elaboração da ficha catalográfica pela Biblioteca-Campus II / CEFET-MG

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da Instituição, da autora e dos orientadores.

Tathiana Rodrigues Caetano

Possui técnico em Edificações (2008) e graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-(2016). Participou do Programa de Estudos em Engenharia, Sociedade e Tecnologia (PROGEST) como formadora de Meio Ambiente para o curso de Gestão de Obras. Mestranda em Engenharia Civil, área de Construção Civil, pelo CEFET-MG (2018).

TATHIANA RODRIGUES CAETANO

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM ADUTORA DE ÁGUA POR MEIO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Hersília de Andrade e Santos
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Remke Leander Van Dam
Co-Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Rogério Cabral de Azevedo
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Cásia Regina Santos Nunes Almeida
Departamento de Engenharia Elétrica, CEFET-MG

Paulo Roberto Antunes Aranha
Departamento de Geologia. UFMG

Belo Horizonte, 11 de fevereiro de 2019

“When I left you I was but the learner.

Now I am the master.”

(Darth Vader)

AGRADECIMENTOS

Uma pesquisa de mestrado, como qualquer outra coisa na vida que seja realmente importante, não se faz sozinha. Portanto, reservo este espaço para agradecer a todos que me ajudaram nessa jornada.

Listar e agradecer cada um que esteve presente neste processo não é uma tarefa fácil.

Agradeço aos meus pais Antônio Carlos e Iracilda, meu irmão Gustavo e minha avó Maria Therezinha por todo suporte e carinho, e principalmente por acreditarem em mim mesmo quando eu mesma não acreditava.

Aos meus orientadores Hersília e Remke, muito obrigada e minha eterna gratidão, pela paciência, pela amizade e pelos conhecimentos e ensinamentos transferidos, que não se limitam às páginas deste trabalho.

Ao professor Paulo Aranha meu muitíssimo obrigada, pela ajuda, pelos ensinamentos e pela disponibilidade em ajudar. Sem você grande parte deste trabalho não existiria.

À melhor turma de mestrado que o CEFET-MG já teve, meu obrigada pelas conversas no “submundo”, pelas terapias em grupo, pelos churrascos e pelos almoços divididos no restaurante estudantil.

Aos amigos que fiz nesse período e que vou levar por toda a vida: Camila, Jerônimo, Thiago, Guilherme, Adriana, Diego e Harley, o mestrado não seria o mesmo sem vocês.

Aos amigos e companheiros de longa data: Fabrício, Pablo, Matheus, Felipe, e Rafael, por me aguentarem a muitos e muitos anos.

À Marina um agradecimento do tamanho do sistema solar, pois sem você esse trabalho não seria possível. Além disso, obrigada pela amizade que construímos nesses dois anos de trabalho.

A todos aqueles que me ajudaram nas coletas de campo, em especial ao meu pai. Pai, sem você não existiria coleta. Obrigada por toda a ajuda, não é qualquer pai que faria o que você fez.

Ao pessoal da secretaria: Nathália, Ana, Dayvison e Léo, por todo auxílio na parte burocrática do mestrado. Aos técnicos de laboratório do CEFET, em especial ao

Ivan e a Lucília, por me ajudarem a realizar todos os ensaios de solos que fiz para esta pesquisa.

À Copasa, em especial ao Carlos Vaz e ao Hamilton, por acreditarem no potencial desse trabalho e por todo o auxílio prestado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.”, da FAPEMIG por meio do projeto de pesquisa TEC - RDP-00186-10 e APQ-01145-15, e do CNPq por meio do projeto de pesquisa 456390/2014-6. Assim, obrigada às agências de fomento e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

A todos vocês que fizeram parte, direta ou indiretamente, desse trabalho meu muito obrigada, e que a força esteja com vocês!

RESUMO

CAETANO, Tathiana Rodrigues. **Detecção de vazamentos em adutoras de água por meio de métodos geofísicos.** 2019. 96 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

As redes de distribuição de água são construídas para fornecer constantemente água em quantidade suficiente aos usuários com pressão e qualidade aceitáveis da forma mais econômica possível. Entretanto, há perdas de água por de vazamentos nas redes de distribuição de água urbana. Assim, um controle de perda de água eficiente deve ser reconhecido como uma prioridade para melhorar o fornecimento de água potável. Neste contexto, existem diversas formas de detectar e analisar os vários tipos de vazamentos. Dentre os principais métodos de detecção de vazamentos ressaltam-se os geofísicos e geoelétricos, que vêm ganhando força como forma de auxiliar nas tomadas de decisões ligadas à engenharia, principalmente por serem não destrutivos. O objetivo deste trabalho foi determinar a localização de vazamentos em uma adutora de concreto com funcionamento não afogado, ou seja, a adutora não se encontra pressurizada. Para tanto, foram utilizadas duas técnicas geofísicas: a eletrorresistividade e o ground penetrating radar (GPR), utilizando para tanto, os métodos do caminhamento elétrico e as antenas de 100 e 200 MHz monoestáticas, respectivamente. A adutora utilizada no estudo está localizada na cidade de Nova Lima, no estado de Minas Gerais, Brasil, e faz parte do Sistema Produtor Rio das Velhas. Este sistema abastece parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte. A hipótese levantada na presente pesquisa é de que é possível localizar os vazamentos com a eletrorresistividade e, para isso, foram utilizadas duas contraprovas: o uso do GPR e a escavação do local. Além das investigações de campo, foram realizadas simulações computacionais a partir do software COMSOL Multiphysics®. Foi constatada a presença de valores de baixa resistividade, bem como alterações no sinal nos radagramas nos locais aonde haviam vazamentos confirmados visualmente. Dessa forma, concluiu-se que a técnica da eletrorresistividade é eficiente na detecção de vazamentos nas condições avaliadas e, pode ser usado para auxiliar os trabalhos de manutenção das tubulações avaliadas.

Palavras-chave: Vazamentos de água. Detecção de vazamentos. Geofísica aplicada.

ABSTRACT

CAETANO, Tathiana Rodrigues. **Detection of leakage in water mains by means of geophysical methods.** 2019. 96 p. Dissertation (master's degree) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Water distribution networks are built to consistently supply sufficient water to users with acceptable pressure and quality in the most economical way possible. However, there are water losses through leaks in urban water distribution networks. Thus, efficient water loss control should be recognized as a priority to improve the supply of drinking water. In this context, there are several ways to detect and analyze the various types of leaks. Among the main methods of detection are the geophysicists, who have been gaining strength as a way to aid in decision-making linked to engineering mainly because they are non-destructive. The electrical resistivity technique, to be used in this work, consists of a geoelectric method based on the determination of the electrical resistivity of the materials. The objective of this work is to determine the location of leaks in a concrete pipe that does not work, in other words, it is not pressurized. For that, two geophysical techniques were used: the electrical resistivity and the ground penetrating radar (GPR), using the multi-electrode arrays and monostatic 100 and 200 MHz antennas, respectively. In situ measurements were performed using a Terrameter SAS1000 electrometer, and a 200MHz shielded antenna, produced by Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). The study used in this study is located in the city of Nova Lima, in the state of Minas Gerais, Brazil, and is part of the Rio das Velhas Producer System. This system supplies part of the Metropolitan Region of Belo Horizonte. The hypothesis raised is that it is possible to locate the leaks with the electrical resistivity, and for this two tests were used: the use of GPR and the excavation of the site. In addition to the field investigations, computational simulations were performed with the COMSOL Multiphysics® software. It was found the presence of values of low resistivity, as well as changes in the signal in the radagrams, in the places where there were visually confirmed leaks. Thus, it was concluded that the electrical resistivity method is efficient in detecting leaks in the evaluated conditions, and can be used to assist in the maintenance of pipelines.

Keywords: Water leaks. Detection of leaks. Applied geophysics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de um sistema convencional de abastecimento de água.....23
Figura 2.2 - Tipos de vazamentos de acordo com a FUNASA. 25
Figura 2.3 - Fonte de corrente pontual em um meio homogêneo isotrópico. 28
Figura 2.4 - Intervalos de resistividade/condutividade elétrica de algumas rochas e materiais.....29
Figura 2.5 - Linhas, de fluxo de correntes (linha tracejada) e equipotenciais (linha sólida), para dois eletrodos de corrente em um meio homogêneo. (a) representa a vista no plano do fluxo de correntes e equipotenciais, (b) é o perfil vertical e (c) a variação do potencial na superfície. 30
Figura 2.6 - Diagramas esquemáticos de diferentes arranjos de elétrodos e os seus padrões de sensibilidade para levantamentos de resistividade 2D. Na figura, C_1 e C_2 são os elétrodos de corrente positivo e negativo, respectivamente. P_1 e P_2 são dois eletrodos de potencial. As letras a e n são os parâmetros que controlam o espaçamento e o espaçamento máximo dos arranjos. Os padrões de sensibilidade mostrados são apenas um exemplo de cada uma das combinações indicadas, e nestes padrões, as cores quentes e o sinal positivo representam a região onde o modelo terá maior resolução, já as cores frias e o sinal negativo indicam onde a resolução será menor.....31
Figura 2.7 - Arranjo de campo Dipolo-Dipolo 32
Figura 2.8 - Organização de levantamentos GPR. (a) Perfilagem de reflexão; (b) Sondagem de velocidade e; (c) Transiluminação.....34
Figura 2.9 - Tipos de malhas (a) Estruturada; (b) Não-estruturada; (c) Híbrida. 36
Figura 3.1 - Delineamento metodológico da pesquisa realizada 42
Figura 3.2 - Fluxograma dos procedimentos realizados no trabalho proposto. 43
Figura 3.3 - Fluxograma dos procedimentos para a realização de uma modelagem numérica.....44
Figura 3.4 - Localização do município de Nova Lima e pontos de coleta de dados ..45
Figura 3.5 - Domínio hidrogeológico e Mapeamento geológico do município de Nova Lima 46
Figura 3.6 - Geodiversidade e Solos do município de Nova Lima.....47

Figura 3.7 - Gráfico da Precipitação Acumulada Mensal da Estação de Belo Horizonte segundo a Normal Climatológica de 1981 – 2010 do INMET.....49
Figura 3.8 - Imagem de satélite dos pontos de coletas de dados. 50
Figura 3.9 - Esquema da coleta dos dados com o GPR, (a) em V1 e (b) em V2, sendo que a sigla Rad representa cada um dos radagramas coletados. Os pontos vermelhos indicam o início e o final do caminhamento elétrico realizado. As setas pretas indicam os vazamentos localizados previamente. 53
Figura 3.10 - Amostras de solos utilizadas para a determinação do teor de umidade. As três amostras de cima na imagem pertencem ao ponto P2, enquanto as amostras na parte de baixo pertencem à P1. 55
Figura 3.11 - Perfil da adutora de água tratada. Os valores indicados nas cotas estão em milímetros. 56
Figura 3.12 - Geometria da adutora 57
Figura 3.13 - Malha gerada pelo COMSOL Multiphysics 57
Figura 4.1 - Localização do município de Nova Lima (Minas Gerais) e pontos de coleta de dados 65
Figura 4.2 - Figura 3.9 - Esquema da coleta dos dados com o GPR, (a) em V1 e (b) em V2, sendo que a sigla Rad representa cada um dos radagramas coletados. Os pontos vermelhos indicam o início e o final do caminhamento elétrico realizado. As setas pretas indicam os.....69
Figura 4.3 – (a) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente coletada em V0. (b) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente recíproca coletada em V0.....73
Figura 4.4 - Correlação de Pearson para os dados de campo de eletrorresistividade do ponto V0.....74
Figura 4.5 - (a) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente do ponto V1, sendo que as áreas de baixa resistividade são indicadas pelos círculos tracejados em preto, e (b) Radargrama obtido em V1 com antena de 200 MHz (seção Rad 1), sendo marcada a área onde há a atenuação do sinal (retângulo tracejado). A seta preta representa vazamento localizado previamente através de inspeção visual. 75
Figura 4.6- Radagrama obtido em V1 com antena de 200 MHz - (seção Rad 2) - A linha preta corresponde a hipérbole identificada como o limite da adutora. 76
Figura 4.7 - (a) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente do ponto V2, sendo que as áreas de baixa resistividade são indicadas pelos círculos tracejados em

preto, e (b) Retângulos tracejados em preto indicam atenuação de sinal. O retângulo pontilhado em vermelho indica o local onde foi necessário colocar galhos para que fosse possível atravessar a água presente no local. A seta preta representa vazamento localizado previamente. (c) Aquisição de dados no local onde a água escoava. 77
Figura 4.8 - Radagrama obtido em V2 com antena de 200 MHz (seção R10) – em cima do talude da adutora. 78
Figura 4.9 - Curva granulométrica dos solos coletados em V1 e V2 79
Figura 4.10 - Mapa da localização do município de Nova Lima - Minas Gerais 84
Figura 4.11 - Perfil da adutora de água tratada 86
Figura 4.12 - Geometria da adutora 86
Figura 4.13 Resistividade aparente na superfície, e a 1 e 2 metros de profundidade obtida através da simulação utilizando a malha *finer* 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Métodos Geofísicos.....19
Tabela 2.1 Índice de perdas na distribuição dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2016, segundo tipo de prestador de serviços, região geográfica e Brasil 25
Tabela 3.1 - Coletas de campo realizadas, com suas respectivas datas, objetivos e número de perfis realizados 48
Tabela 3.2 - Configurações utilizadas para coleta de dados com o GPR 52
Tabela 3.3 - Condutividade e permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação numérica 58
Tabela 4.1 - Coletas de campo realizadas, com suas respectivas datas, objetivos e número de perfis realizados 66
Tabela 4.3 - Configurações utilizadas para coleta de dados com o GPR 68
Tabela 4.3 - Teor de Umidade dos solos coletados em V1 e V2.....78
Tabela 4.4 - Condutividade e permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação numérica 87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
AAT	Adutora de Água Tratada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
ERT	*Electrical Resistivity Tomography* (Tomografia Elétrica)
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GPR	*Ground Penetrating Radar* (Radar de Penetração no Solo)
IGC	Instituto de Geociências
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
m	Metro
m²	Metro quadrado
mA	Miliampère
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
mV	Milivolts
MVF	Método dos Volumes Finitos
PEP	Perfilagem Elétrica de Poços
PV	Poço de Visita
PVC	Policloreto de Polivinila
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
s	Segundo
S	Siemens
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SPRV	Sistema Produtor do Rio das Velhas
TDR	*Time Domain Reflectometry* (Reflectometria no Domínio do Tempo)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
V	Volts

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa
β	Beta
σ	Condutividade elétrica (S/m)
I	Corrente elétrica (mA)
J_o	Densidade de corrente (A/m²)
$\vec{J}$	Densidade de corrente de condução (A/m²)
ΔV	Diferença de potencial (mV)
K	Fator geométrico que depende da configuração de eletrodos
$\vec{E}$	Intensidade do campo elétrico (V/m)
λ	Lambda
Ω	Ohm
∇	Operador nabla
Φ	Phi
ψ	Psi
R	Resistência elétrica (Ω)
ρ	Resistividade elétrica (Ω.m)
ρ_a	Resistividade elétrica aparente (Ω.m)
v	Velocidade (m/s)
c	Velocidade da luz no vácuo (m/s)
μ_r	Permeabilidade magnética relativa (H/m)
ε_r	Permissividade dielétrica relativa (F/m)
Θ	Theta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO 17
1.1 PERGUNTA DE PESQUISA 21
1.2 OBJETIVOS 21
1.2.1 OBJETIVO GERAL 21
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 22

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO TEÓRICA 23
2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 23
2.2 ELETRORRESISTIVIDADE 27
2.3 GPR 33
2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTACIONAIS APLICADOS PARA CAMPOS ELÉTRICOS 35
2.4.1. EQUAÇÕES QUE REGEM O PROBLEMA 36
2.4.2. SOFTWARES DISPONÍVEIS. 41

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA 42
3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM 42
3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTOS 42
3.3. ÁREA DE ESTUDO 44
3.4. COLETA DE DADOS EM CAMPO 47
3.4.1. ELETRORRESISTIVIDADE 47
3.4.2. GPR 51
3.5. COLETA E ANÁLISES DO SOLO 53
3.6. MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL 56
3.6.1 GEOMETRIA E CRIAÇÃO DA MALHA 56
3.6.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO 58
3.6.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA 58

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS 61
4.1. DETERMINAÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES DE CONCRETO ARMADO NÃO AFOGADAS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS 61
4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ELETRORRESISTIVIDADE PARA A DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES DE CONCRETO 82

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 90
5.1. CONCLUSÃO 90
5.2. TRABALHOS FUTUROS 91

REFERÊNCIAS 92

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água doce é percebida como um risco global sistêmico, o maior em termos de impacto potencial segundo o Fórum Econômico Mundial. A nível global e anualmente, há água doce suficiente para atender a essa demanda, mas as variações espaciais e temporais da demanda e disponibilidade de água são grandes. Isto leva à escassez de água em várias partes do mundo em épocas específicas do ano. Cerca de dois terços da população global (4,0 bilhões de pessoas) vivem em condições de escassez severa de água pelo menos 1 mês do ano (KUMMU et al., 2016; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2016).

No Brasil, em 2014, a região sudeste do país passou a sofrer com a diminuição do nível dos reservatórios de água. Isto trouxe várias consequências para os brasileiros desta região, tanto econômicas quanto sociais e ambientais, como por exemplo, problemas na geração de energia elétrica, no abastecimento público e no aumento da quantidade de focos de queimadas (NOBRE et al., 2016) . Além disso, quando se trata de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, há uma grande quantidade de água perdida por vazamentos nas redes de distribuição de água urbana, perdas de água real, e de volumes de água distribuídos sem faturamento - perdas de água aparente (FALLIS et al., 2011).

Essas redes de distribuição de água são construídas para fornecer constantemente água em quantidade suficiente aos usuários com uma pressão e qualidade aceitáveis da forma mais econômica possível. Dessa forma, uma vez que os componentes individuais de um sistema podem falhar, os sistemas de distribuição de água são projetados com uma grande margem para que o sistema possa funcionar adequadamente mesmo quando alguns componentes individuais (por exemplo, tubos, válvulas ou bombas) estão fora de serviço (MAYS, 1996).

Estudos como o de Nascimento et al. (2007) mostram as incertezas e os potenciais riscos para as águas urbanas nas cidades brasileiras. Segundo os autores, o sistema de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), localizada no estado de Minas Gerais - Brasil, por exemplo, apesar de apresentar altos padrões de qualidade da água e de operação ainda possui elevados números de perdas de água dentro do sistema de distribuição.

A perda de água ocorre em todos os sistemas de distribuição, apenas o volume de perda varia. O volume das perdas dependerá das características da rede de tubulações, do nível de tecnologia e conhecimento aplicados para o controle dos vazamentos, dentre outros fatores. O volume perdido varia muito de país para país e entre regiões de cada país (FARLEY; TROW, 2003). Em países desenvolvidos essas perdas tendem a ser pequenas, como por exemplo na Holanda, onde a perda varia de 3 a 7% do volume tratado (PUUST et al., 2010). Já em países em desenvolvimento, este número pode chegar a metade do volume de água tratada (HUNAIDI; WANG, 2006, PUUST et al., 2010).

De acordo com Hamilton e Charalambous (2013), um controle de perda de água eficiente e eficaz deve ser reconhecido como uma prioridade para melhorar o fornecimento de água potável. Segundo Hunaidi e Wang (2006) e Cataldo et al. (2017), a localização de vazamentos em tubos subterrâneos é uma das etapas cruciais para a otimização do uso de recursos hídricos, uma vez que estes vazamentos são os maiores componentes de perda na distribuição.

Neste trabalho, o conceito de vazamento utilizado será o de abertura ou local, por onde a água escorre ou vaza. Diversos tipos de vazamentos (inerentes, visíveis e não visíveis) podem ocorrer em tubulações, e por isso, existem também diversas formas de detectar e analisar cada tipo de vazamento. Dentre os principais métodos de detecção destacam-se o de balanço de massa e volume, os acústicos, os visuais, dentre outros (SANDBERG et al., 1989).

O comprimento total da malha de distribuição de água, incluindo adutoras e redes distribuidoras, no Brasil é de 626.272,23 km de extensão, considerando apenas os prestadores de serviços participantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, de acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos publicado em fevereiro de 2018 (BRASIL, 2018). O sistema de abastecimento de água possui uma variedade de arranjos. O sistema clássico é composto por: captação, adução, tratamento, reservação e distribuição, sendo as adutoras tubulações de grandes diâmetros (maiores que 50 cm) que tem o objetivo de transportar a água dentro do sistema. O tamanho da população a ser atendida é que determina o porte destes sistemas (HELLER; PÁDUA, 2010).

No Brasil, o consumo médio de água no ano de 2016 foi de 154,1 litros por habitante ao dia. Por sua vez, a média nacional de perdas na distribuição de água

alcançaram 38,1%, no mesmo ano (BRASIL, 2018). Considerando que a estimativa da população do ano de 2016 foi de aproximadamente 206 milhões de pessoas, tem-se que por dia foram consumidos aproximadamente 32 bilhões de litros de água por dia, e que dessa quantidade cerca de 12 bilhões de litros foram perdidos na distribuição diariamente.

De forma a identificar com precisão os locais passíveis de perdas em adutoras, o presente trabalho pretende empregar métodos geofísicos. Estes métodos vêm ganhando força como forma de auxiliar nas tomadas de decisões ligadas à engenharia. Tais métodos possuem como princípio geral obter de forma não invasiva informações acerca da subsuperfície analisada, isto é, dados das camadas que se encontram abaixo da superfície investigada (SAMOUËLIAN et al., 2005; AYLSWORTH et al., 2016).

Segundo Kearey, Brooks e Hill (2009), os métodos geofísicos podem ser divididos em dois grandes grupos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra, e aqueles que envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente. Dentro de cada grupo existe uma ampla gama de métodos de levantamentos (Tabela 1.1) e para cada um, há uma propriedade física relacionada à qual o método é sensível.

Tabela 1.1 Métodos Geofísicos

Método	**Parâmetro medido**	**Propriedades físicas relacionadas**
Gravitacional	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética e remanência
Sísmico	Tempos de percurso de ondas elástico acústicas refletidas/refratadas	Densidade e módulos elásticos, os quais determinam a velocidade de propagação de ondas sísmicas
Elétrico		
Resistividade	Resistência da Terra	Condutividade elétrica
Polarização induzida	Voltagens de polarização ou resistência do solo dependente da frequência	Capacitância elétrica
Potencial espontâneo	Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético	Resposta às radiações eletromagnéticas	Condutividade e indutância elétricas
Radar	Tempos de percurso de pulsos de radar refletidos	Constante dielétrica

OBS.: Os métodos da gravitacionais, magnéticos e de potencial espontâneo utilizam os campos naturais da Terra, os demais utilizam campos artificiais.

Fonte: (KEAREY et al., 2009)

Os principais métodos utilizados para detecção de vazamentos, de acordo com Hunaidi e Wang (2006) e com Colombo, Lee e Karney (2009), são os métodos acústicos, onde destacam-se a utilização de dispositivos de escuta e a correlação dos ruídos de vazamentos; e os métodos não acústicos, no qual se destaca o uso do radar de penetração do solo (GPR). Além destes, a inspeção física também é bastante utilizada. Ela, embora pouco sistemática, é uma abordagem bastante utilizada. Nesta análise utiliza-se da observação, análise sobre a superfície do solo e o crescimento anômalo da vegetação para inferir se há indícios ou não de vazamentos de água.

Os métodos acústicos utilizam sensores de vibração ou hidrofones, que são temporariamente ou permanentemente conectados às tubulações. Esse método identifica o som ou vibrações induzidas pela água que sai a partir da tubulação sob pressão (KHULIEF et al., 2012). Ou seja, para os métodos acústicos serem utilizados na detecção de vazamentos, as tubulações devem ser pressurizadas. Por sua vez, o *GPR* examina a subsuperfície enviando impulsos eletromagnéticos de alta frequência para o subsolo. A localização dos vazamentos se dá através dos estudos de padrões de perturbação apresentados nos radagramas (LAI et al., 2016).

Dentre os outros métodos geofísicos destaca-se também a técnica da eletrorresistividade, que vem sendo empregada nos estudos sobre águas subterrâneas, aplicações em engenharia civil e investigações ambientais. Ela consiste na injeção de corrente elétrica no solo e nas medições das diferenças de potencial resultantes. Para tanto, são utilizados quatro eletrodos, dois para a injeção da corrente elétrica (eletrodos de corrente) e dois para medir as diferenças de potencial resultantes (eletrodos de potencial), que são fixados no solo (SAMOUËLIAN et al., 2005).

As relações entre corrente elétrica, potencial elétrico e disposição geométrica dos eletrodos (arranjo dos eletrodos) no terreno permitem calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. Há diversas formas de arranjos de eletrodos, Wenner, Dipolo-Dipolo, dentre outros. Cada arranjo possui padrões de sensibilidade diferentes, ou seja, cada arranjo é ideal para um tipo de situação. (SAMOUËLIAN et al., 2005). Como exemplo de estudos práticos envolvendo a eletrorresistividade, pode-se citar o de Binley, Daily e Ramirez (1997) que aplicaram a eletrorresistividade na avaliação da integridade de geomembranas e o estudo de Jordana, Gasulla e Pallàs-Areny (2001)

que utilizaram o método da tomografia elétrica para detectar vazamentos em tubulações enterradas.

Assim, o objetivo deste trabalho é detectar vazamentos em uma adutora de água tratada localizada na cidade de Nova Lima, no estado de Minas Gerais, por meio da técnica geofísica da eletrorresistividade, e verificar a precisão e eficiência dessa detecção através de simulação matemática computacional.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

Qual a precisão da eletrorresistividade na detecção de vazamentos de água em adutoras de concreto?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar precisão da detecção de vazamentos de água em adutoras de concreto por meio de método da eletrorresistividade, utilizando dados obtidos em ensaios de campo e simulações numéricas computacionais e realizando contraprovas por meio de inspeção *in loco* e radagramas de GPR.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter informações de localização de vazamentos em uma adutora de água tratada utilizando o método do caminhamento elétrico;
- Elaborar um modelo para simulação da detecção de vazamentos em uma adutora utilizando o método dos elementos finitos;
- Realizar análises físicas do solo presente na área estudada, para auxiliar na análise dos resultados obtidos em campo;
- Investigar as limitações do uso da eletrorresistividade, quanto ao tamanho e profundidade do vazamento, e quanto a diferentes contrastes elétricos do solo (seco e úmido), para a detecção de vazamentos em adutoras de água;
- Comparar a precisão e eficiência da eletrorresistividade em relação aos resultados obtidos com o GPR;

- Analisar diferentes cenários de simulação, variando parâmetros como o arranjo dos eletrodos, o tipo e as propriedades dos materiais utilizados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que no primeiro foi apresentada uma breve introdução sobre o tema, bem como a pergunta de pesquisa que norteou o desenvolvimento do trabalho e os objetivos, geral e específico.

No capítulo 2 tem-se a revisão teórica do tema estudado. Nele são descritos os principais conceitos e informações importantes para o entendimento do que foi realizado no decorrer da pesquisa. Dessa forma, o capítulo que é dividido em subitens, tratará de temas como o sistema de abastecimento de água, em especial os vazamentos existentes nas tubulações destinadas a este fim; os métodos geofísicos estudados para a detecção destes vazamentos, onde será enfocado a eletrorresistividade e o GPR; e a simulação numérica como forma de estudar auxiliar na detecção destes vazamentos.

No capítulo 3 será apresentada a metodologia do trabalho. Assim, tem-se os métodos de abordagem e procedimentos adotados, bem como a descrição do local de estudo, e como foram realizadas as coletas de dados e suas análises. Além de mostrar todos os passos da modelagem numérica computacional realizada.

O capítulo 4 está dividido em duas seções, sendo que cada uma representa uma sumarização da pesquisa considerando a possível publicação da mesma. A primeira seção trata da “*Determinação de vazamentos em tubulações de concreto armado não afogadas através da utilização de métodos geofísicos*”, já a segunda aborda o tema da “*Simulação numérica da eletrorresistividade para a detecção de vazamentos em tubulações de concreto*”. Ambas as partes apresentam os resultados e discussão, bem como a metodologia específica do tema proposto.

No capítulo seguinte apresenta-se a conclusão do trabalho, onde também são pontuadas as limitações e dificuldades para a realização do mesmo.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de abastecimento de água é o conjunto de obras, equipamentos e serviços que visam a disponibilização de água potável para a população de determinado local. Este sistema pode ser projetado de diversas formas e ser um sistema isolado ou integrado (Figura 2.1), mas de maneira geral, é composto por: captação, adução, tratamento, reservação e distribuição. O que determina o porte destes sistemas é o tamanho da população que será atendida (TSUTIYA, 2006; HELLER; PÁDUA, 2010).

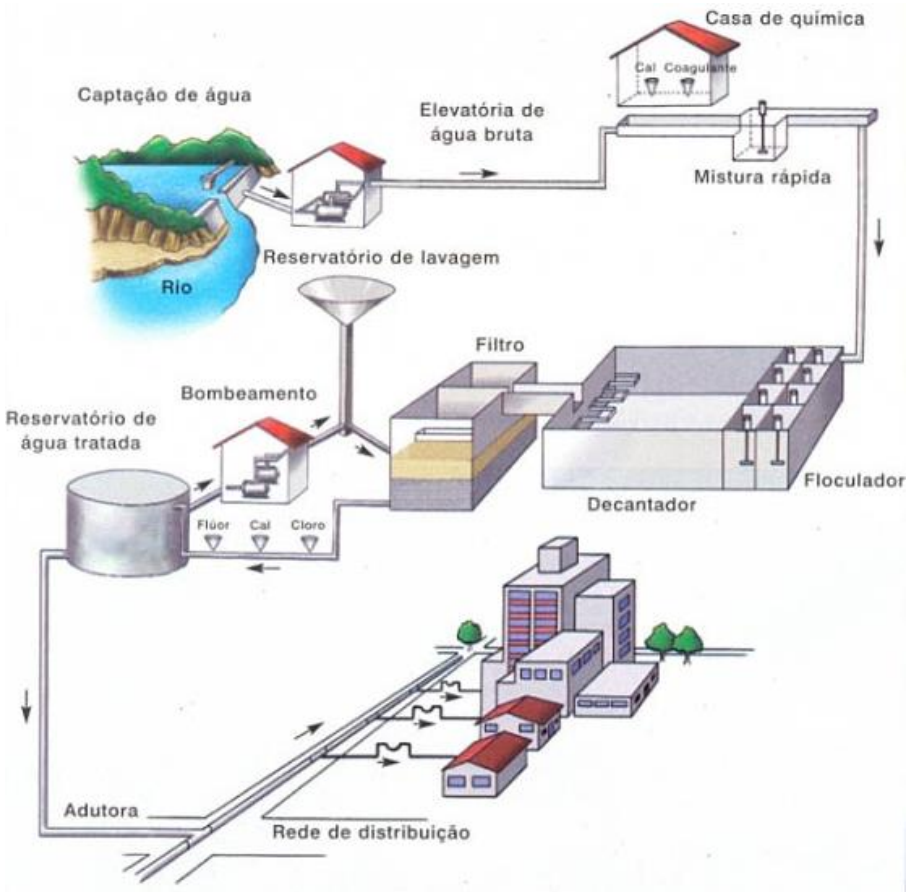


Figura 2.1 - Esquema de um sistema convencional de abastecimento de água
FONTE: (COPASA, 2018)

O abastecimento de água por meio de canalizações deve atender no meio urbano todas as necessidades de uso da água de uma comunidade, dentre eles, o consumo doméstico, uso comercial, industrial e público. Assim, como usuário, o setor

de abastecimento de água possui prioridade em relação aos demais setores da economia. Entretanto, isto não quer dizer que ele não seja obrigado a manter um uso criterioso do recurso natural, contribuindo para a disponibilidade hídrica para os outros setores e para a manutenção da vida aquática (TSUTIYA, 2006; HELLER; PÁDUA, 2010).

Além da quantidade, para a água ser consumida pela população também deve ser de qualidade. Mas, devido ao uso múltiplo que a água possui, o conceito de "qualidade da água" deve ser relativizado de acordo com o uso a que se destina. Essa qualidade é representada por meio de diversos parâmetros, que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas da água. No Brasil, os padrões de qualidade de água são definidos pela Portaria nº 2.914 de 2011, do Ministério da Saúde (Padrão de potabilidade), e pelas Resoluções CONAMA nº 357 e nº 430, de 2005 e 2011, respectivamente, do Ministério do Meio Ambiente (Padrão de corpos d'água e de lançamento) (VON SPERLING, 2005).

Segundo Heller e Pádua (2010), mesmo considerando a disponibilidade hídrica contida na legislação, deve-se utilizar a água da melhor maneira possível, ou seja, deve-se evitar os desperdícios e as perdas. O primeiro está ligado ao mau uso do recurso, já o segundo, está ligado à gestão do sistema.

As perdas são caracterizadas como ineficiências técnicas e estão presentes em qualquer sistema de abastecimento de água. Entretanto, quando são elevadas, representam desperdício de recursos naturais, operacionais e de receita para o prestador de serviços (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), 2010; BRASIL, 2018).

De acordo com Copasa (2003), Agência Nacional de Águas (Brasil) (2010) e Brasil (2018) , perda de água é toda perda real ou aparente que determina aumento do custo de funcionamento ou que impeça a realização plena da receita operacional. Essas perdas acontecem por vazamentos em adutoras, redes, ramais, conexões, reservatórios e outras unidades operacionais do sistema. Estes vazamentos estão associados à qualidade dos materiais utilizados, à idade das tubulações, à qualidade da mão-de-obra e à ausência de programas de monitoramento de perdas, dentre outros fatores. Segundo a Fundação Nacional de Saúde, FUNASA, (2014), os vazamentos em tubulações são classificados em: inerentes, não visíveis e visíveis.

Para cada um deles existem também formas distintas de se detectar e analisar o problema (Figura 2.2).

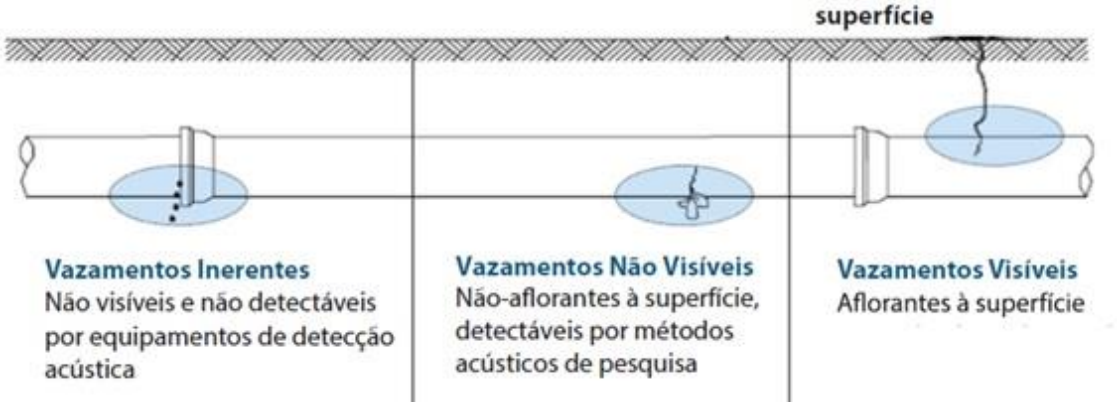


Figura 2.2 - Tipos de vazamentos de acordo com a FUNASA.
FONTE: (FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (BRASIL), 2014) Adaptado

No Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) calcula indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água segundo três escalas diferentes: Percentual; Litros por ligação ao dia; e Metros cúbicos por quilômetro de rede ao dia. Para o ano de 2016, a média de perdas no Brasil é de 38,1%. Ressalta-se, entretanto, que existe uma grande variação de perdas de acordo com regiões do país e com o tipo de prestadora do serviço de distribuição. Por exemplo, a porcentagem de perdas totais da região norte é 47,3%, o que faz dela a região cujo percentual de perdas é o maior do país, já a região sudeste é a que possui o menor índice de perdas totais no Brasil, 34,7% (tabela 2.1) (BRASIL, 2018).

Tabela 2.1 Índice de perdas na distribuição dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2016, segundo tipo de prestador de serviços, região geográfica e Brasil

Região	Tipo de prestador de serviços					Total (%)
	Regional (%)	Microrregional (%)	Local Direito Público (%)	Local Direito Privado (%)	Local Empresa Privada (%)	
Norte	52,8	-	35,5	-	44,2	47,3
Nordeste	47,3	-	38,8	26,5	63,1	46,3
Sudeste	33,0	35,4	39,1	31,5	37,2	34,7
Sul	37,0	26,1	32,8	47,8	40,8	36,3
Centro-Oeste	33,2	45,4	35,6	-	40,6	35,0
Brasil	**38,1**	**34,9**	**37,6**	**34,4**	**40,8**	**38,1**

FONTE: (BRASIL, 2018)

Os vazamentos em tubulações do sistema de abastecimento de água trazem diversas consequências, que vão desde a má utilização da água como recurso natural até o aumento do uso de energia nas estações de tratamento (BRASIL, 2018). Outros

problemas relacionados aos vazamentos são as possíveis brechas na qualidade da água transportada, devido a entrada de contaminantes através das fugas de água, como aponta Hunaidi e Wang (2006); e a formação de crateras e deslizamentos de terra, como mostra Zhou et al. (2014) e Sevil et al. (2017). Dessa forma é de fundamental importância a detecção e o reparo destes vazamentos nas tubulações do sistema de abastecimento de água.

Existem uma variedade de técnicas de detecção de vazamentos comerciais disponíveis, desde a simples inspeção física até aqueles mais sofisticados que utilizam equipamentos específicos (COLOMBO et al., 2009). Os métodos de detecção mais utilizados, que envolvem geofísica para a detecção destes vazamentos em tubulações de água são: as técnicas acústicas, pois o fluido que sai de um vazamento gera oscilações de alta freqüência na parede das tubulações pressurizadas; e as técnicas eletromagnéticas, como o uso dos radares de penetração no solo, que detectam pontos de alta impedância elétrica ao longo da tubulação, ou o aumento da constante dielétrica da região causada pela água que sai pelo vazamento (HUNAIDI; WANG, 2006; COLOMBO; LEE; KARNEY, 2009).

Existem diversos estudos recentes sobre a detecção de vazamentos em tubulações de água utilizando métodos geofísicos. Dentre eles, destacam-se o de Cataldo et al. (2014), que analisaram três técnicas de detecção, a reflectometria no domínio do tempo (*time domain reflectometry* – TDR), o radar de penetração no solo (GPR) e a tomografia elétrica (*electrical resistivity tomography* – ERT). O estudo de Atef et al. (2016), que utiliza-se de duas técnicas combinadas para a detecção de vazamentos, o GPR e a fotografia por infravermelho (*infrared photography* – IR). O de Lai et al., (2016), onde se estudou padrões de perturbação das imagens de GPR como uma ferramenta para a detecção de vazamentos em tubulações de água enterradas. E, o estudo de Bach e Kodikara (2017), que estudaram a confiabilidade da termografia infravermelha (*infrared thermography*) na detecção de vazamentos em tubulações de água.

Além destes estudos, destaca-se também o de Jordana, Gasulla e Pallàs-Areny (2001), que utilizou o método da tomografia elétrica para detectar vazamentos de tubulações enterradas. Os pesquisadores utilizaram arranjos de eletrodos dipolo-dipolo e Schlumberger modificado, locados na superfície e perpendicular ao eixo da

tubulação (de aço inoxidável e de policloreto de polivinila - PVC), para a aquisição dos dados.

2.2 ELETRORRESISTIVIDADE

A resistência elétrica (*R*) é a oposição interna do material à circulação de cargas. Ela depende do tipo de material, do comprimento, da área da seção deste material e da temperatura. Cada material possui sua resistência específica, denominada resistividade (ρ). Deste modo, a resistividade elétrica é o recíproco da condutividade, ou seja, um material que tem uma resistividade elevada terá uma condutibilidade baixa, e vice-versa (CREDER, 2007).

A eletrorresistividade é um método geoelétrico. Seu princípio consiste na determinação da resistividade elétrica dos materiais e rochas presentes na subsuperfície. Neste método, correntes elétricas, contínuas ou alternadas de baixa frequência, são injetadas no solo artificialmente através de um par de eletrodos, e as diferenças de potencial resultantes são medidas através de outro par de eletrodos. (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; BRAGA, 2016; AYLSWORTH et al., 2016).

O objetivo dos levantamentos de resistividade elétrica é determinar a distribuição de resistividade, ρ [Ω.m], do volume de solo que está sendo estudado. Utilizando a Lei de Ohm e a geometria dos eletrodos é possível calcular a resistividade. Além disso, os padrões de diferença potencial, ΔV, obtidos fornecem informações sobre a estruturação da subsuperfície e a forma de heterogeneidades subsuperficiais (por exemplo, a existência de uma rocha diferente em determinado ponto da subsuperfície ou a influência do nível freático), e de suas propriedades elétricas. Quanto maior o contraste elétrico entre a matriz do solo e a heterogeneidade, mais fácil será a detecção desta heterogeneidade (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; SAMOUËLIAN et al., 2005).

A resistividade elétrica do solo é uma função que leva em consideração vários fatores, como a natureza dos constituintes sólidos, arranjo de vazios, grau de saturação de água, resistividade elétrica da água presente no solo, e temperatura. Esses parâmetros afetam a resistividade elétrica, mas de maneiras diferentes e em diferentes graus (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; SAMOUËLIAN et al., 2005; AYLSWORTH et al., 2016).

De acordo com Kearey; Brooks; Hill, (2002), Borges, (2007) e Braga (2016), a propagação da corrente elétrica injetada no solo apresentará uma forma semiesférica

a partir do ponto de origem da injeção, desde que a subsuperfície seja homogênea e isotrópica (figura 2.3). Essa corrente pode ser propagada no meio de diferentes formas: por condução eletrônica, eletrolítica e dielétrica.

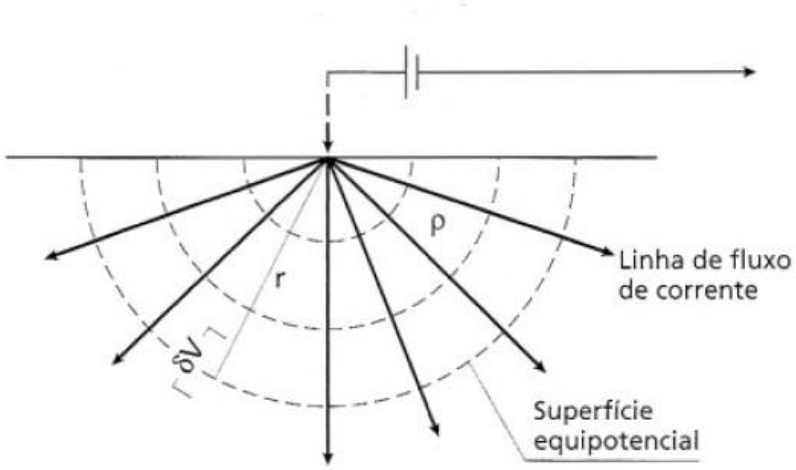


Figura 2.3 - Fonte de corrente pontual em um meio homogêneo isotrópico.
FONTE: (KEAREY et al., 2009)

As variáveis existentes quando se realiza uma investigação elétrica por injeção de corrente são: as dimensões do material que será percorrido pela corrente elétrica, que será variável de acordo com a localização dos pontos de injeção desta corrente; e a heterogeneidade do meio. Assim, para relacionar os resultados obtidos utilizando a eletrorresistividade com o que está em subsuperfície é necessário: conhecer a geologia local em termos estratigráficos; ter em mente a localização geográfica da área estudada e; conhecer valores típicos da resistividade dos materiais que se supõe encontrar com a investigação geofísica (Figura 2.4) (LOKE, 2000; BORGES, 2007; BRAGA, 2016).

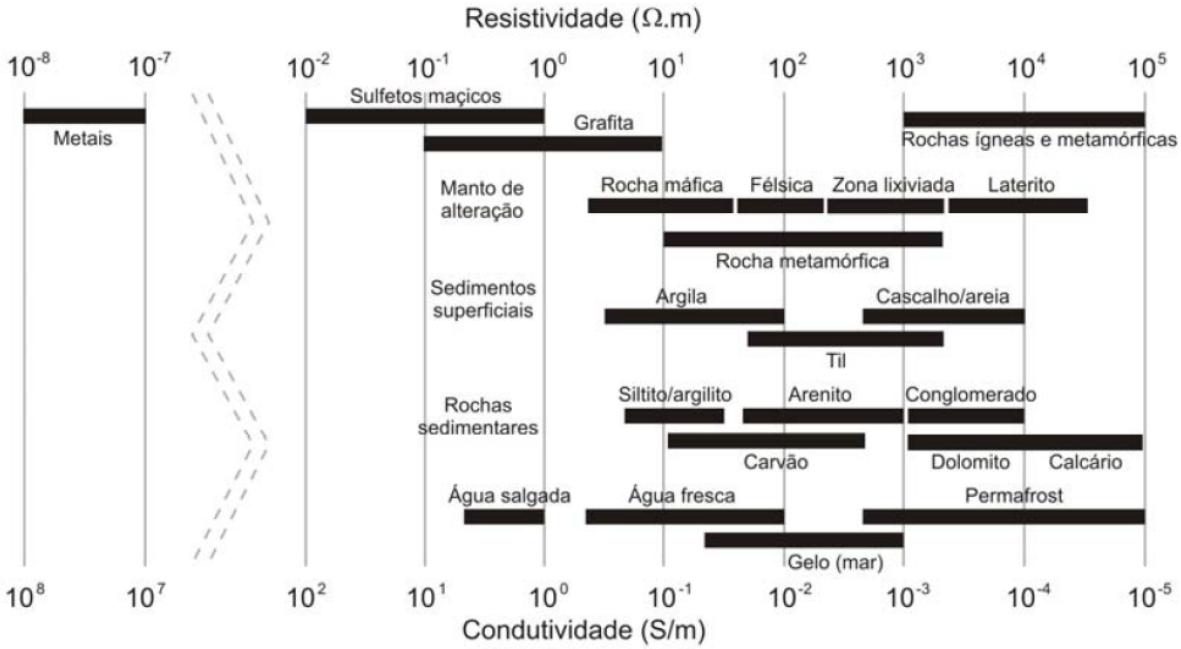
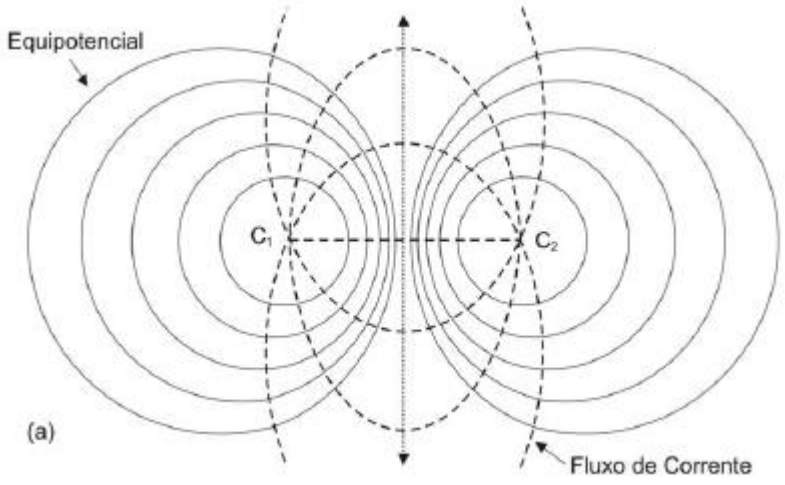


Figura 2.4 - Intervalos de resistividade/condutividade elétrica de algumas rochas e materiais
FONTE: (BORGES, 2007)

A configuração usual, utilizada para aquisição dos dados, consiste na utilização de quatro eletrodos ($C_1P_1P_2C_2$). Nesta configuração, um par de eletrodos é responsável por introduzir a corrente elétrica no solo, (eletrodos de corrente, C_1 e C_2) enquanto o outro par faz a medição da diferença de potencial, ΔV, (eletrodos de potencial, P_1 e P_2) estabelecida entre eles (Figura 2.5) (DAHLIN; ZHOU, 2004; BORGES, 2007).



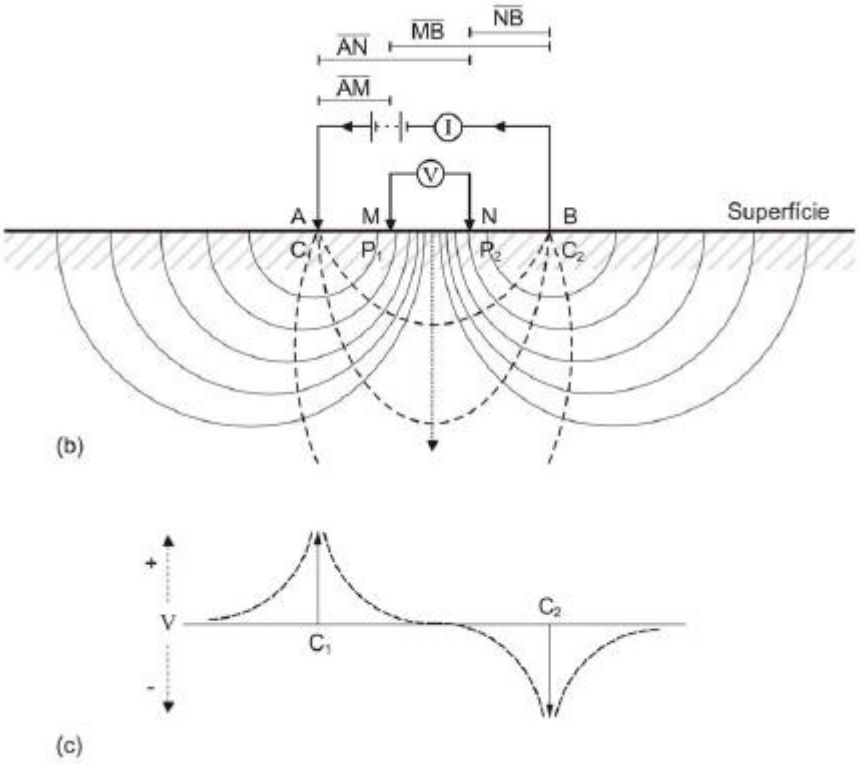


Figura 2.5 - Linhas, de fluxo de correntes (linha tracejada) e equipotenciais (linha sólida), para dois eletrodos de corrente em um meio homogêneo. (a) representa a vista no plano do fluxo de correntes e equipotenciais, (b) é o perfil vertical e (c) a variação do potencial na superfície.
FONTE: (TELFORD et al., 1990a)

No método da eletrorresistividade há várias técnicas de aquisição de dados. As mais comuns são a Tomografia Elétrica (TE), também conhecida como Caminhamento Elétrico; a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e; a Perfilagem Elétrica de Poços (PEP). Cada técnica é indicada para determinadas aplicações, como por exemplo, quando se deseja identificar variações laterais da resistividade, utiliza-se o Caminhamento Elétrico, mas quando se deseja observar a variação vertical da resistividade, pode-se utilizar a SEV, técnica onde se usam apenas 4 eletrodos (BORGES, 2007; AYLSWORTH et al., 2016).

Além das várias técnicas de aquisição, os pares de eletrodos também podem ser arranjados de diferentes formas, cada uma com sensibilidades diferentes (Figura 2.6). É importante ressaltar que a sensibilidade da aquisição está relacionada ao arranjo enquanto que a resolução dos dados coletados está vinculada a estruturação da subsuperfície. Assim, a escolha dos arranjos e das técnicas utilizadas depender do que se deseja visualizar na subsuperfície (DAHLIN; ZHOU, 2004).

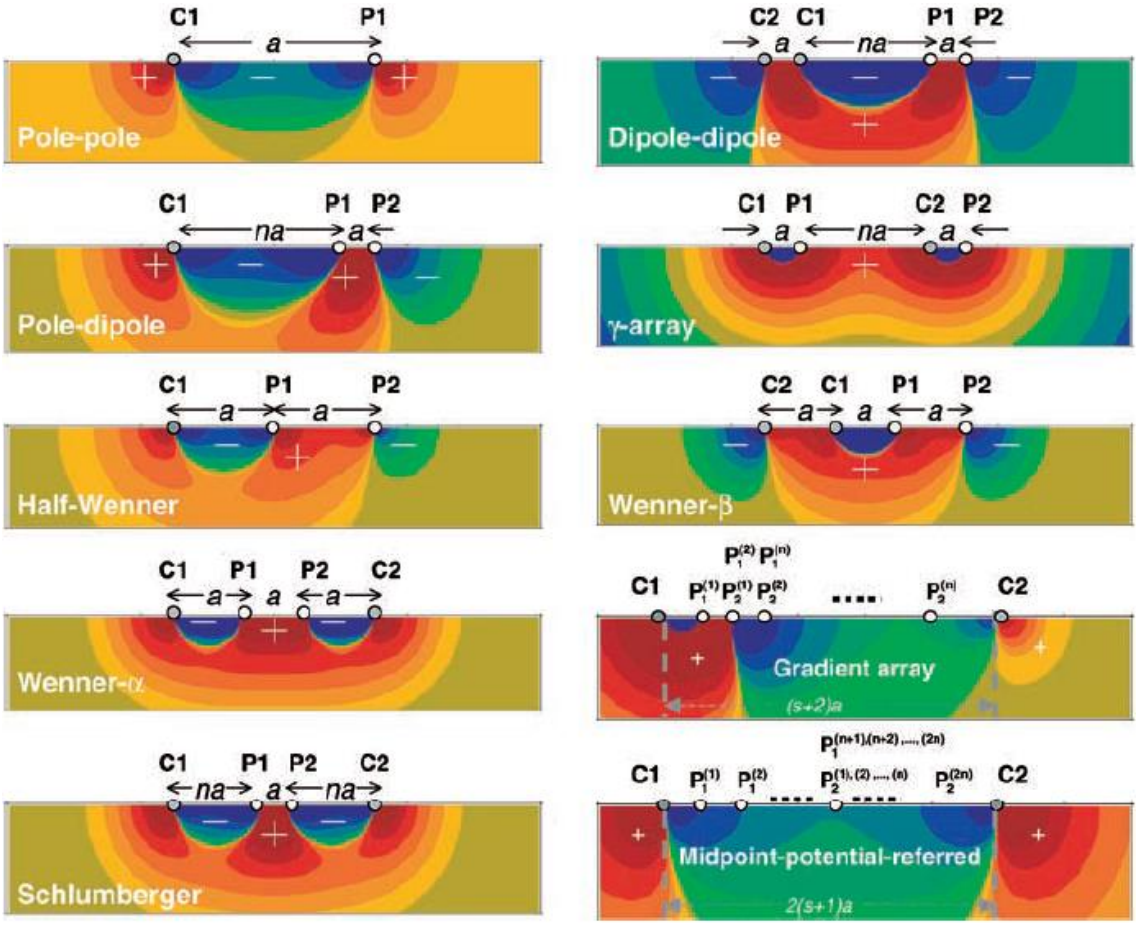


Figura 2.6 - Diagramas esquemáticos de diferentes arranjos de elétrodos e os seus padrões de sensibilidade para levantamentos de resistividade 2D. Na figura, C_1 e C_2 são os elétrodos de corrente positivo e negativo, respectivamente. P_1 e P_2 são dois eletrodos de potencial. As letras a e n são os parâmetros que controlam o espaçamento e o espaçamento máximo dos arranjos. Os padrões de sensibilidade mostrados são apenas um exemplo de cada uma das combinações indicadas, e nestes padrões, as cores quentes e o sinal positivo representam a região onde o modelo terá maior resolução, já as cores frias e o sinal negativo indicam onde a resolução será menor.
FONTE: (DAHLIN; ZHOU, 2004)

Segundo Dahlin e Zhou (2004), os arranjos γ-arranjo e Wenner-α são menos contaminados por ruído do que os outros conjuntos. Já os arranjos polo-dipolo, dipolo-dipolo e o arranjo de múltiplo gradiente podem produzir imagens com melhor resolução do que γ-arranjo, polo-polo, Wenner-α e Wenner-β, embora sejam mais susceptíveis a contaminação de ruído. Para os autores, os arranjos de múltiplo gradiente, polo-dipolo, dipolo-dipolo e Schlumberger são recomendados para imageamento da resistividade 2D, onde a escolha final será determinada pela geologia do local, pelo objetivo do estudo e pelo ponto de vista logístico.

Como a subsuperfície não é um meio homogêneo, a resistividade obtida com a investigação elétrica será a média da resistividade do solo abaixo dos pontos das medidas efetuadas. Essa média é denominada resistividade aparente (ρ_a), sendo sua

unidade de medida no sistema internacional o ohm vezes metro (Ω.m). Ela reflete apenas as propriedades médias do meio por onde a corrente passou, e é expressa pela equação (BORGES, 2007; BRAGA, 2016):

$$\rho_a = \frac{\Delta V_{P1P2}}{I} . K \tag{2.1}$$

Onde, ΔV é a diferença de potencial [V]; *I* é a corrente elétrica [A], e *K* um fator geométrico que é dado pela equação EQ 2.2 no caso do arranjo dipolo-dipolo (figura 2.7):

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\overline{C_1P_1}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{P_1C_2}}\right) - \left(\frac{1}{\overline{C_1P_2}}\right) + \left(\frac{1}{\overline{P_2C_2}}\right)} \tag{2.2}$$

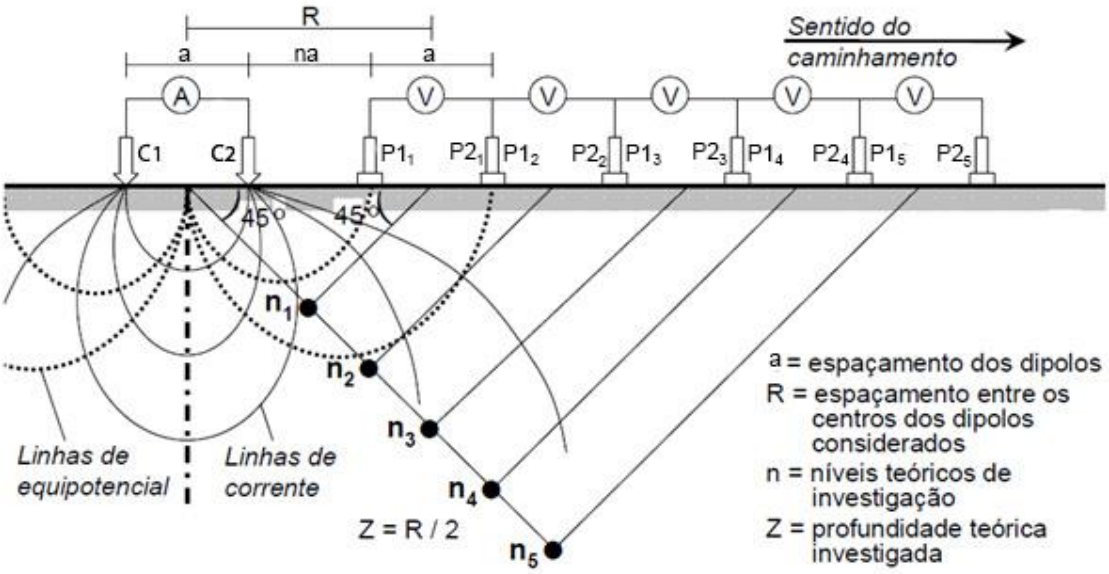


Figura 2.7 - Arranjo de campo Dipolo-Dipolo
FONTE: BRAGA, 2016 (Adaptado)

Além disso, a resolução espacial e a profundidade de penetração de uma matriz de elétrodos estão relacionadas com o espaçamento de base e a separação máxima dos elétrodos, mas também à distribuição de resistividade subsuperficial. Resolução diminui com o aumento da profundidade de exploração (DAHLIN; ZHOU, 2004; AYLSWORTH et al., 2016).

Os dados do caminhamento elétrico coletados são tipicamente plotados em seções de pseudoprofundidade, onde pontos de imagem correspondem a posição lateral dos eletrodos e a profundidade aproximada da investigação. A interpretação dos resultados requer a inversão dos valores de resistividade aparente e, através de um processo iterativo, é calculado um modelo que melhor se adapta às medições. Essa inversão é feita por meio de um modelo de partida, que pode ser baseado na resistividade aparente média do conjunto de dados ou em uma informação obtida a partir de sondagens ou outros dados geofísicos (AYLSWORTH et al., 2016).

2.3 GPR

O GPR é um dos métodos geofísicos classificados como eletromagnético (EM). Estes métodos são baseados na propagação de campos eletromagnéticos na subsuperfície (TELFORD et al., 1990b).

O GPR se constitui em uma técnica de reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência. Uma antena transmissora emite um pulso eletromagnético que é propagado no solo e que reflete em interfaces ou objetos que apresentam contraste de propriedades eletromagnéticas. As ondas refletidas são recebidas pela antena e gravadas para criar um perfil da subsuperfície, denominados radagramas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

As velocidades do pulso emitido são controladas pela constante dielétrica e pela condutividade da subsuperfície. Dessa forma, a velocidade de uma onda de radar (v) é dada por (EQ.2.3) (KEAREY et al., 2009):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \, \varepsilon_r}} \tag{2.3}$$

Onde:

c = velocidade da luz no vácuo (3 x 10^8 ms^{-1}),

μ_r = permeabilidade magnética relativa (H/m)

ε_r = permissividade dielétrica relativa (F/m)

A profundidade de penetração das ondas depende de sua frequência e da natureza do material pesquisado. Ressalta-se que como a permissividade da água é

alta, comparada com materiais secos, o conteúdo de água e a porosidade são importantes controles da penetração do pulso eletromagnético (KEAREY et al., 2009).

Há três modos básicos de organização de levantamentos GPR, a perfilagem de reflexão, a sondagem de velocidade e a transiluminação (figura 2.8).

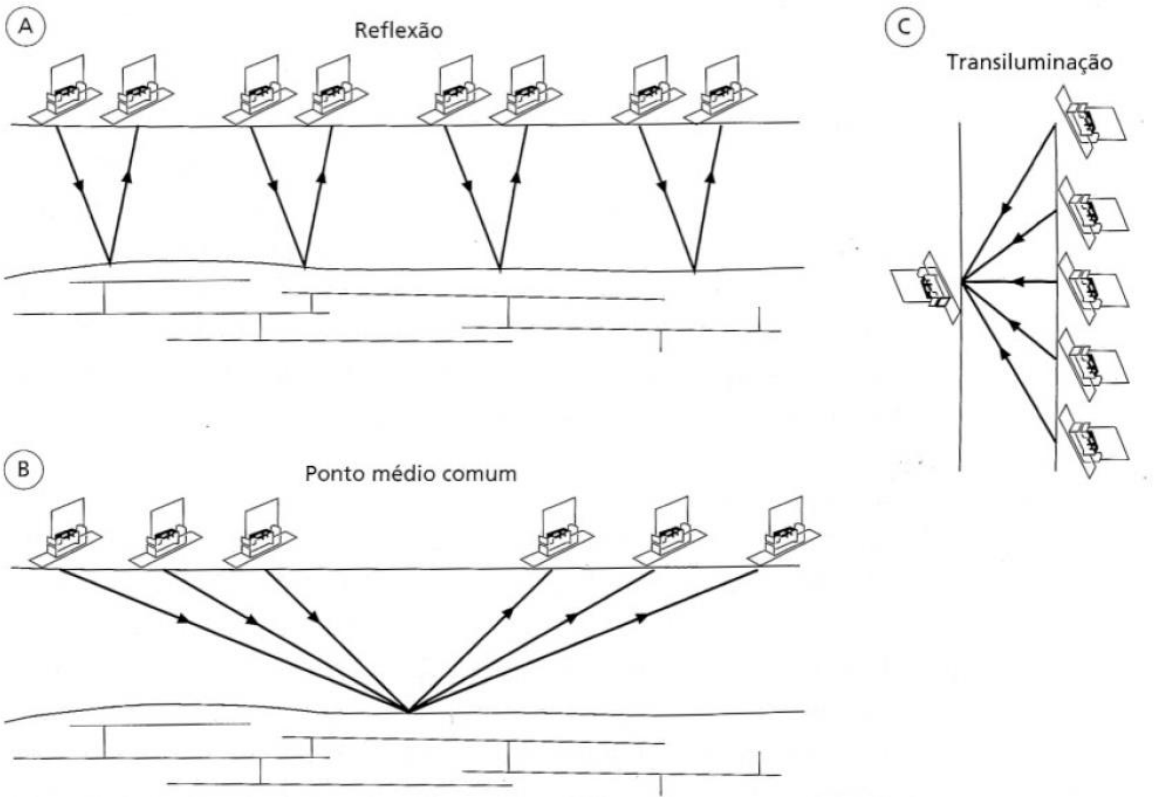


Figura 2.8 - Organização de levantamentos GPR. (a) Perfilagem de reflexão; (b) Sondagem de velocidade e; (c) Transiluminação.
FONTE: (KEAREY et al., 2009)

Após escolher o tipo de levantamento a ser realizado é necessário definir e ajustar os parâmetros como a frequência e espaçamento da antena, e a orientação das antenas e do perfil a serem utilizados na coleta de dados (POPINI et al., 2001).

Os vazamentos de água podem ser detectados inspecionando visualmente os perfis GPR gerados (ATEF et al., 2016) e, diferentemente da eletrorresistividade, existem diversos estudos sobre o uso do método em detecção de vazamentos de água. Dentre os estudos mais recentes que aplicam o GPR para detecção de vazamento, cita-se o de Ocaña-Levario et al. (2018), onde os autores utilizaram filtros de variância nos resultados obtidos com o GPR para localizar vazamentos de água em tubulações enterradas.

2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTACIONAIS APLICADOS PARA CAMPOS ELÉTRICOS

O desenvolvimento do computador permitiu uso de técnicas numéricas para a resolução de problemas complexos de engenharia e de física. Esses problemas podem ser analisados de três formas: métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório (GONÇALVES, 2007).

Para se analisar a questão desejada por meio de métodos numéricos, o ponto de partida deve ser a determinação de um modelo matemático. Esse modelo é um conjunto de equações diferenciais parciais e as condições de contorno que regem o problema. Depois de selecionado esse conjunto de equações, deve-se escolher um método de discretização apropriado, ou seja, um método de aproximá-las por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo (GONÇALVES, 2007).

Existem vários métodos de discretização conhecidos, dentre eles tem-se o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). O método utilizado neste trabalho será o dos elementos finitos. Esse método propõe que as infinitas variáveis desconhecidas sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Esses elementos possuem dimensões finitas, e são conectados entre si por pontos denominados de nós. Ao conjunto de elementos e nós dá-se o nome de malha (MOAVENI, 2014).

Malhas podem ser estruturadas, não estruturadas ou híbridas. As malhas estruturadas são caracterizadas por seus nós internos possuírem um número constante de elementos adjacentes. As não-estruturadas possuem nós internos com número de elementos adjacentes variável. Elas são, portanto, consideradas as mais flexíveis e ajustam-se melhor a problemas de geometria complexa, como por exemplo uma adutora (tubulação cilíndrica). Já as malhas híbridas é a combinação das malhas estruturadas e não-estruturadas (Figura 2.9) (BATISTA, 2005).

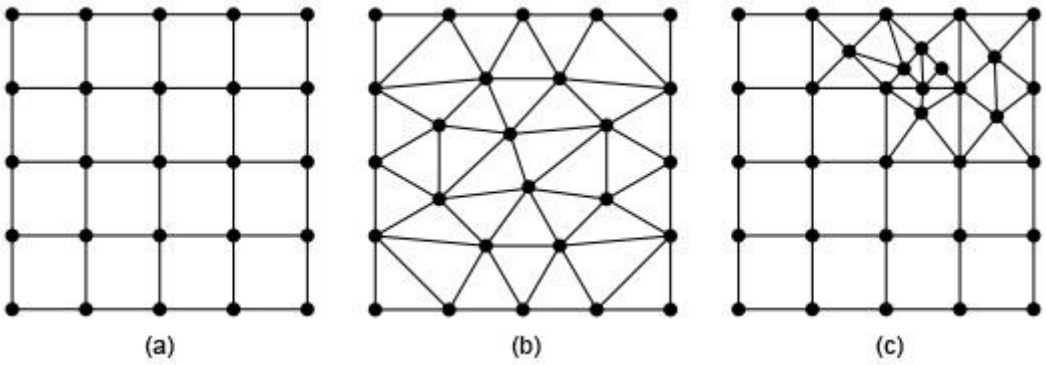


Figura 2.9 - Tipos de malhas (a) Estruturada; (b) Não-estruturada; (c) Híbrida.
FONTE: (BATISTA, 2005)

Os elementos mais frequentes em malhas estruturadas são quadriláteros e hexaedros. Em malhas não-estruturadas, triângulos e tetraedros prevalecem, mas é possível construí-las com quadriláteros, prismas, pirâmides e hexaedros (BATISTA, 2005).

2.4.1. EQUAÇÕES QUE REGEM O PROBLEMA

Sabe-se que a corrente elétrica (*I*), é o fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica quando existe uma diferença de potencial elétrico (ΔV) entre as extremidades. Quando há a oposição do material à circulação de cargas, tem-se a resistência elétrica (*R*). Cada material tem sua resistência específica própria, ou seja, sua resistividade (*ρ*) (CREDER, 2007).

Georg Simon Ohm estabeleceu a lei que inter-relaciona as grandezas diferença de potencial, corrente e resistência, que ficou conhecida como a Lei de Ohm.

$$\Delta V = R \times I \tag{2.4}$$

A Lei de Ohm também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\overrightarrow{E} = \rho \vec{J} \tag{2.5}$$

Onde

$\vec{J}$ é a densidade de corrente [A / m²]

ρ é a resistividade elétrica [Ω.m]

$\overrightarrow{E}$ é o intensidade do campo elétrico existente em um meio condutor [N/C]

O princípio de conservação da carga elétrica estabelece que o vetor densidade de corrente deve ser nulo em todo lugar do espaço, menos no ponto de injeção de

corrente, indicando que não há acúmulo de carga elétrica em seu interior (condição de divergência). Assim:

$$\nabla \times \vec{J} = 0 \tag{2.6}$$

O campo elétrico, do tipo conservativo, pode ser expresso pelo gradiente de uma função escalar (*V*) denominada potencial elétrico e definida de forma que $\vec{E}$ seja o seu gradiente.

$$\vec{E} = -\nabla \mathrm{V} \tag{2.7}$$

Sabe-se que o solo é quase sempre não homogêneo e essas não-homogeneidades podem assumir muitas formas. Ele é formado normalmente por várias camadas, que podem ser aproximadamente horizontais e paralelas à superfície ou podem ser inclinadas em um ângulo em relação à superfície. Além disso, o nível freático também atua como uma camada adicional, uma vez que o aumento no teor de umidade abaixo do nível freático resultará em uma mudança significativa na resistividade (TAGG, 1964).

Para apresentar as equações que regem o problema será considerado um solo com duas camadas. Uma superficial de resistividade ρ_1, de espessura *h*, sobrepondo uma segunda camada de resistividade ρ_2, que se estende até o infinito na direção descendente.

Se uma corrente entra em um ponto A na superfície, o problema resolve-se no cálculo do potencial em todos os pontos do solo, e quaisquer expressões para o potencial devem satisfazer as condições usuais que governam o fluxo de corrente em um meio semi-infinito.

Supondo V_1 como o potencial em qualquer ponto da camada superior e V_2 como o potencial em qualquer ponto da camada inferior, então ambos os potenciais devem satisfazer a equação de Laplace (EQ. 2.8)

$$\nabla^2 \mathrm{V} = 0 \tag{2.8}$$

Usando coordenadas cilíndricas (*r, θ, z*) a equação de Laplace se torna EQ. 2.9:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial r}\frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \tag{2.9}$$

Suponha que uma solução encontrada seja na forma

$$V = \phi(r)e^{\pm\lambda z} \tag{2.10}$$

Substituindo na equação (2.8), isso leva a

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\phi}{dr} + \lambda^2\phi = 0 \tag{2.11}$$

Esta é a equação de ordem zero de Bessel e as soluções clássicas são $J_0(\lambda r)$ e $Y_0(\lambda r)$, juntamente com qualquer combinação linear dessas funções com coeficientes constantes. Em particular, há as integrais de Hankel,

$$\int \theta(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda \tag{2.12}$$

e

$$\int \psi(\lambda)J_0(\lambda r)e^{+\lambda z}d\lambda \tag{2.13}$$

Tomadas entre limites fixos. Além disso, a solução fundamental $1 / R$ da equação de Laplace pode ser escrita na forma

$$\frac{1}{R} = \int_0^\infty J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda \tag{2.14}$$

Pode-se considerar que os potenciais V_1 e V_2 são constituídos por duas partes. O primeiro é o potencial que existiria se o solo fosse perfeitamente homogêneo de resistividade ρ_1. O segundo é uma função adicional que representa o efeito perturbador da camada inferior. Então os potenciais podem ser escritos pelas EQ. 2.15 e 2.16:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left(\int_0^\infty J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \theta_1(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \psi_1(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda\right) \tag{2.15}$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left(\int_0^\infty J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \theta_2(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \psi_2(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda\right) \tag{2.16}$$

As funções $\theta_1(\lambda)$, $\theta_2(\lambda)$ $\psi_1(\lambda)$ e $\psi_2(\lambda)$ são determinadas pelas condições de contorno. Na superfície *z = 0*, o fluxo de corrente será ao longo da superfície será dado pela EQ. 2.17.

$$\frac{dV_1}{dz} = 0 \tag{2.17}$$

Como z tende ao infinito, o valor de V_2 tenderá a zero. Além disso, na interface $z = h$, o potencial em ambas as camadas deve ser o mesmo, ou seja, $V_1 = V_2$ quando $z = h$. O fluxo de corrente também deve ser o mesmo em ambos os lados da interface:

$$\frac{1}{\rho_1}\frac{dV_1}{dz} = \frac{1}{\rho_2}\frac{dV_2}{dz} \tag{2.18}$$

A condição em que V_2 vai para zero quando z tende ao infinito significa que os termos envolvendo $e^{+\lambda z}$ não podem ser usados ou $\psi_2(\lambda) = 0$. Na superfície, o primeiro termo na expressão para V_1 sempre satisfaz a condição de que ${dV_1}/{dz} = 0$, e aplicar essa condição ao resto da equação significa:

$$\frac{I\rho_1}{2\pi}\int_0^\infty [-\theta_1(\lambda) + \psi_1(\lambda)\lambda] J_0(\lambda r) d\lambda = 0 \tag{2.19}$$

Isso é satisfeito pela condição:

$$\theta_1(\lambda) = \psi_1(\lambda) \tag{2.20}$$

Dessa forma as expressões para os potenciais se tornam:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left(\int_0^\infty J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \theta_1(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \theta_1(\lambda)J_0(\lambda r)e^{+\lambda z}d\lambda\right) \tag{2.21}$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left(\int_0^\infty J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda + \int_0^\infty \theta_2(\lambda)J_0(\lambda r)e^{-\lambda z}d\lambda\right) \tag{2.22}$$

A condição $V_1 = V_2$ em z = h leva a:

$$\theta_1(\lambda)e^{-\lambda h} + \theta_1(\lambda)e^{+\lambda h} = \theta_2(\lambda)e^{-\lambda h}$$

ou

$$\theta_1(\lambda)\left(e^{-\lambda h} + e^{+\lambda h}\right) = \theta_2(\lambda)e^{-\lambda h} \tag{2.23}$$

A segunda condição leva a:

$$e^{-\lambda h} - \theta_1(\lambda)(e^{-\lambda h} - e^{+\lambda h}) = \frac{\rho_1}{\rho_2}(-e^{-\lambda h} - e^{-\lambda h}\theta_2(\lambda))$$ (2.24)

De (2.24) tem-se:

$$\theta_1(\lambda) = \frac{\theta_2(\lambda)e^{-\lambda h}}{e^{-\lambda h} + e^{+\lambda h}} = \frac{\theta_2(\lambda)e^{-2\lambda h}}{e^{-2\lambda h} + 1}$$ (2.25)

De (2.25) tem-se:

$$-e^{\lambda h}\left\{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right\} - \theta_1(\lambda)\{e^{\lambda h} - e^{\lambda h}\} = -\frac{\rho_1}{\rho_2}\, e^{\lambda h}\theta_2(\lambda)$$ (2.26)

Substituindo $\theta_1(\lambda)$ tem-se:

$$\theta_2(\lambda)\left[-e^{-4\lambda h}(\rho_2 - \rho_1) + e^{-2\lambda h}(\rho_2 - \rho_1)\right] = (\rho_2 - \rho_1)\left(e^{-4\lambda h} + e^{-2\lambda h}\right)$$ (2.27)

Dividindo por $e^{-2\lambda h}$ e escrevendo $k = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$.

$$\theta_1(\lambda) = \frac{k\left(1+e^{-2\lambda h}\right)}{1-ke^{-2\lambda h}} * \frac{e^{-2\lambda h}}{\left(1+e^{-2\lambda h}\right)} = \frac{ke^{-2\lambda h}}{1-ke^{-2\lambda h}}$$ (2.28)

O potencial importante é V_1 e isso se torna:

$$V_{1=}\, \frac{\mathrm{I}\rho_1}{2\pi}\left[\int_0^\infty J_0(\lambda r)e^{-\lambda h}\, d\lambda + \int_0^\infty \frac{ke^{-2\lambda h}\left(e^{-\lambda h} + e^{+\lambda h}\right)}{1 - ke^{-2\lambda h}} J_0(\lambda r)d\lambda\right]$$ (2.29)

O potencial da superfície em *z=0* será:

$$V_{1=}\, \frac{\mathrm{I}\rho_1}{2\pi}\left[\int_0^\infty J_0(\lambda r)\, d\lambda + \int_0^\infty \frac{ke^{-2\lambda h}}{1 - ke^{-2\lambda h}} J_0(\lambda r)d\lambda\right]$$ (2.30)

A solução da primeira integral na equação 2.25 é realizada de forma a estimar a segunda integral, para tanto, é necessário expandir a fração. Então:

$$\frac{ke^{-2\lambda h}}{1 - ke^{-2\lambda h}} = ke^{-2\lambda h} + ke^{-4\lambda h} + ke^{-6\lambda h} = \sum_{n=1}^{n=\infty} ke^{-2n\lambda h}$$ (2.31)

Então a segunda integral se torna:

$$2\int_0^{\infty}\sum_{n=1}^{n=\infty}k^n e^{-2n\lambda h}J_0(\lambda r)\,d\lambda = 2\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{k^n}{[r^2+(2nh)^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.32}$$

Assim, a solução total para o potencial em qualquer ponto na superfície em uma distância “r” da corrente A é:

$$V_{1=}\frac{\mathrm{I}\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r}+2\sum_{n=1}^{n=\infty}\frac{k^n}{[r^2+(2nh)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] \tag{2.33}$$

O valor do potencial na superfície é o que a modelagem numérica computacional procurará resolver. A solução numérica do problema é obtida a partir da transformação do domínio em pontos nodais da grade de discretização do domínio. Em seguida os termos das equações diferenciais são discretizados em função desta grade, de forma que suas variáveis sejam expressas como funções dos pontos nodais (YU et al., 1999).

2.4.2. SOFTWARES DISPONÍVEIS.

Existem vários softwares utilizados para o estudo dos problemas de engenharia e física, todos desenvolvidos com a capacidade de gerar inumeráveis operações analíticas por segundo. Dentre os softwares que trabalham com problemas multifísicos, isto é, problemas encontrados quando a resposta de um sistema é afetada pela interação entre vários campos físicos distintos (por exemplo, deformação estrutural, fluxo de fluido, campo elétrico, temperatura, pressão de poros, dentre outros).

Dentre os softwares disponíveis que tratam problemas multifísicos destaca-se o ABAQUS, ADINA Multiphysics, ANSYS Multiphysics e COMSOL Multiphysics. Todos estes softwares possuem interface gráfica desenvolvida com base no método de elementos finitos, onde a partir de um modelo geométrico resolve as equações do problema que se deseja solucionar, utilizando métodos numéricos.

Neste trabalho, utilizou-se o software COMSOL Multiphysics, que é um software de simulação multipropósito, cuja plataforma engloba todas as etapas do fluxo de trabalho de modelagem. O software foi escolhido, pois, além de possuir flexibilidade através da modelagem baseada em equações, o departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG possui sua licença de utilização.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM

Método é o conjunto de operações ou processos organizados e sistemáticos empregados em uma pesquisa. Os métodos de abordagem esclarecem os procedimentos lógicos que deverão ser seguidos no processo de investigação científica, possibilitando a decisão sobre o alcance desejado da investigação, das regras de explicação dos fatos e da validade de suas generalizações (PRODANOV; FREITAS, 2013). Dessa forma, o delineamento metodológico deste trabalho é apresentado na Figura 3.1.

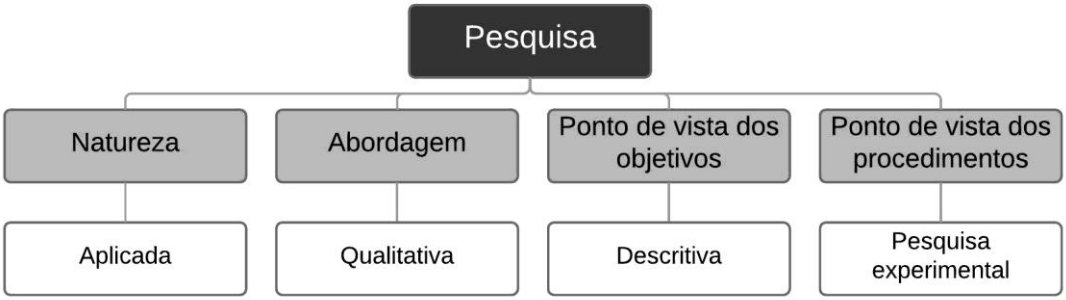


Figura 3.1 - Delineamento metodológico da pesquisa realizada
FONTE: A autora

3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTOS

Diferentes dos métodos de abordagem, os métodos de procedimentos são as etapas constituintes da pesquisa (PRODANOV; FREITAS, 2013). Assim, os procedimentos realizados neste trabalho foram compilados na forma do fluxograma a seguir (Figura 3.2).

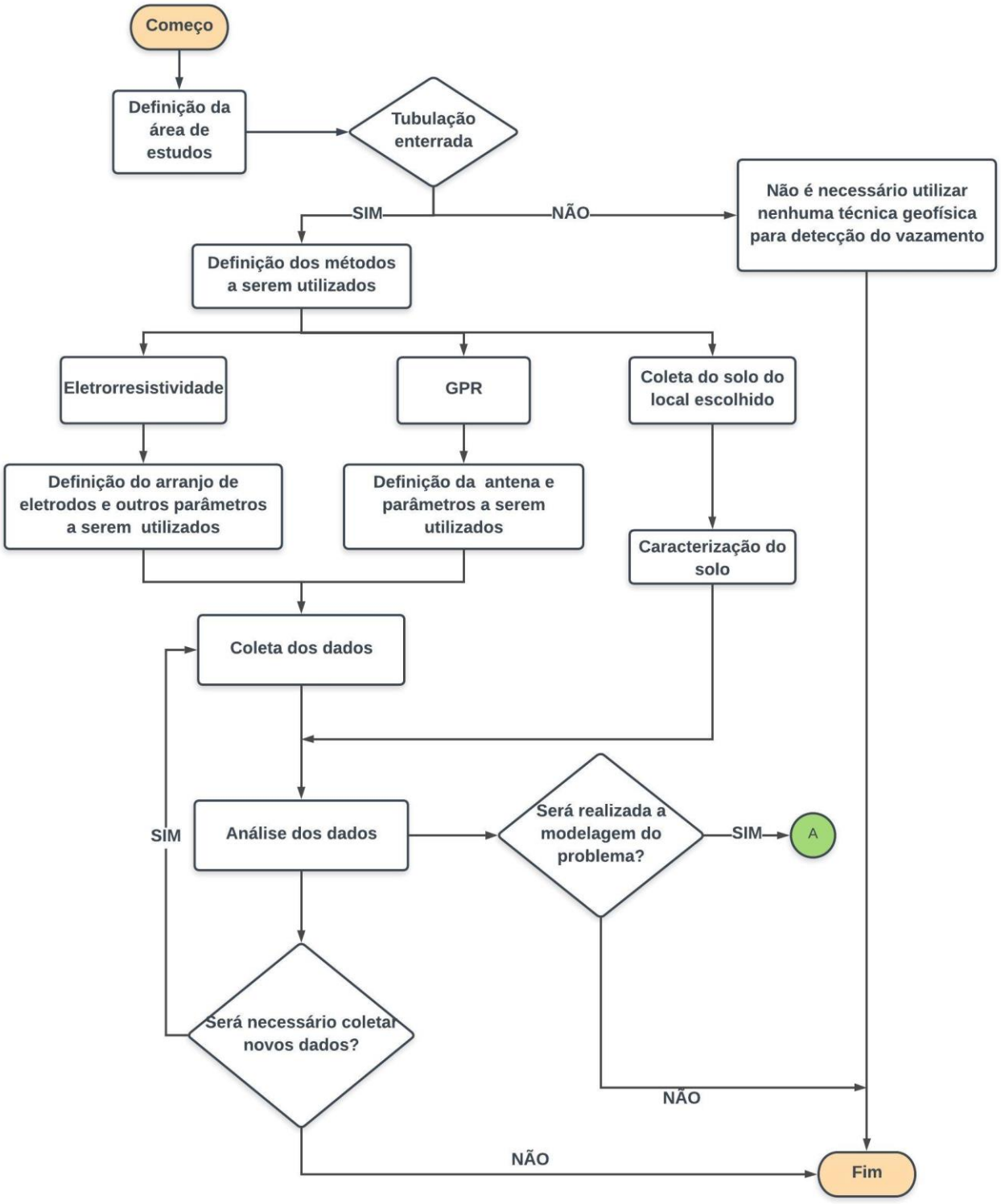


Figura 3.2 - Fluxograma dos procedimentos realizados no trabalho proposto.
FONTE: A autora

Por sua vez, os procedimentos numéricos para a modelagem, podem ser sintetizados da forma mostrada na Figura 3.3.

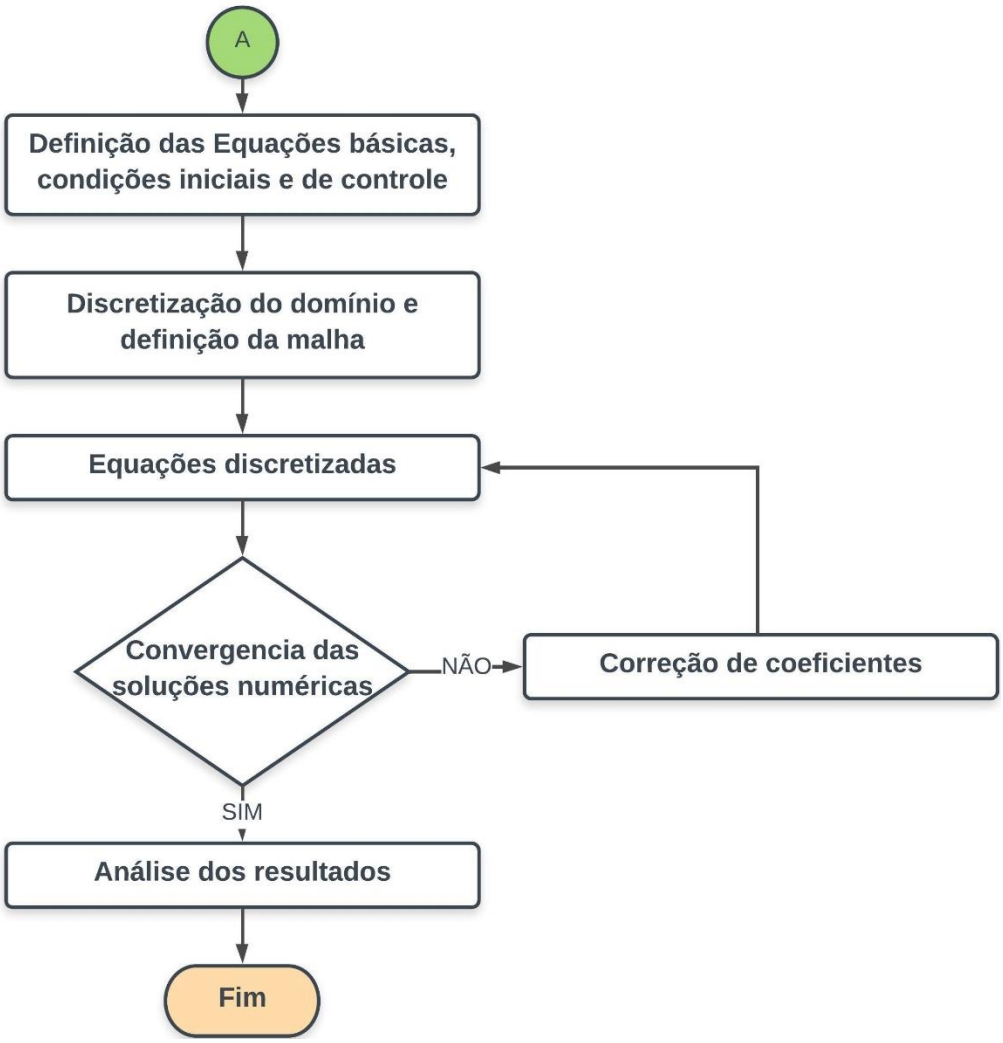


Figura 3.3 - Fluxograma dos procedimentos para a realização de uma modelagem numérica
FONTE: YU et al., 1999 (Adaptado)

3.3. ÁREA DE ESTUDO

Como o principal objetivo do estudo é verificar a precisão e eficiência do método da eletrorresistividade, a escolha do local de estudo foi direcionada pela facilidade de acesso físico e acesso às informações sobre os vazamentos, isto é, locais onde haviam vazamentos identificados previamente, que por sua vez foram utilizados para a validação do método.

O local de estudo se encontra em Nova Lima, município de Minas Gerais (Brasil), latitude 19° 59′ 9″ S e longitude 43° 50′ 49″ W (figura 3.4). A adutora de água tratada possui diâmetro de 2.400 mm e faz parte do chamado “Sistema Produtor do Rio das Velhas” que por sua vez faz parte do “Sistema Integrado de Abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Este sistema é responsável pelo fornecimento de água a cerca de 2.200.000 pessoas, abrangendo os municípios de

Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos, Santa Luzia e Sabará, todos localizados em Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2013).

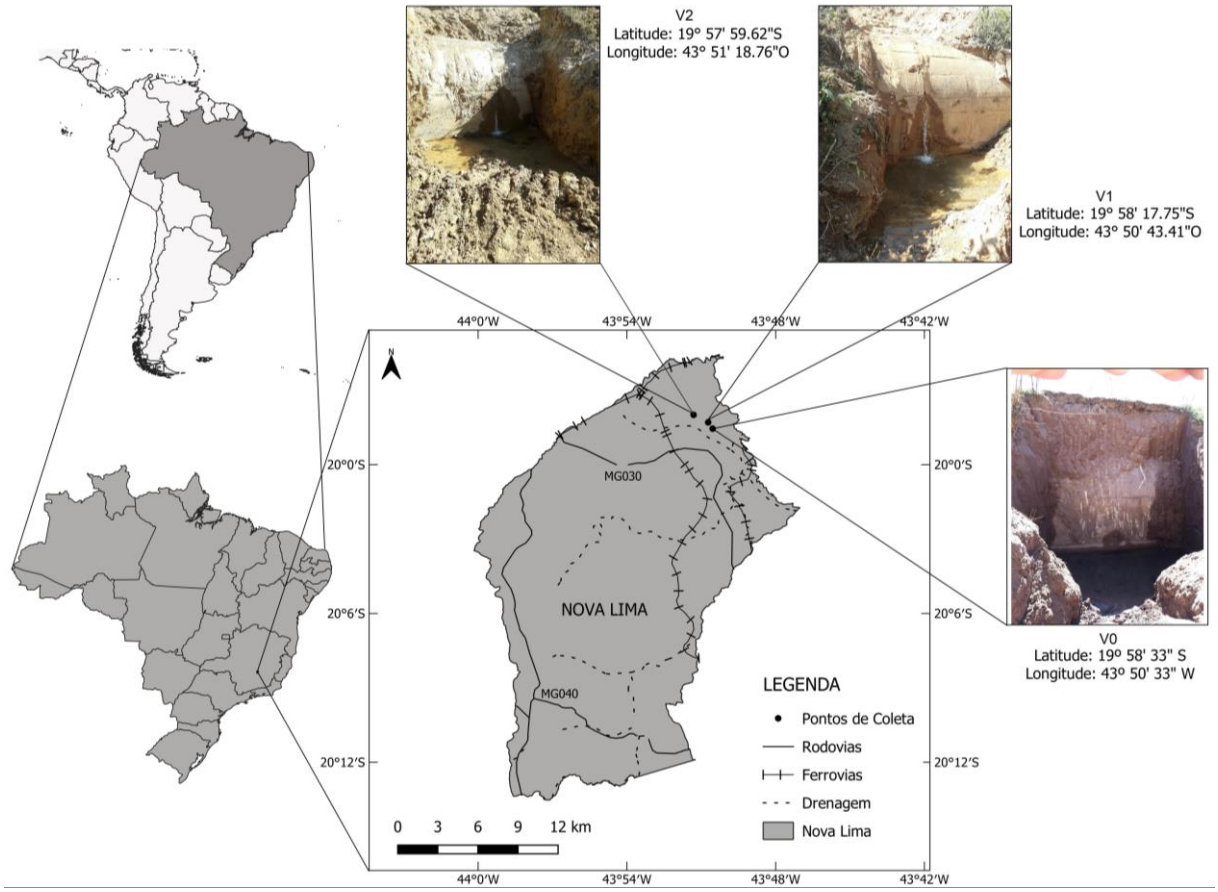


Figura 3.4 - Localização do município de Nova Lima e pontos de coleta de dados
FONTE: A autora

A área estudada faz parte da bacia do Rio das Velhas. Os domínios hidrogeológicos, o mapeamento geológico, a geodiversidade e os solos presentes na cidade de Nova Lima são mostrados nas Figura 3.5 e Figura 3.6.

Nessas figuras é possível perceber que os locais onde foram coletados os dados estão inseridos no domínio hidrogeológico cristalino, quanto ao mapeamento geológico os pontos se encontram no Grupo Nova Lima. Com relação à geodiversidade, há a presença de metagabro e serpentinito. Além disso, os solos predominantes são os cambissolos. Esse tipo de solo é caracterizado por apresentar textura média ou mais fina e ausência de grande desenvolvimento pedogenético. São solos com pequena profundidade e elevado teor de minerais primários (minerais herdados da rocha) (SILVA et al., 2009).

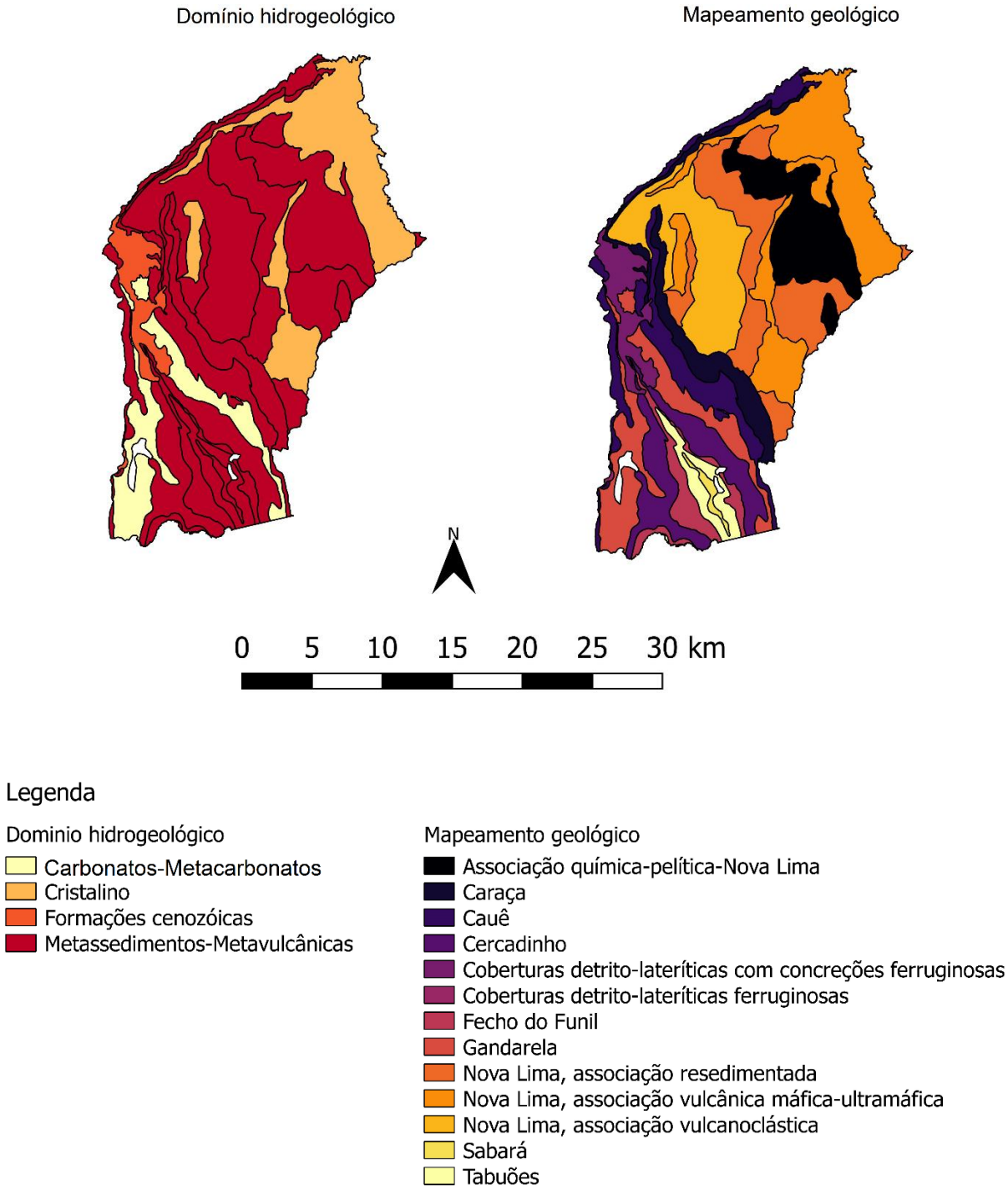


Figura 3.5 - Domínio hidrogeológico e Mapeamento geológico do município de Nova Lima
FONTE: MINAS GERAIS, 2018 (Adaptado)

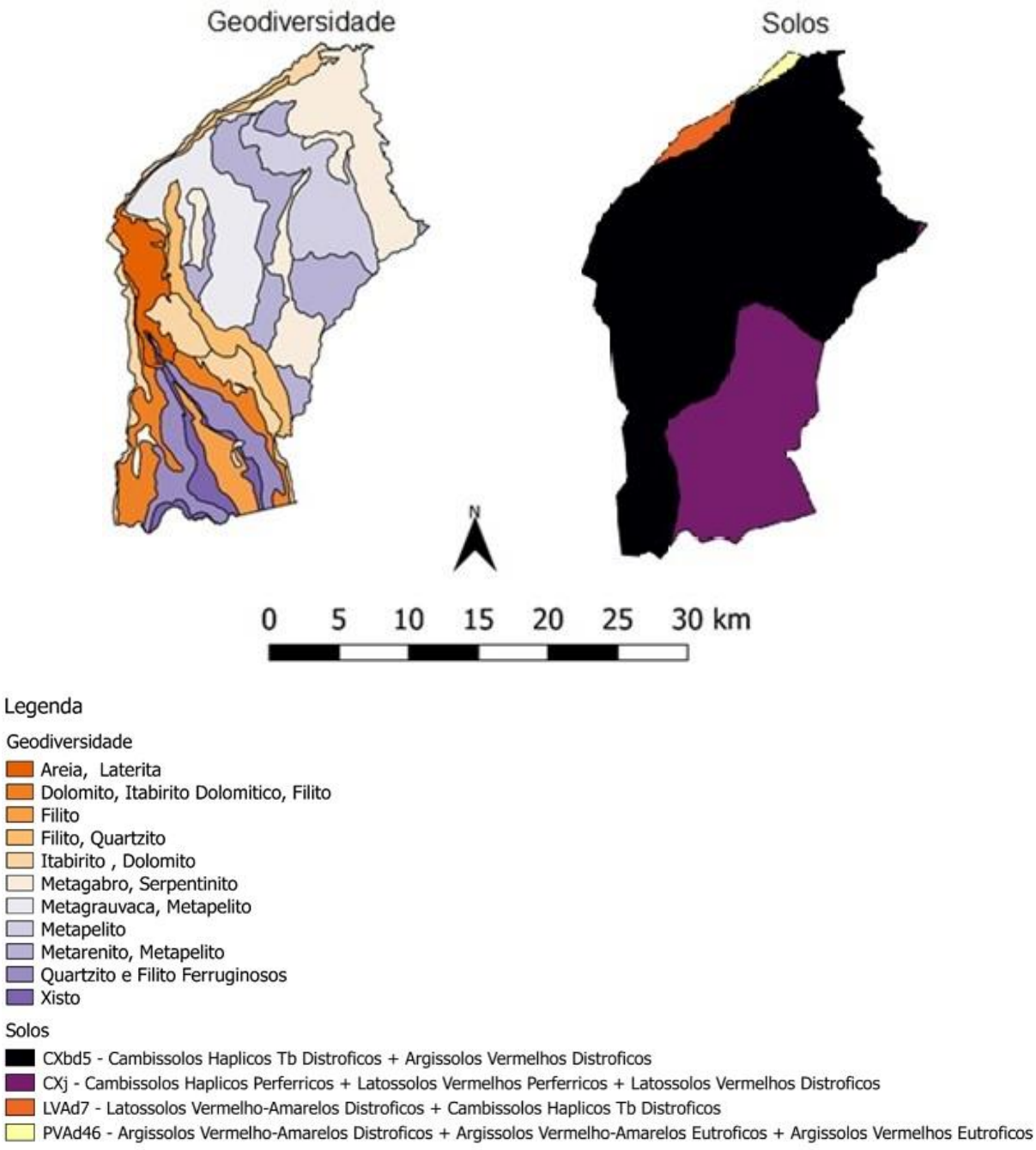


Figura 3.6 - Geodiversidade e Solos do município de Nova Lima
FONTE: MINAS GERAIS, 2018 (Adaptado)

3.4. COLETA DE DADOS EM CAMPO

3.4.1. ELETRORRESISTIVIDADE

O equipamento utilizado para as coletas dos dados de campo foi o eletrorresistivímetro Terrameter SAS1000. Ele possui um canal de entrada e é produzido pela Abem® (ABEM, 2009). O uso deste equipamento foi possível devido a parceria com o professor Paulo Aranha do IGC/UFMG.

Foram realizadas três coletas de dados, uma no primeiro semestre (V0) e duas no segundo semestre de 2018 (V1 e V2) (figura 3.4). A coleta em V0 foi realizada no dia 11 de maio de 2018, e as coletas V1 e V2 no dia 17 de setembro (tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Coletas de campo realizadas, com suas respectivas datas, objetivos e número de perfis realizados

Data	**Coleta**	**Objetivo**	**Caminhamento elétrico**	**GPR**
11 de maio de 2018	V0	Testar o equipamento	2 perfis	-
		Identificar vazamento		
13 e 17 de setembro de 2018	V1	Identificar vazamento	1 perfil	3 perfis
	V2	Identificar vazamento	1 perfil	9 perfis

FONTE: A autora

A escolha dos meses para a coleta de dados no campo foi realizada de acordo com a última Normal Climatológica divulgada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (2018). Segundo dados publicados pelo instituto para a estação meteorológica de Belo Horizonte, estação mais próxima do local de estudo, os meses de abril a setembro possuem uma precipitação média baixa (Figura 3.7).

É preferível realizar as coletas em um período de menor precipitação devido ao melhor contraste que o resultado obtido apresentará. Isto é, o potencial medido será associado ao comportamento do fluxo da água que escoa para o solo através do vazamento, o que é caracterizado pela diminuição dos valores de resistividade na área onde o solo estará úmido.

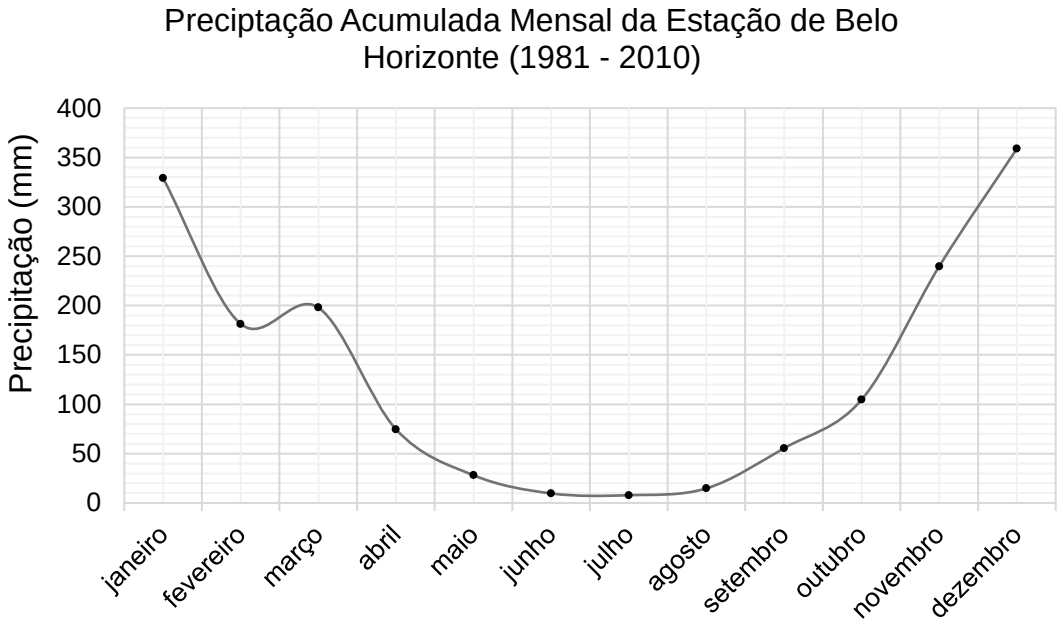


Figura 3.7 - Gráfico da Precipitação Acumulada Mensal da Estação de Belo Horizonte segundo a Normal Climatológica de 1981 – 2010 do INMET
FONTE: INMET (2018) (Adaptado)

O local onde realizou-se a primeira coleta (V0) foi escolhido de acordo com vazamentos identificados em uma visita prévia ao local, realizada dia 27 de agosto de 2017. Nesta visita foram identificados quatro vazamentos e cinco poços de visita (PV) ao longo do trecho percorrido. O ponto onde foram realizadas as coletas foi escolhido para a realização do perfil de eletrorresistividade pois se encontrava afastado dos PVs, uma vez que os poços de visita possuem tampa de metal e, consequentemente provocariam ruídos nas medições.

A coleta de dados em V0 foi realizada dia 11 de maio de 2018. Nela foram utilizados, primeiramente, 2 cabos e 64 eletrodos, espaçados de metro a metro. Em seguida realizou-se um *roll-along*, ou seja, ao final da linha de coleta, foram adicionados mais 32 eletrodos, totalizando um perfil de 96 eletrodos. A amplitude da corrente utilizada foi 50 mA, o ciclo da onda 0,2 s e no total houveram 15 níveis de investigação.

Nesta coleta foram coletados dois perfis, um utilizando todos os pontos e outro que foi um recíproco, onde considerou-se menos pontos na coleta. Sendo que por recíproco entende-se uma coleta originária e inversa da primeira, onde os pares de eletrodos que inicialmente eram de corrente se tornam eletrodos de potencial e aqueles que eram de potencial tornam-se de corrente. Este recíproco foi realizado

com o intuito de verificar o erro relativo das coletas realizadas com o eletrorresistivímetro e a confiabilidade deste equipamento por meio de uma correlação de dados, a Correlação de Pearson.

Esta correlação mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, e sua análise se dá por meio de um coeficiente que assume valores entre -1 e 1, sendo que se este coeficiente for igual a 1 tem-se uma correlação perfeita positiva entre as variáveis. Caso o coeficiente for igual a -1, há uma correlação negativa perfeita entre as variáveis (se uma aumenta, a outra sempre diminui). Já se o coeficiente for 0 (zero), as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra (BENESTY et al., 2009).

A segunda medição foi realizada dia 17 de setembro de 2018. Nela foram coletados perfis de eletrorresistividade em dois pontos distintos V1 e V2. Estes pontos, bem como o da primeira coleta (V0), são apresentados na figura 3.8.

Figura 3.8 - Imagem de satélite dos pontos de coletas de dados.

No ponto V1 foram utilizados 2 cabos e 64 eletrodos, espaçados a cada meio metro, totalizando um perfil de 32 metros. No ponto V2 foram utilizados, 2 cabos e 64 eletrodos, espaçados de metro a metro, totalizando um perfil de 64 metros. Para ambos os pontos de coleta a amplitude da corrente utilizada foi 10 mA, o ciclo da onda 0,2 s e no total houveram 15 níveis de investigação. Nesta segunda coleta de dados

foi necessário excluir alguns eletrodos da medição, são eles: eletrodos 46, 48 e 62 no ponto V1, e eletrodos 46, 48, 56, 58 e 62 no ponto V2. Esta exclusão foi necessária devido ao não reconhecimento do dos eletrodos por parte do eletrorresistivímetro. Entretanto, destaca-se que as coletas que não foram realizadas não afetaram significativamente o resultado obtido.

O arranjo escolhido para as coletas foi o Dipolo-Dipolo (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Neste arranjo se utilizam simultaneamente vários dipolos de recepção (P_1P_2) dispostos ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo P_1P_2 corresponde a um nível de investigação. Ele foi adotado pois, de acordo com Braga (2016), com ele pode-se estudar as variações horizontais de um parâmetro geoelétrico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigações.

Nesse tipo de arranjo a profundidade teórica atingida em cada nível investigado, é tomada, segundo alguns autores, como sendo Z = R/2 (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (C_1C_2 e P_1P_2). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se for tomada como sendo aproximadamente R/4 (BRAGA, 2016). Dessa forma, como a adutora estudada possui um diâmetro de 2,4 metros e existe um recobrimento de aproximadamente 1,0 metro, a profundidade atingida nas coletas de dados deverá ser maior que 3,4 metros.

Na coleta realizada os espaçamentos utilizados para “a” variavam de 1 a 6 metros e o espaçamento de “n” de 1 a 4 metros.

Os dados foram armazenados na memória do equipamento durante a aquisição e, posteriormente, descarregados em um computador, onde foram modelados no software Res2dInv. Este software determina, automaticamente, um modelo de resistividade bidimensional para o meio por intermédio dos dados elétricos de campo.

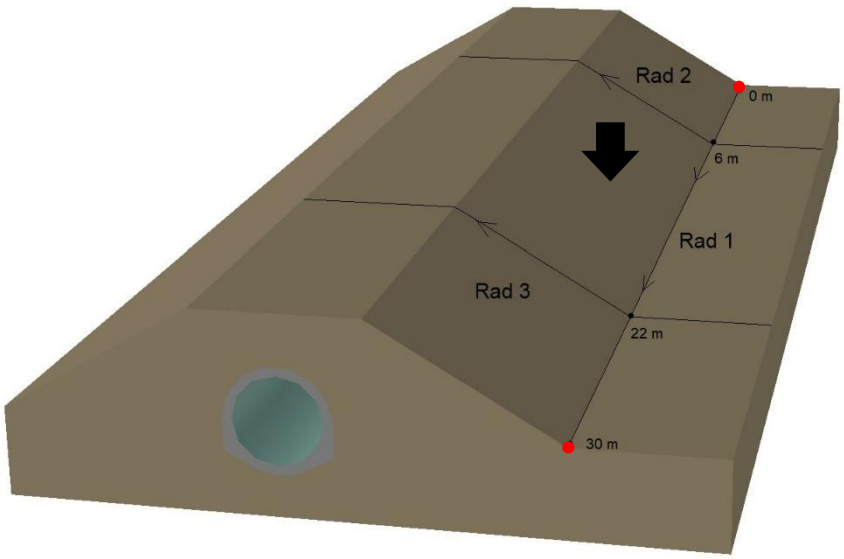
3.4.2. GPR

Os equipamentos utilizados para as coletas dos perfis de GPR foram realizadas com duas antenas blindadas, uma de 100MHz e outra de 200MHz, produzidas pela GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) modelo SIR 3000. Os parâmetros considerados para a escolha e aquisição do equipamento GPR foram definidos de acordo com o meio a ser pesquisado e com as condições de resolução e penetração das ondas. Eles podem ser observados na Tabela 3.2.

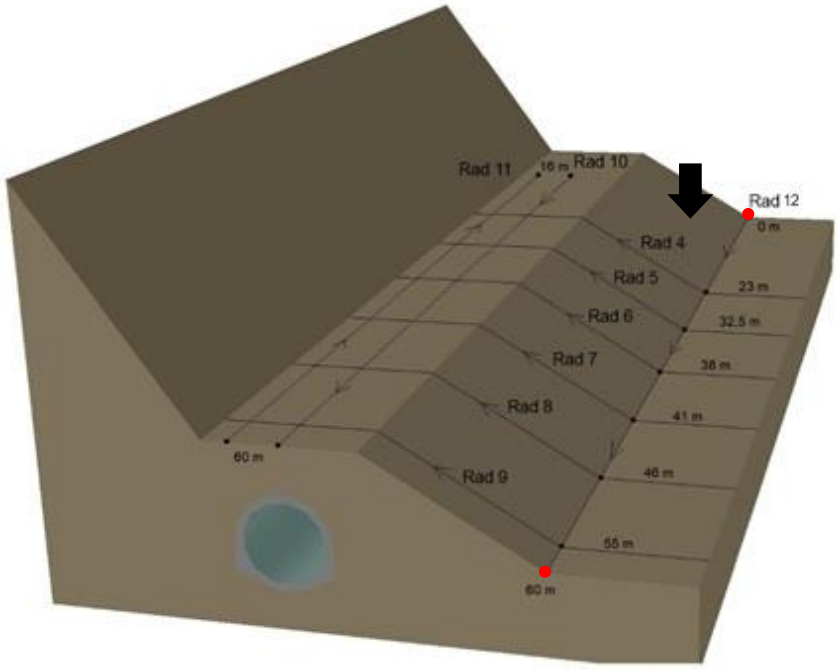
Tabela 3.2 - Configurações utilizadas para coleta de dados com o GPR

	Antenas	
	100MHz	**200MHz**
Transmit rate	25 kHz	100 kHz
Samples	256	512
Range	200	200
Rate	55	120
Scans/m	50	100
Gain	Manual, 1pt, -6dB	Manual, 1pt, -6dB
HP_IIR	20	20
LP_IIR	800	800
FIR (HP/LP)	0	0
Stacking	0	0

As coletas dos perfis foram realizadas dia 13 de setembro de 2018 nos pontos V1 e V2. No primeiro ponto de coleta, o perfil realizado perpendicular à adutora possui 30 metros (Rad 1), já no segundo ponto, 60 metros (Rad 12). Além dos perfis perpendiculares também foram realizadas coletas transversais. Em V1 elas aconteceram em 6m e 22m, e em V2 foram realizadas em 23m, 32,5m, 38m, 41m, 46m e 55m. No ponto V2 também foi possível realizar aquisição de dados em cima do talude da adutora, os dois perfis coletados possuem 44 metros.



(a)



(b)

Figura 3.9 - Esquema da coleta dos dados com o GPR, (a) em V1 e (b) em V2, sendo que a sigla Rad representa cada um dos radagramas coletados. Os pontos vermelhos indicam o início e o final do caminhamento elétrico realizado. As setas pretas indicam os vazamentos localizados previamente.
FONTE: A autora

Os softwares Reflexw 2D data-analysis e Radan® 7 foram utilizados para o processamento dos dados coletados. As etapas de processamento utilizadas foram:

- Análise do espectro de frequências: definição das frequências presentes no radargrama;
- Filtragem *dewow*: remoção de componentes de frequências muito baixas, associadas à saturação eletrônica do receptor;
- *Set time zero:* correção do tempo zero através da definição da referência (traço) inicial do perfil;
- *Window traces:* definição da área do perfil que não será utilizada e eliminá-la;
- Aplicação de ganhos: realce das amplitudes correspondentes aos refletores posicionados a profundidades mais elevadas

3.5. COLETA E ANÁLISES DO SOLO

Conhecer as características da subsuperfície da área estudada é importante em estudos geofísicos. Vários estudos documentaram que existem relações entre propriedades físicas na zona não saturada, como teor de umidade, e medições geofísicas. Dentre esses estudos, destacam-se os de Mualem; Friedman (1991),

Kalinski; Kelly (1993), Auerswald; Simon; Stanjek (2001) e Schwartz; Schreiber; Yan (2008).

Assim, serão coletadas amostras do solo da região para análises físicas, com o intuito de auxiliar nas interpretações dos resultados obtidos com o eletrorresistivímetro e o GPR. Esta análise se faz importante uma vez que solos mais úmidos apresentam menores resistividades, e em solos de textura fina, a corrente elétrica em argila não é apenas conduzida pela água livre dos poros, mas também pela água adsorvida na superfície da partícula de argila (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Os pontos onde foram coletadas as amostras de solo correspondem aos pontos V1 e V2 (Figura 3.4). O solo foi coletado em profundidades diferentes, para que os ensaios realizados fossem representativos ao que existia no ponto coletado. Entretanto, é preciso destacar que o solo do talude da adutora é proveniente de aterro, ou seja, o que foi considerado em determinado ponto pode não ser válido para os demais.

Para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização a amostra foi seca ao ar até próximo da umidade higroscópica, em seguida os torrões foram desmanchados e a amostra homogeneizada. Para a análise granulométrica foram separados 4kg de solo. Para a determinação da massa específica dos grãos do solo que passam na peneira de 4,8 mm foram separados 500g de solo, já para o solo retido nesta peneira, a determinação da massa aparente e da absorção de água dos grãos foi realizada tomando-se 2kg de solo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a).

O ensaio de análise granulométrica foi realizado por peneiramento e por granulometria a laser. Para o peneiramento foram utilizadas as peneiras: 25,4mm, 19,1mm, 9,5mm, 4,75mm, 2,0mm, 1,8mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,075mm. Para o ensaio de granulometria a laser, utilizou-se o granulômetro Cilas 1090. Neste ensaio foram utilizadas amostras de solo passante pela peneira de 0,075 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016b).

O ensaio para determinação do teor de umidade foi realizado tomando três amostras de solo que passaram pela peneira de 4,8 mm, cada uma com 50g cada. As amostras foram colocadas em estufa à 105ºC por 24h. Depois de secas as amostras foram pesadas, e os cálculos para a determinação do teor de umidade foram

realizados. O resultado obtido foi a média dos resultados das três amostras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, 2016a).

Figura 3.10 - Amostras de solos utilizadas para a determinação do teor de umidade. As três amostras de cima na imagem pertencem ao ponto P2, enquanto as amostras na parte de baixo pertencem à P1.
FONTE: A autora

Para a determinação da massa específica das amostras, homogeneizou-se as amostras que foram secas previamente e foi pesado 50g de solo para cada análise realizada. O solo então foi transferido para um béquer e foi adicionada água destilada. A mistura foi deixada em repouso por cerca de 23h.

Após o período de 23h, a mistura foi dispersada por 15 minutos. Transferiu-se, então a amostra para um picnômetro tomando o cuidado de remover todo o material do copo dispersor, evitando perdas. Ao picnômetro foi adicionada água destilada até cerca de 1 cm abaixo do gargalo e aplicou-se pressão de vácuo de 88kPa durante 15 minutos. Após isto, o picnômetro foi pesado.

A massa específica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³), do solo foi calculada, então seguindo a seguinte equação:

$$Massa\ específica\ = \frac{M_1\ \times \frac{100}{100+W}}{\left(M_1\ \times \frac{100}{100+W}\right) + M_3 - M_2}\ \times MespW \qquad (3.1)$$

Onde:

M1 é a massa do solo úmido

M2 é a massa do picnômetro + solo + água à temperatura T do ensaio

M3 é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência à temperatura T de ensaio

W é a umidade inicial da amostra

$M_{esp}W$ é a massa específica da água, à temperatura T de ensaio, obtida na tabela A.1 da norma ABNT NBR 6458 de 2016.

3.6. MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Os procedimentos gerais para a modelagem numérica computacional são apresentados na figura 3.3. A seguir será detalhado as especificidades da modelagem numérica computacional deste trabalho.

3.6.1 GEOMETRIA E CRIAÇÃO DA MALHA

Para a confecção da geometria da adutora e talude utilizados na simulação numérica, foi desenhado, através do software AutoCAD, o perfil da adutora estudada. Ele é apresentado na figura 3.11, sendo as cotas da adutora fornecidas pela Copasa, e as cotas do talude medidas em visita à campo.

Este perfil foi extrudado, posteriormente, para adicionar a variável Z ao problema. O valor de Z utilizado foi de 200 metros, uma vez que é a distância entre os poços de visita (PV) existentes na adutora.

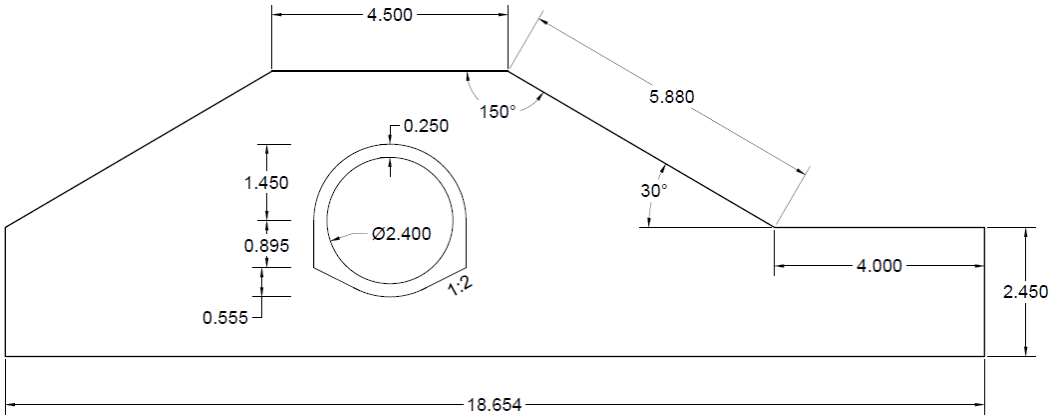


Figura 3.11 - Perfil da adutora de água tratada. Os valores indicados nas cotas estão em milímetros.
FONTE: A autora

Na confecção da geometria da adutora foram feitas algumas simplificações, sendo a mais relevante, a desconsideração da armadura de aço presente no interior da adutora. Entretanto, ressalta-se que na simulação o concreto especificado foi o concreto armado.

Para simular o vazamento de água, foi considerado um prisma envolvendo a adutora. Este prisma possui uma base quadrada de 4,5m de lado, e altura de 10m de comprimento, e foi inserido no meio da adutora, isto é, entre Z = 95m e Z = 105m. A

figura 3.12 mostra a geometria da adutora, e a seta indica a localização do prisma que representará o solo úmido.

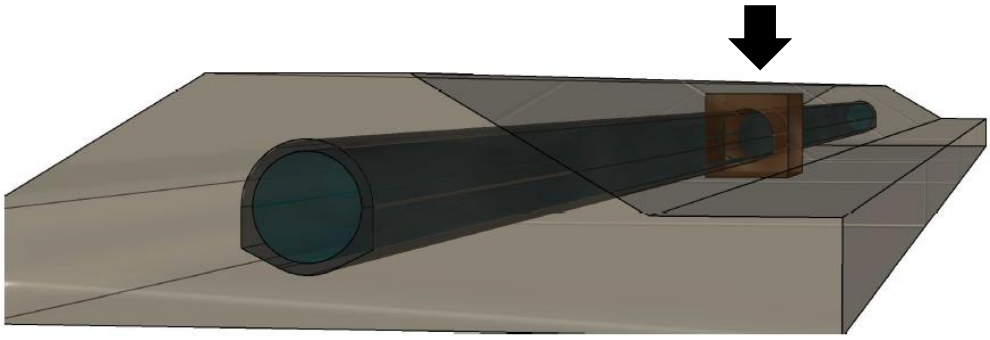


Figura 3.12 - Geometria da adutora
FONTE: A autora

Após a construção da geometria, esta foi exportada para o software COMSOL Multiphysics, para que assim, fosse possível construir a malha de simulação.

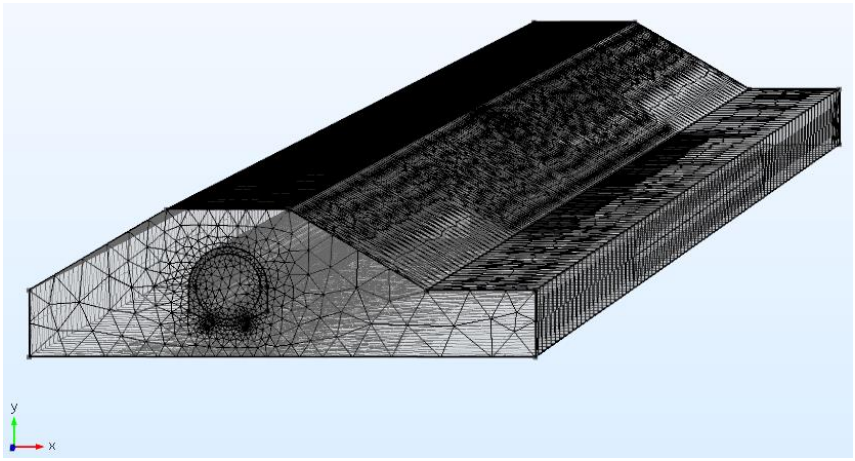


Figura 3.13 - Malha gerada pelo COMSOL Multiphysics
FONTE: A autora

Após a discretização da geometria foi gerada uma malha numérica fina com 167.138 elementos e uma extrafina com 648.146 elementos. Os elementos de cada malha eram divididos em quatro tipos: tetraédricos, triangulares, de borda e de topo. Ressalta-se que os elementos tetraédricos são predominantes em ambas as malhas. Gerou-se diferentes malhas para verificar se o refinamento destas interferem no resultado das simulações.

3.6.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para realizar a simulação numérica é necessário definir os materiais referentes a cada sólido da geometria. No estudo em questão foram utilizados quatro materiais diferentes, sendo eles solo insaturado para a geometria do talude, solo saturado para a geometria que representa a pluma de vazamento, concreto armado no sólido da adutora, e por fim, água preenchendo o sólido da adutora.

Para a aplicação da física ao problema é necessário que as propriedades físicas da condutividade elétrica e permissividade relativa de cada material sejam definidas. Como o solo da região estudada é majoritariamente argiloso, estes parâmetros foram definidos conforme Porsani (1999) e estão representados na tabela a seguir:

Tabela 3.3 - Condutividade e permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação numérica

Materiais	**Permissividade Relativa (ε_r)**	**Condutividade Elétrica (mS/m)**
Solo Argiloso Seco	2,4	0,27
Solo Argiloso Saturado	15	50
Concreto Armado	12,5	0
Água	81	0,5

FONTE: PORSANI, 1999. (Adaptado)

A amplitude da corrente utilizada no modelo, tanto a positiva injetada no solo quanto a negativa foi de 10mA. Este valor foi utilizado pois foi o mesmo usado na coleta dos dados em campo em V1 e V2.

3.6.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Os procedimentos realizados na simulação computacional são apresentados a seguir, detalhando-se as especificidades deste trabalho.

A simulação foi realizada no software COMSOL Multiphysics. Para tanto criou-se um *blank model* e importou-se a geometria feita no AutoCAD 3D (figura 3.12). As configurações da geometria importada foram: 1) *lenght unit from CAD document*; 2) *objects to import: solids*; 3) *surfaces: from solids*; 4) *check imported objects for erros*; 5) *repair imported objects*.

Em seguida inseriu-se pontos na geometria que correspondem aos eletrodos injetores e receptores de corrente elétrica. Foram simulados 100 eletrodos, e a distância entre cada ponto foi de 1m. Esses pontos possuíam uma distância de 50m

longitudinais do limite dos sólidos para evitar efeitos de bordas. A distância transversal foi menor e corresponde apenas a profundidade de investigação desejada.

Adicionou-se então, os materiais a serem estudados. Os materiais usados neste trabalho já são predefinidos pelo software, basta apenas usar a ferramenta *search*. Acrescentou-se água, concreto, e o solo, que foi acrescentado duas vezes pois tem-se o mesmo material com características diferentes, sendo um deles saturado e o outro não saturado. Após a inserção dos materiais, definiu-se as propriedades *electrical condutivity* e *relative permitivity* de cada material. Os valores utilizados foram aqueles apresentados na tabela 3.3.

Acrescentou-se a física do problema que também é predefinida pelo COMSOL. Neste caso, a física escolhida foi a corrente elétrica contínua. Ela já é acrescentada ao modelo com a predefinição de que todos os sólidos e superfícies apresentam *current conservation* e *electric insulation*. Os valores iniciais foram definidos conforme o material ou como 0 inicialmente, e o estudo de tempo utilizado foi o de regime estacionário.

Selecionou-se 2 pontos que correspondem aos eletrodos para injetar uma corrente de 0,01A. Repetiu-se a operação selecionando o par logo após os injetores de corrente positiva e foi injetada uma corrente de -0,01A. Essa operação foi realizada para simular a operação de Dipolo-Dipolo do método geofísico.

Assim, computou-se os resultados. Eles são apresentados no COMSOL através de uma representação gráfica das superfícies equipotenciais geradas pelos eletrodos injetores de corrente e os valores máximo e mínimo em forma de tabela. A posição do valor máximo coincide com o primeiro ponto injetor de corrente positiva e o valor mínimo coincide com o segundo ponto injetor de corrente negativa. A tabela que que continha o valor máximo e o valor mínimo da simulação realizada foi exportada para que os valores pudessem ser analisados.

A simulação foi repetida alterando os pontos injetores de corrente, de modo que a cada simulação computada os eletrodos caminhassem 1m ao longo do sólido. Os dados da diferença de potencial têm seus valores exportados para todas as simulações para obter-se em todo sólido as diferenças de potencial, inclusive acima do vazamento, onde se encontrava o solo saturado para verificar a diferença de potencial em cada tipo de solo (saturado e insaturado). A verificação pôde ser feita ao transferir todas as diferenças de potencial para uma tabela no Excel, em que com esses dados, após o

tratamento matemático, encontra-se a resistividade aparente do solo. Com esses dados gera-se uma tabela de resistividade aparente versus distância em metros que nos dá informações sobre o vazamento.

As simulações foram repetidas com cada refinamento possível da malha para avaliar qual é o melhor refinamento para este tipo de problema, e também com profundidades diferentes dos eletrodos no solo para avaliar a resistividade aparente de cada camada estudada.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. DETERMINAÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES DE CONCRETO ARMADO NÃO AFOGADAS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS

Resumo - As redes de distribuição de água são construídas para fornecer constantemente água em quantidade suficiente aos usuários com uma pressão e qualidade aceitáveis da forma mais econômica possível. Entretanto, há perdas de água por meio de vazamentos nas redes de distribuição de água urbana. Assim, um controle de perda de água eficiente e eficaz deve ser reconhecido como uma prioridade para melhorar o fornecimento de água potável. Neste contexto, existem diversas formas de detectar e analisar os vários tipos de vazamentos. Dentre os principais métodos de detecção ressalta-se os geofísicos, que vêm ganhando força como forma de auxiliar nas tomadas de decisões ligadas à engenharia principalmente por serem não destrutivos. Este trabalho visa detectar vazamentos em uma adutora de água tratada localizada no município de Nova Lima, no estado de Minas Gerais, utilizando as técnicas geofísicas da eletrorresistividade e do GPR. Para comprovar a eficácia dos métodos, as coletas foram realizadas em locais onde havia a certeza da presença de vazamentos devido à escavações e inspeções visuais nos locais. Como principal resultado, tem-se que a eletrorresistividade é eficiente na detecção dos vazamentos na tubulação de concreto armado que não funciona pressurizada, localizada em Nova Lima. Entretanto ela é menos precisa que o GPR.

Palavras-chave: Abastecimento de água, Detecção de vazamentos, Prospecção geofísica, Eletrorresistividade

INTRODUÇÃO

As adutoras tubulações de grandes diâmetros (maiores que 50 cm) tem o objetivo de transportar a água dentro do sistema de abastecimento de água. O tamanho da população a ser atendida é que determina o porte destes sistemas (HELLER; PÁDUA, 2010). No Brasil, o comprimento total da malha de distribuição de água, incluindo adutoras e redes distribuidoras, é cerca de 626.272,23 km de extensão (BRASIL, 2018).

Os sistemas de abastecimento de água são construídos para fornecimento contínuo de água em quantidade suficiente aos usuários com uma pressão e qualidade aceitáveis da forma mais econômica possível. Dessa forma, uma vez que os componentes individuais de um sistema podem falhar, os sistemas de distribuição de água são projetados com uma grande margem para que o sistema possa funcionar adequadamente, mesmo quando alguns componentes individuais estão fora de serviço. Assim, a conservação da água por meio da gestão mais eficiente dos recursos hídricos ou redução na perda pode afetar o dimensionamento das tubulações (MAYS, 1996).

O problema dos vazamentos nos sistemas públicos de água prejudica seriamente a eficiência dos recursos hídricos. Portanto, a localização destes vazamentos, principalmente em tubulações subterrâneas é uma das etapas cruciais para a otimização do uso de recursos hídricos, pois o vazamento geralmente é o maior componente de perda de distribuição (CATALDO et al., 2017a).

No Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) calcula indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água segundo três escalas diferentes: Percentual; Litros por ligação ao dia; e Metros cúbicos por quilômetro de rede ao dia. Para o ano de 2016, a média de perdas no Brasil é de 38,1%. Ressalta-se, entretanto, que existe uma grande variação de perdas de acordo com regiões do país e com o tipo de prestadora do serviço de distribuição.

Neste trabalho, o conceito de vazamento utilizado será o de abertura ou local, por onde a água escorre ou vaza. Diversos tipos de vazamentos (inerentes, visíveis e não visíveis) podem ocorrer em tubulações, e por isso, existem também diversas formas de detectar e analisar cada tipo de vazamento. Dentre os principais métodos de detecção destacam-se o de balanço de massa e volume, os acústicos, os visuais, dentre outros (SANDBERG et al., 1989).

De forma a tentar identificar os locais passíveis de perdas em tubulações de grande diâmetro (adutoras), o presente trabalho pretende empregar métodos geofísicos, que vem ganhando força como forma de auxiliar nas tomadas de decisões ligadas à engenharia. Tais métodos possuem como princípio geral obter de forma não intrusiva informações acerca da subsuperfície analisada (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Segundo Kearey, Brooks e Hill (2009), os métodos geofísicos podem ser divididos em dois grandes grupos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra, e aqueles

que envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente. Em cada um dos grupos existe uma ampla gama de métodos de levantamentos, e para cada um, há uma propriedade física relacionada à qual o método é sensível.

Um dos métodos que utilizam energia gerada artificialmente é a eletrorresistividade, método que cada vez mais vem sendo empregado nos estudos sobre águas subterrâneas, aplicações em engenharia civil e investigações ambientais (DAHLIN; ZHOU, 2004). Ele consiste na injeção de corrente elétrica no solo e as diferenças potenciais resultantes são medidas. Para tanto, são utilizados quatro eletrodos, dois deles utilizados para a injeção da corrente elétrica (eletrodos de corrente), e dois para medir a diferença de potencial resultante (eletrodos de potencial). Essas diferenças de potencial fornecem informações sobre as propriedades da subsuperfície (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Quando se trata de detecção de vazamentos, os principais métodos utilizados, de acordo com Hunaidi e Wang (2006) e com Colombo, Lee e Karney (2009), são os métodos acústicos, onde destacam-se a utilização de dispositivos de escuta e a correlação dos ruídos de vazamentos; e os métodos não acústicos, no qual se destaca o uso do GPR. Além destes, a inspeção física também é bastante utilizada, embora seja pouco sistemática. Nesta análise utiliza-se da observação, reflexão sobre a superfície do solo e o crescimento anômalo da vegetação para inferir se há indícios ou não de vazamentos de água.

Os métodos acústicos utilizam sensores de vibração ou hidrofones, que são temporariamente ou permanentemente conectados às tubulações. Esse método identifica o som ou vibrações induzidas pela água que sai a partir da tubulação sob pressão (KHULIEF et al., 2012). Ou seja, para os métodos acústicos serem utilizados na detecção de vazamentos as tubulações devem ser pressurizadas. Por sua vez, o GPR examina a subsuperfície enviando impulsos eletromagnéticos de alta frequência para o subsolo. A localização dos vazamentos se dá por meio dos estudos de padrões de perturbação apresentados nos radagramas (LAI et al., 2016).

O objetivo deste trabalho é determinar a localização exata de vazamentos em uma adutora de concreto que não funciona afogada, ou seja, não se encontra pressurizada com a técnica de eletrorresistividade. A hipótese levantada é que é possível localizar os vazamentos com a eletrorresistividade, porém com baixa precisão. Para o aferimento da identificação, duas contraprovas serão utilizadas: o

GPR e a escavação do local (visualização do vazamento). Serão realizadas medições in loco, utilizando um eletrorresistivímetro da Terrameter SAS1000, e duas antenas GPR, sendo uma de 100MHz e outra de 200MHz, produzidas pela Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). A adutora utilizada no estudo está localizada na cidade de Nova Lima, no estado de Minas Gerais (Brasil), e faz parte do “Sistema Produtor Rio das Velhas”. Este sistema abastece parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte e é responsável pelo abastecimento de água de cerca de 2 milhões de pessoas.

METODOLOGIA

Área de estudo

O local de estudo se encontra em Nova Lima, município de Minas Gerais (Brasil), latitude 19° 59′ 9″ S e longitude 43° 50′ 49″ W (figura 4.1). A adutora de água tratada possui diâmetro de 2.400 mm e faz parte do chamado “Sistema Produtor do Rio das Velhas” que por sua vez faz parte do “Sistema Integrado de Abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Este sistema é responsável pelo fornecimento de água a cerca de 2.200.000 pessoas, abrangendo os municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos, Santa Luzia e Sabará, todos localizados em Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2013).

As coletas de dados, detalhadas a seguir, são apresentadas na figura 4.1, em cada uma delas é mostrada uma foto do local, bem como suas localizações por meio de coordenadas.

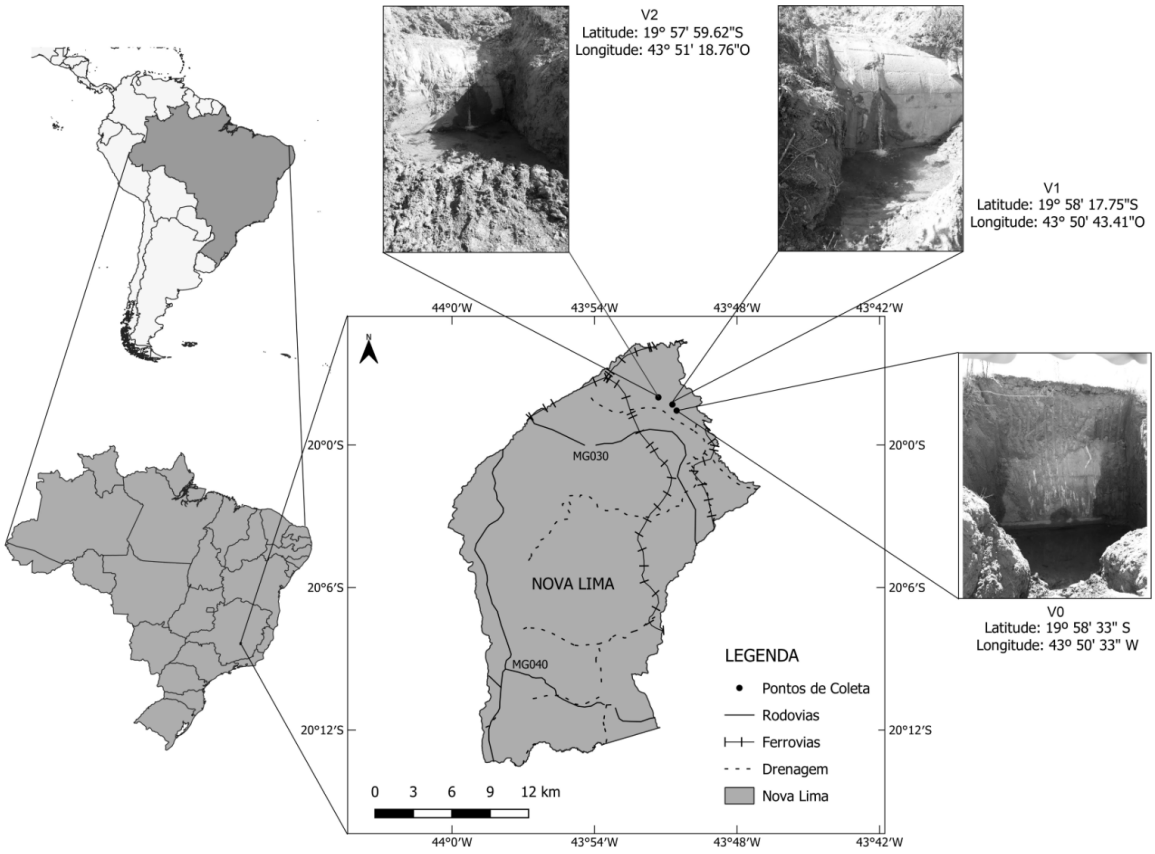


Figura 4.1 - Localização do município de Nova Lima (Minas Gerais) e pontos de coleta de dados
FONTE: A autora

Equipamento e Coleta de Dados de Eletrorresistividade

O eletrorresistivímetro utilizado para as coletas dos perfis longitudinais possui um canal de entrada e é produzido pela Abem® (ABEM, 2009).

Foram realizadas três coletas de dados, uma no primeiro semestre (V0) e duas no segundo semestre de 2018 (V1 e V2) (figura 3.4). A coleta em V0 foi realizada no dia 11 de maio de 2018, e as coletas V1 e V2 no dia 17 de setembro (tabela 4.1).

A escolha dos meses para a coleta de dados no campo foi realizada de acordo com a última Normal Climatológica divulgada pelo Instituto Nacional De Meteorologia – INMET (2018). Segundo dados publicados pelo instituto, os meses de maio e setembro possuem uma precipitação média baixa, para a estação meteorológica de Belo Horizonte, a estação mais próxima do local deste trabalho. Entretanto, ressalta-se que a coleta realizada em setembro foi realizada em um dia chuvoso.

Tabela 4.1 - Coletas de campo realizadas, com suas respectivas datas, objetivos e número de perfis realizados

Data	Coleta	Objetivo	Caminhamento elétrico	GPR
11 de maio de 2018	V0	Testar o equipamento Identificar vazamento	2 perfis	-
13 e 17 de setembro de 2018	V1	Identificar vazamento	1 perfil	3 perfis
	V2	Identificar vazamento	1 perfil	9 perfis

FONTE: A autora

Aplicou-se a técnica do caminhamento elétrico que consiste em investigar a variação lateral e em profundidade de resistividade em uma seção geológica. Como a corrente flui de modo radial, à medida que se aumenta a distância entre os eletrodos C1 e C2 aumenta-se a profundidade de investigação.

O local onde realizou-se a primeira coleta de dados foi escolhido de acordo com vazamentos identificados em uma visita prévia ao local, realizada dia 27 de agosto de 2017. Nesta visita foram identificados quatro vazamentos e cinco poços de visita (PV) ao longo do trecho percorrido. O ponto escolhido para a realização do perfil de eletrorresistividade foi um que se encontrava afastado dos PVs, pois os poços de visita possuem tampa de metal e, consequentemente provocariam ruídos nas medições.

A primeira coleta de dados (V0) foi realizada dia 11 de maio de 2018. Nela foram utilizados, primeiramente, 2 cabos e 64 eletrodos, espaçados de metro a metro. Em seguida realizou-se um “roll-along”, ou seja, ao final da linha de coleta, foram adicionados mais 32 eletrodos, totalizando 96 eletrodos. A amplitude da corrente utilizada foi 50 mA, o ciclo da onda 0,2 s e no total houveram 15 níveis de investigação.

Além disso, foi coletado um perfil recíproco, onde houve a primeira coleta de dados. Este recíproco possuía aproximadamente 77% dos pontos, e foi realizado com o intuito de verificar o erro do equipamento utilizado. Como o erro absoluto, que é apresentado nos perfis de pseudoprofundidade (resultado da eletrorresistividade) não leva em consideração a ordem de grandeza, foi realizado uma correlação de Pearson, que mede o grau da correlação, e a direção desta, entre as duas medidas coletadas no ponto V0.

Esta correlação mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, e sua análise se dá por meio de um coeficiente que assume valores entre -1 e 1, sendo que se este coeficiente for igual a 1 tem-se uma correlação perfeita

positiva entre as variáveis. Caso o coeficiente for igual a -1, há uma correlação negativa perfeita entre as variáveis (se uma aumenta, a outra sempre diminui). Já se o coeficiente for 0 (zero), as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.(BENESTY et al., 2009)

A segunda coleta de dados foi realizada dia 17 de setembro de 2018. Nela foram coletados perfis de eletrorresistividade em dois pontos distintos V1 e V2. No ponto V1 foram utilizados 2 cabos e 64 eletrodos, espaçados a cada meio metro, totalizando um perfil de 32 metros. No ponto V2 foram utilizados, 2 cabos e 64 eletrodos, espaçados de metro a metro, totalizando um perfil de 64 metros. Para ambos os pontos de coleta a amplitude da corrente utilizada foi 10 mA, o ciclo da onda 0,2 s e no total houveram 15 níveis de investigação.

Nesta segunda coleta de dados foi necessário excluir alguns eletrodos da medição, são eles: eletrodos 46, 48 e 62 no ponto V1, e eletrodos 46, 48, 56, 58 e 62 no ponto V2. Esta exclusão foi necessária devido ao não reconhecimento do dos eletrodos por parte do eletrorresistivímetro. Entretanto, destaca-se que as coletas que não foram realizadas não afetaram significativamente o resultado obtido.

O arranjo escolhido para as coletas foi o Dipolo-Dipolo. Neste arranjo utilizam-se simultaneamente vários dipolos de recepção (P_1P_2) dispostos ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo P_1P_2 corresponde a um nível de investigação. Ele foi adotado pois, de acordo com Braga (2016), com ele pode-se estudar as variações horizontais de um parâmetro geoelétrico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigações.

Nesse tipo de arranjo a profundidade teórica atingida em cada nível investigado, é tomada, segundo alguns autores, como sendo Z = R/2 (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (C_1C_2 e P_1P_2). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se for tomada como sendo aproximadamente R/4 (BRAGA, 2016).

Na coleta realizada os espaçamentos utilizados para “a” variavam de 1 a 6 metros e o espaçamento de “n” de 1 a 4 metros.

Os dados foram armazenados na memória do equipamento durante a aquisição e, posteriormente, descarregados em um computador, onde foram modelados no software Res2dInv. Este software determina, automaticamente, um modelo de resistividade bidimensional para o meio por intermédio dos dados elétricos de campo.

A resposta obtida com o software é a inversão dos dados de resistividade coletados. Ele também apresenta as seções de pseudoprofundidade de resistividade aparente medida e a de resistividade aparente. Essa seção de resistividade aparente é calculada considerando um semi-espaço homogêneo, sendo a resistividade constante e igual à média dos logaritmos dos valores das resistividades aparentes das seções de pseudoprofundidade.

Equipamento e Coleta de Dados de GPR

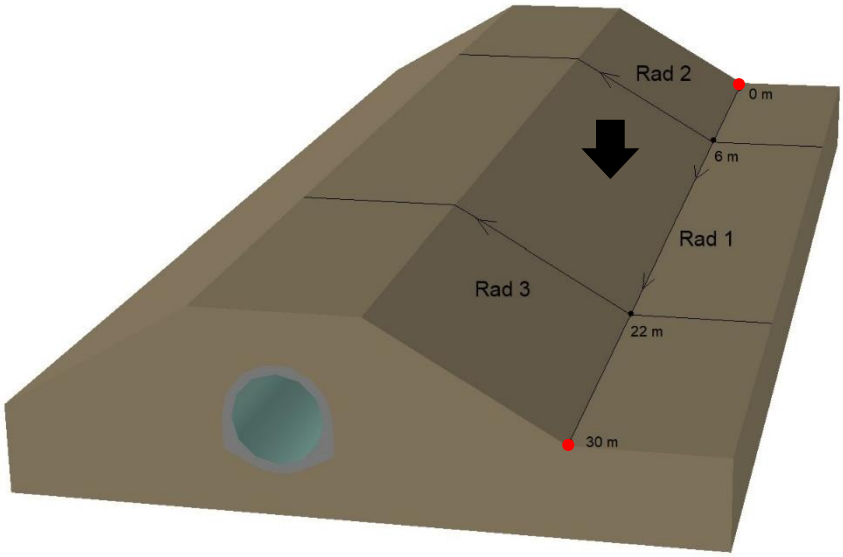
Os equipamentos utilizados para as coletas dos perfis de GPR foram realizadas com duas antenas blindadas, uma de 100MHz e outra de 200MHz, produzidas pela GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) modelo SIR 3000. Os parâmetros considerados para a escolha e aquisição do equipamento GPR foram definidos de acordo com o meio a ser pesquisado e com as condições de resolução e penetração das ondas. Eles podem ser observados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Configurações utilizadas para coleta de dados com o GPR

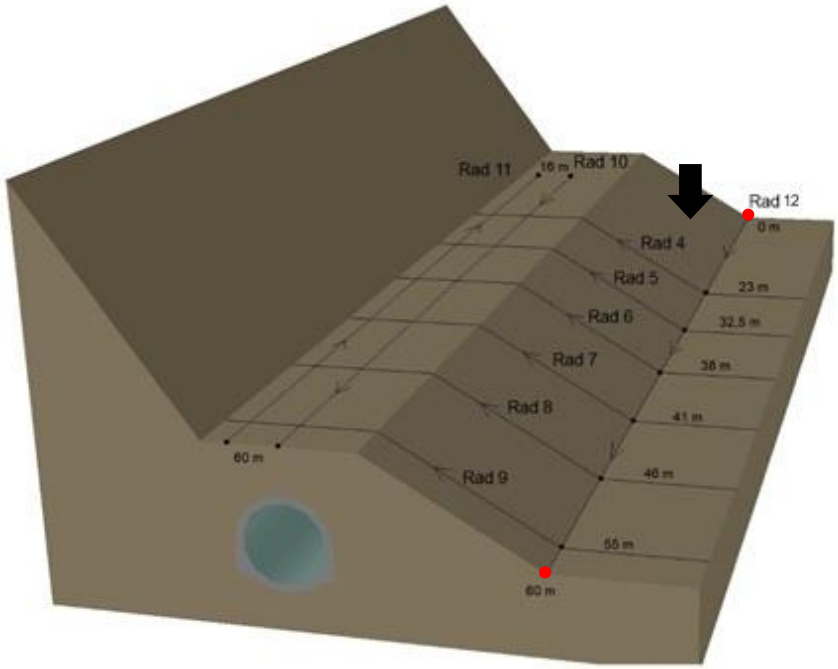
	Antenas	
	100MHz	**200MHz**
Transmit rate	25 kHz	100 kHz
Samples	256	512
Range	200	200
Rate	55	120
Scans/m	50	100
Gain	Manual, 1pt, -6dB	Manual, 1pt, -6dB
HP_IIR	20	20
LP_IIR	800	800
FIR (HP/LP)	0	0
Stacking	0	0

FONTE: A autora

As coletas dos perfis foram realizadas dia 13 de setembro de 2018 nos pontos V1 e V2. No primeiro ponto de coleta, o perfil realizado perpendicular à adutora possui 30 metros, já no segundo ponto, 60 metros. Além dos perfis perpendiculares também foram realizadas coletas transversais. Em V1 elas aconteceram em 6m e 22m, e em V2 foram realizadas em 23m, 32,5m, 38m, 41m, 46m e 55m. No ponto V2 também foi possível realizar aquisição de dados em cima do talude da adutora, os dois perfis coletados possuem 44 metros (figura 4.2).



(a)



(b)

Figura 4.2 - Figura 3.9 - Esquema da coleta dos dados com o GPR, (a) em V1 e (b) em V2, sendo que a sigla Rad representa cada um dos radagramas coletados. Os pontos vermelhos indicam o início e o final do caminhamento elétrico realizado. As setas pretas indicam os
FONTE: A autora

Os softwares Reflexw 2D data-analysis e Radan® 7 foram utilizados para o processamento dos dados coletados. As etapas de processamento utilizadas foram:, análise do espectro de frequências, filtragem dewow, set time zero, window traces, e a aplicação de ganhos.

Coleta e Análise do Solo

Conhecer as características da subsuperfície da área estudada é importante em estudos geofísicos. Vários estudos documentaram que existem relações entre propriedades físicas na zona não saturada, como teor de umidade, e medições geofísicas. Dentre esses estudos, destacam-se os de Mualem; Friedman (1991), Kalinski; Kelly (1993), Auerswald; Simon; Stanjek (2001) e Schwartz; Schreiber; Yan (2008).

Assim, serão coletadas amostras do solo da região para análises físicas, com o intuito de auxiliar nas análises dos resultados obtidos com o eletrorresistivímetro e o GPR. Esta análise se faz importante uma vez que solos mais úmidos apresentam menores resistividades, e em solos de textura fina, a corrente elétrica em argila não é apenas conduzida pela água livre dos poros, mas também pela água adsorvida na superfície da partícula de argila (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Os pontos onde foram coletadas as amostras de solo correspondem aos pontos V1 e V2 (figura 4.1). Para a preparação das amostras para os ensaios de caracterização a amostra foi seca ao ar até próximo da umidade higroscópica, em seguida os torrões foram desmanchados e a amostra homogeneizada. Para a análise granulométrica foram separados 4kg de solo. Para a determinação da massa específica dos grãos do solo que passam na peneira de 4,8 mm foram separados 500g de solo, já para o solo retido nesta peneira, a determinação da massa aparente e da absorção de água dos grãos foi realizada tomando-se 2kg de solo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a).

O ensaio de análise granulométrica foi realizado por peneiramento e por granulometria a laser. Para o peneiramento foram utilizadas as peneiras: 25,4mm, 19,1mm, 9,5mm, 4,75mm, 2,0mm, 1,8mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,075mm. Para o ensaio de granulometria a laser, utilizou-se o granulômetro Cilas 1090. Neste ensaio foram utilizadas amostras de solo passante pela peneira de 0,075 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016b).

O ensaio para determinação do teor de umidade foi realizado tomando três amostras de solo que passaram pela peneira de 4,8 mm, cada uma com 50g cada. As amostras foram colocadas em estufa à 105ºC por 24h. Depois de secas as amostras foram pesadas, e os cálculos para a determinação do teor de umidade foram

realizados. O resultado obtido foi a média dos resultados das três amostras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, 2016a).

Para a determinação da massa específica das amostras, homogeneizou-se as amostras que foram secas previamente e foi pesado 50g de solo para cada análise realizada. O solo então foi transferido para um béquer e foi adicionada água destilada. A mistura foi deixada em repouso por cerca de 23h.

Após o período de 23h, a mistura foi dispersada por 15 minutos. Transferiu-se, então a amostra para um picnômetro tomando o cuidado de remover todo o material do copo dispersor, evitando perdas. Ao picnômetro foi adicionada água destilada até cerca de 1 cm abaixo do gargalo e aplicou-se pressão de vácuo de 88kPa durante 15 minutos. Após isto, o picnômetro foi pesado.

A massa específica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³), do solo foi calculada, então seguindo a seguinte equação:

$$Massa\ específica\ = \frac{M_1\ \times \frac{100}{100+W}}{\left(M_1\ \times \frac{100}{100+W}\right) + M_3 - M_2}\ \times MespW \qquad (4.1)$$

Onde:

M_1 é a massa do solo úmido

M_2 é a massa do picnômetro + solo + água à temperatura T do ensaio

M_3 é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência à temperatura T de ensaio

W é a umidade inicial da amostra

M*esp*W é a massa específica da água, à temperatura T de ensaio, obtida na tabela A.1 da norma ABNT NBR 6458 de 2016.

RESULTADOS

Resultado da aplicação dos métodos geofísicos

As seções de pseudoprofundidade de resistividade aparente obtidas em V0 (figura 4.3) mostram uma alta resistividade em maiores profundidades. As altas resistividades são intercaladas com valores mais baixos de resistividade e padrões semelhantes foram obtidos tanto na coleta principal quanto na recíproca.

Segundo o resultado obtido com o Res2DInv, o erro absoluto (discrepância entre o valor medido e a aproximação) para o perfil obtido na coleta principal foi 5,4%, enquanto que na recíproca, o erro absoluto foi de 6,8%.

Apesar de estarem localizadas em uma área onde havia um vazamento identificado anteriormente, não foi possível identifica-los através dos perfis resultantes da primeira coleta.

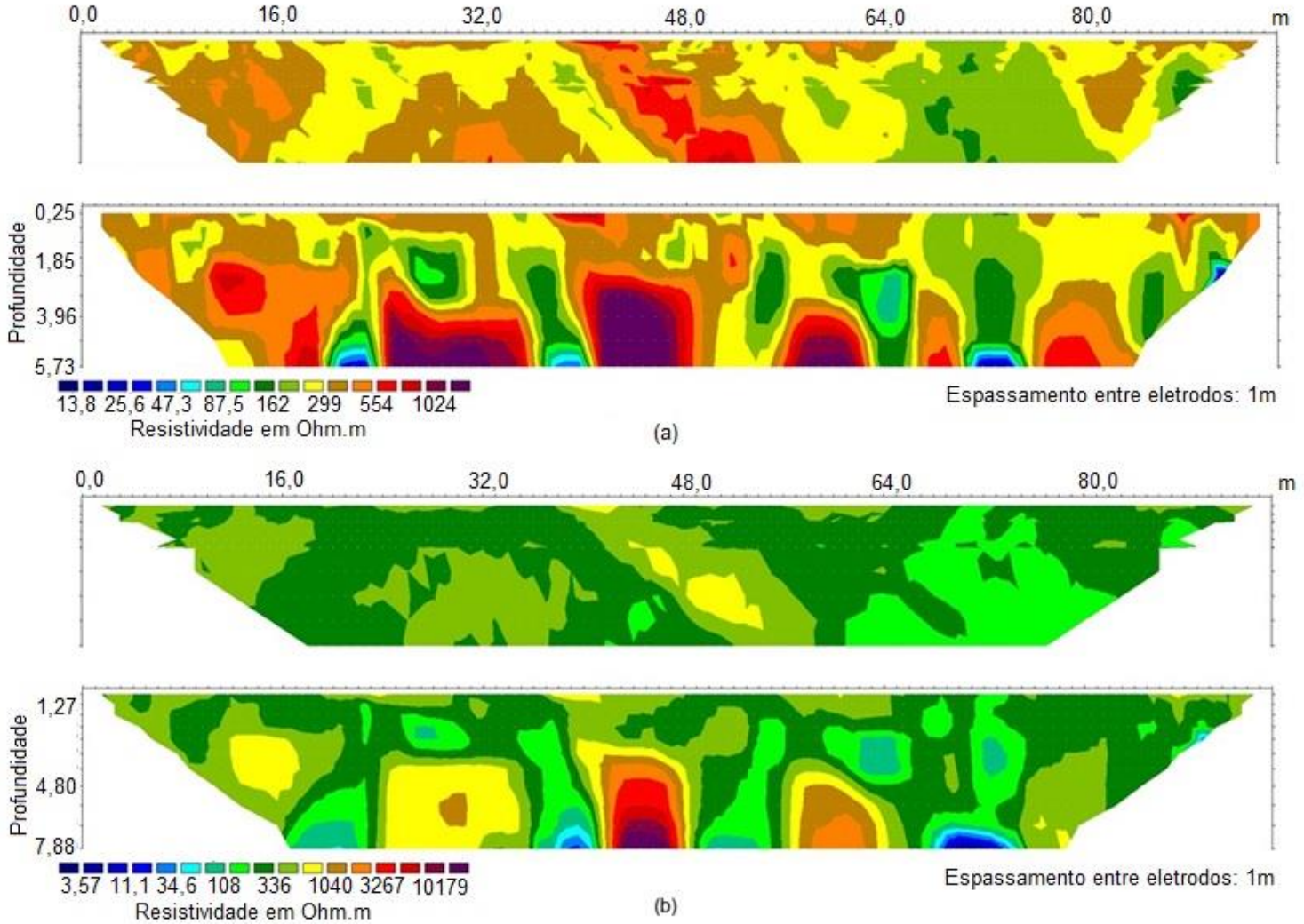


Figura 4.3 – (a) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente coletada em V0. (b) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente recíproca coletada em V0
FONTE: A autora

A correlação de Pearson realizada entre os dados obtidos em V0 é apresentada na figura 4.4, onde observa-se que a correlação obtida é positiva e muito forte. Entretanto, faz-se necessário ressaltar que ela foi realizada apenas para os resultados cujo n = 1. Assim, a correlação foi realizada com 431 pontos.

Na figura 4.4, percebe-se também a presença de 5 *outliers* (1,16%). Isto quer dizer que mesmo tendo uma boa correlação podem haver pontos que não estão corretos na medição, mas que como um todo o equipamento utilizado fornece dados confiáveis.

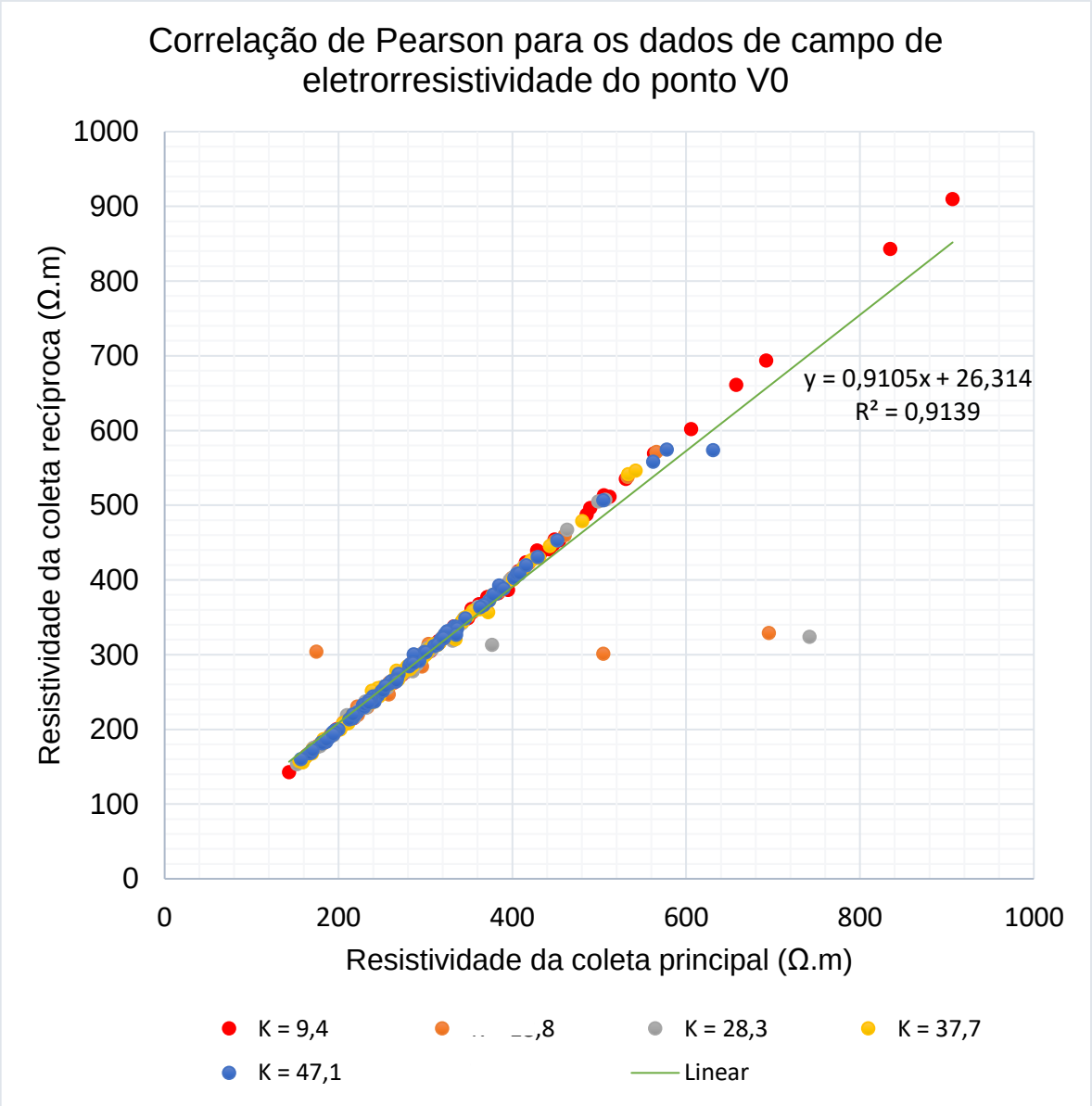


Figura 4.4 - Correlação de Pearson para os dados de campo de eletrorresistividade do ponto V0
FONTE: A autora

Nos resultados obtidos na segunda coleta com a eletrorresistividade, pontos V1 e V2, há a presença de valores de baixa resistência nos locais aonde haviam vazamentos confirmados visualmente (figuras 4.5a e 4.7a).

No perfil de pseudoprofundidade correspondente ao ponto V1, é possível perceber uma área com menor resistividade quando a distância horizontal do perfil está de 5 a 11m. Essa baixa resistividade chega às camadas mais profundas de investigação, diferente das outras áreas com menor resistividade que ficaram concentradas mais superficialmente. Além disso, a região próxima aos 15m mostra um baixo valor de resistividade. Esta área se encontra próxima ao vazamento localizado previamente. (Figura 4.5a).

Por sua vez, o radagrama do ponto V1, correspondente a seção Rad 1 e obtido com a antena de 200 MHz, (figura 4.5b), apresenta atenuação do sinal na faixa de 12 à 18 metros do início do perfil, ou seja, locais onde a amplitude da onda é menor, o que pode estar relacionado a presença de água. Além disso, percebe-se reflexões mais profundas nas partes mais cinzas do perfil.

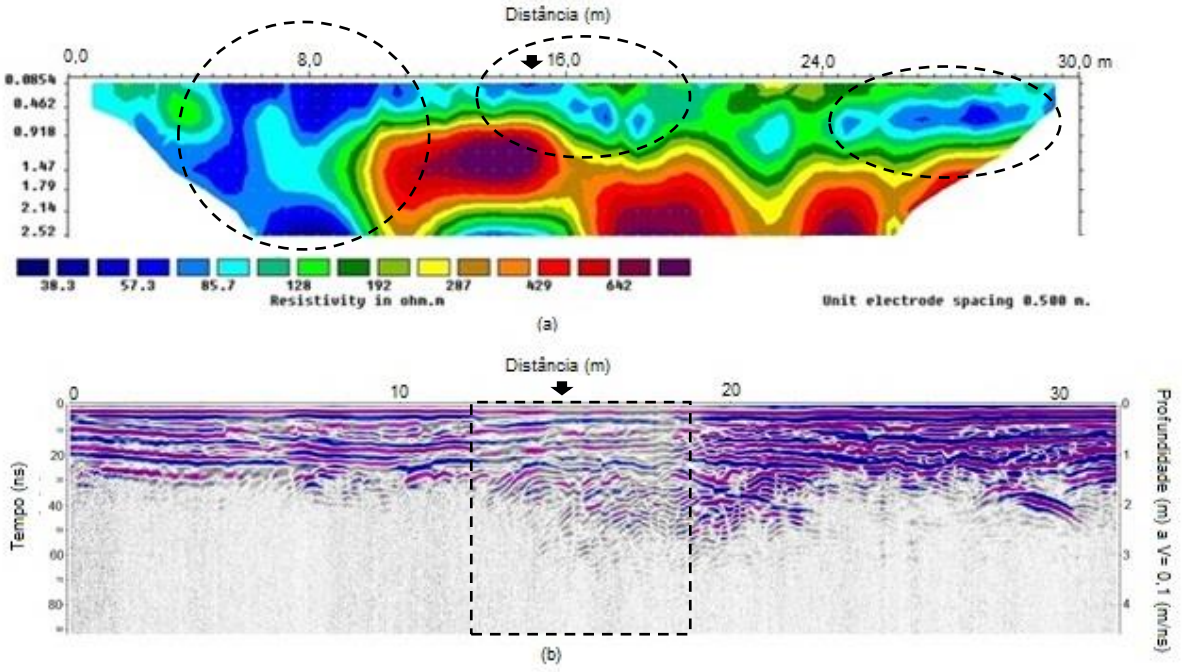


Figura 4.5 - (a) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente do ponto V1, sendo que as áreas de baixa resistividade são indicadas pelos círculos tracejados em preto, e (b) Radargrama obtido em V1 com antena de 200 MHz (seção Rad 1), sendo marcada a área onde há a atenuação do sinal (retângulo tracejado). A seta preta representa vazamento localizado previamente através de inspeção visual.

FONTE: A autora

No perfil transversal no ponto V1 (seção Rad 2), é possível visualizar a reflexão da tubulação à adutora (figura 4.6). A hipérbole que corresponde à reflexão da tubulação está distorcida devido a inclinação do talude onde foram coletados os dados.

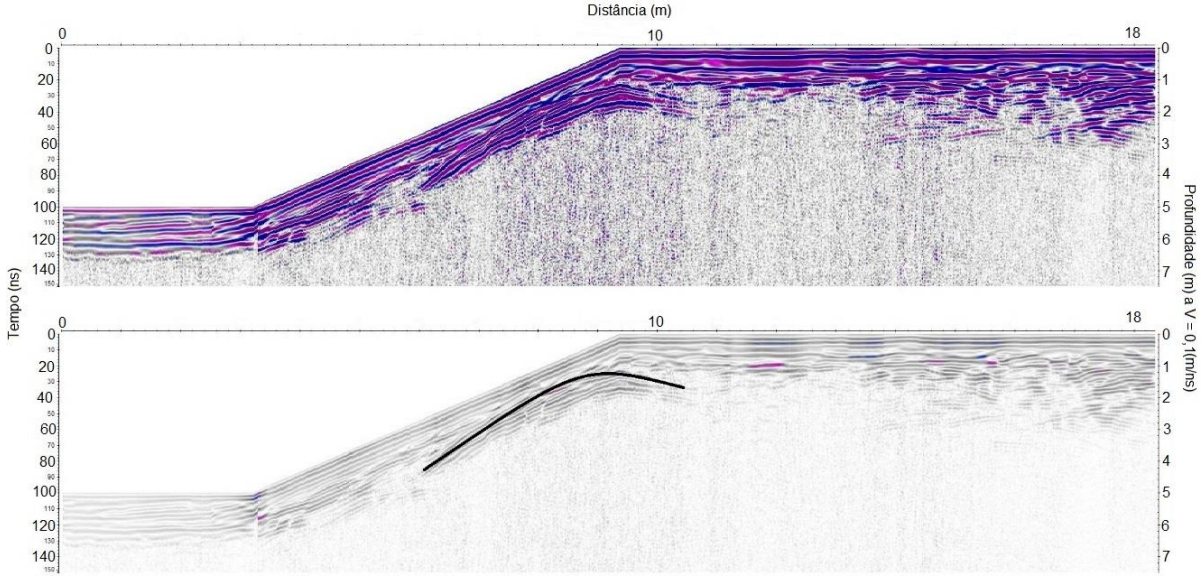
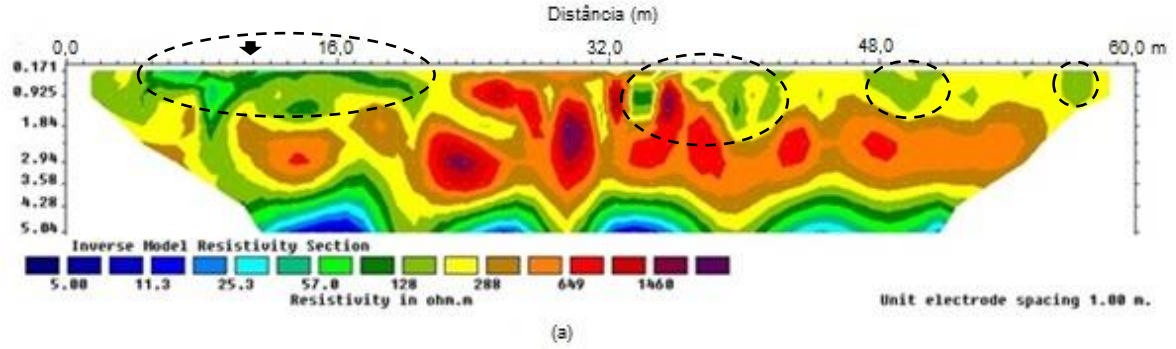


Figura 4.6- Radagrama obtido em V1 com antena de 200 MHz - (seção Rad 2) - A linha preta corresponde a hipérbole identificada como o limite da adutora.
FONTE: A autora

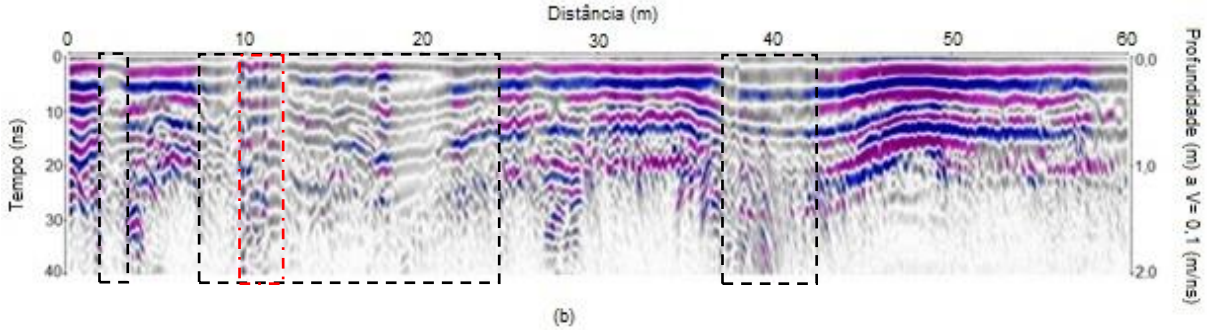
No perfil de pseudoprofundidade coletado em V2, além da área de baixa resistividade coincidente com o ponto do vazamento previamente identificado, entre 9 a 12m, percebe-se outros pontos com características semelhantes: em 34m, de 38,5 à 43m, de 47 à 51m e em 56m (figura 4.7a).

O erro absoluto para o perfil do ponto V1 foi 6,4% enquanto do perfil do ponto V2 foi 8,1%.

Por sua vez, os principais radagramas para o ponto V2 foram aqueles coletados paralelamente à adutora (Rad 12) e aquele coletado acima do talude da adutora (Rad 10). Percebe-se a atenuação do sinal em 11m (próximo ao vazamento indicado pela empresa) e também em 2m, entre 6 – 22m e entre 37–42m (figura 4.7b) na seção Rad 12.



(a)



(b)

(c)

Figura 4.7 - (a) Seção de pseudoprofundidade de resistividade aparente do ponto V2, sendo que as áreas de baixa resistividade são indicadas pelos círculos tracejados em preto, e (b) Retângulos tracejados em preto indicam atenuação de sinal. O retângulo pontilhado em vermelho indica o local onde foi necessário colocar galhos para que fosse possível atravessar a água presente no local. A seta preta representa vazamento localizado previamente. (c) Aquisição de dados no local onde a água escoava.

FONTE: A autora

No radagrama relativo ao Rad 10 é possível visualizar a reflexão da adutora e uma reflexão abaixo desta, que inicia em 10 m (figura 4.8).

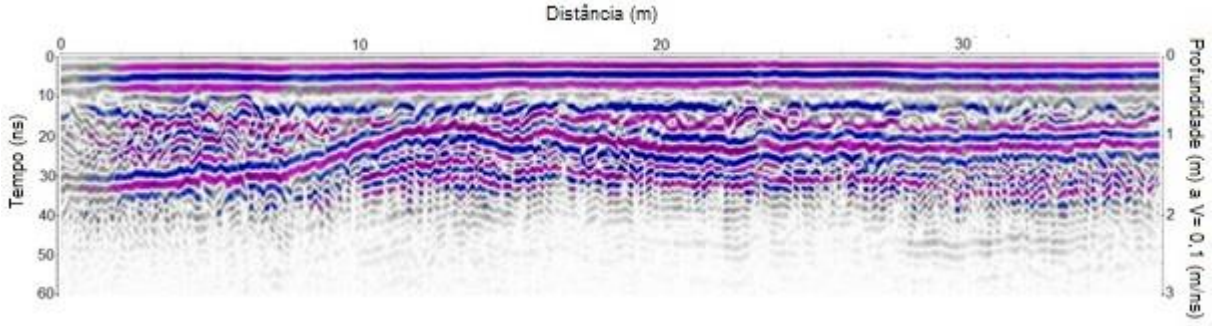


Figura 4.8 - Radagrama obtido em V2 com antena de 200 MHz (seção R10) – em cima do talude da adutora.

FONTE: A autora

Resultado da Análise do Solo

O teor de umidade encontrado para as amostras de solo coletadas em V1 e V2, foram, 1,868% e 2,459%, respectivamente (tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Teor de Umidade dos solos coletados em V1 e V2

	Amostra	Teor de Umidade (%)
V1	1	1,854
	2	1,854
	3	1,895
V2	1	2,438
	2	2,501
	3	2,438

FONTE: A autora

Com relação ao ensaio de massa específica, o solo do V2 (2,851g/cm^3) se mostrou mais denso que o solo do V1 (2,801 g/cm^3) apenas 1,77%.

A diferença da análise granulométrica entre os solos dos dois pontos é mais evidente, quando considerado o método de peneiramento (figura 4.9). Entretanto, destaca-se a grande quantidade de finos (V1 = 17,6% e V2 = 35,5%).

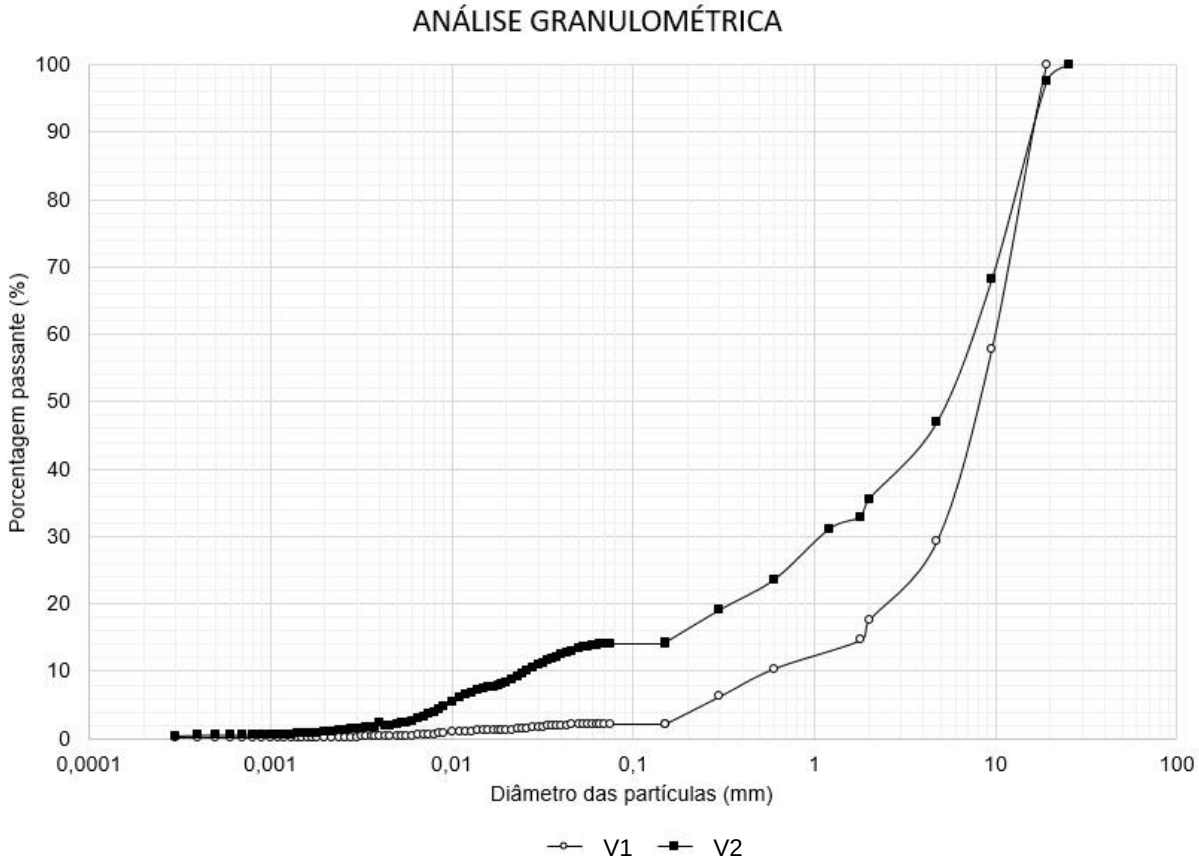


Figura 4.9 - Curva granulométrica dos solos coletados em V1 e V2
FONTE: A autora

Os ensaios de caracterização do solo mostraram, portanto, que as amostras do ponto V1 e V2 são semelhantes.

DISCUSSÃO

A eletrorresistividade se mostrou uma possível técnica para identificação de vazamentos em adutoras de água uma vez que os perfis obtidos por ela foram comparáveis com os obtidos por meio do GPR. Os pontos V1 e V2 apresentaram baixa resistividade aparente e atenuação de sinal do GPR nas áreas dos vazamentos previamente localizados através de inspeção visual. Porém algumas limitações foram observadas no emprego da eletrorresistividade tais como interferências causadas pela presença de taludes próximos os locais de vazamento, e água contida na superfície onde alguns eletrodos estavam localizados e a presença de solos de textura fina.

A comparação dos perfis de eletrorresistividade coletados no ponto V0 (coleta principal e recíproca) mostrou que os padrões de alternância entre alta resistividade

aparente e baixa resistividade aparente foram mantidos, além de possuírem um erro absoluto similar. As áreas mais profundas do perfil de eletrorresistividade, apresentaram valores mais altos em ambos perfis. A análise neste ponto sugere a ocorrência de interferências geológicas relacionadas a presença de taludes próximos a adutora e, consequentemente, próximo ao local onde havia um vazamento, e possível existência de rochas nos locais mais profundos. A não identificação de vazamentos nos perfis de eletrorresistividade pode ser um indicativo que as medidas de manutenção adotadas pela empresa de abastecimento de água foram eficazes, uma vez que decorreu cerca de 9 meses desde a visita prévia ao local e a primeira coleta de dados.

O tipo de solo também pode oferecer dificuldades ao emprego tanto da técnica de eletrorresistividade quanto do GPR. Em solos de textura fina, a corrente elétrica em argila não é apenas conduzida pela água livre dos poros, mas também pela água adsorvida na superfície da partícula de argila (SAMOUËLIAN et al., 2005). Entretanto, mesmo se tratando de solos com grande percentual de finos (argila) e quartzo, a eletrorresistividade foi capaz de indicar os locais dos vazamentos. Por sua vez, no uso do GPR há uma atenuação do sinal associada ao solo rico em argila (ALGEO et al., 2016), mas o método também foi eficiente na detecção dos vazamentos.

Com relação a precisão, percebe-se que o GPR define melhor a área de ocorrência do vazamento, após o correto processamento, devido o contraste das áreas com presença e ausência de água, inclusive em solos argilosos. A eletrorresistividade não define bem o final da área de vazamento, sendo esta mais uma limitação do emprego da técnica.

Com relação aos resultados obtidos com a utilização do GPR nos locais onde há a presença de água, e consequentemente há a atenuação do sinal, esperava-se que uma menor quantidade de reflexões fosse visualizada (hipérboles). Entretanto, presença de maiores quantidades de reflexões observada pode estar relacionada a presença de pedregulhos ou vegetação que começa a ocorrer devido ao vazamento. É importante salientar que a atual forma de identificação de localização de vazamentos é através da observação do tipo de vegetação presente no talude.

No ponto V2, algumas áreas tiveram sinais atenuados nos radargramas e também baixa resistividade nos perfis do caminhamento elétrico e se localizavam fora da área onde haviam vazamentos previamente detectados. Esses locais

correspondem a uma faixa de baixas resistividades que vai de 33 a 43 m no perfil da eletrorresistividade (figura 4.7a) e a uma faixa de atenuação do sinal GPR (figura 4.7b) que vai de 37 a 43m. Acredita-se, portanto, que estes são novos locais de vazamentos capturados pelas duas técnicas.

Por fim é importante mencionar as dificuldades encontradas análise dos dados de eletrorresistividade esteve ligada a umidade presente no solo, já que de forma inesperada ocorreram precipitações pluviométricas um dia antes da segunda coleta de dados. Isto causou uma grande diminuição da resistividade no perfil de eletrorresistividade coletado em V1 entre 5 e 11m (figura 4.5a).

Apesar disto, pode-se afirmar que a eletrorresistividade foi capaz de identificar corretamente os locais de vazamento da adutora e pode ser uma importante técnica para contribuir com a redução de perdas em sistemas de abastecimento de água.

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou determinar a localização de vazamentos em uma adutora de concreto utilizando a eletrorresistividade e aferindo o método com dados obtidos pelo GPR e pela identificação visual. Os resultados obtidos comprovam que a eletrorresistividade é capaz detectar os vazamentos em solos com grande quantidade de finos e argilosos, não de uma maneira exata, mas precisa o suficiente para auxiliar nos trabalhos de manutenção das empresas de saneamento que trabalham com este tipo de tubulação de distribuição de água. Questões geológicas como presença de taludes e rochas profundas podem interferir no emprego da técnica

A partir do trabalho ficou claro que um entendimento adequado da teoria do método, dos procedimentos de campo, da interpretação dos dados, bem como conhecimento da geologia local são fatores necessários para realizar a identificação.

4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ELETRORRESISTIVIDADE PARA A DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM TUBULAÇÕES DE CONCRETO

Resumo - Um controle de perda de água eficiente e eficaz deve ser reconhecido como uma prioridade para melhorar o fornecimento de água potável. Neste contexto, existem diversas formas de detectar e analisar os vários tipos de vazamentos. O emprego de simulações numéricas computacionais permite a resolução de problemas complexos de engenharia e de física, sem que seja necessária uma observação real do determinado fenômeno que se está estudando. Assim, de forma a tentar identificar os locais passíveis de vazamentos em tubulações de grande diâmetro (adutoras), o presente trabalho pretende simular o uso do método geofísico da eletrorresistividade na detecção destes vazamentos. Para isso serão realizadas simulações computacionais com o software COMSOL Multiphysics®. Essas simulações pretendem averiguar a influência do tamanho da pluma do vazamento e a idade do concreto da adutora na precisão da detecção deste vazamento por meio da eletrorresistividade.

Palavras-chave: Detecção de vazamentos, COMSOL Multiphysics, Eletrorresistividade.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água são construídos para fornecer constantemente água em quantidade suficiente aos usuários com uma pressão e qualidade aceitáveis da forma mais econômica possível. Dessa forma, uma vez que os componentes individuais de um sistema podem falhar, os sistemas de distribuição de água são projetados com uma grande margem para que o sistema possa funcionar adequadamente, mesmo quando alguns componentes individuais (por exemplo, tubos, válvulas ou bombas) estão fora de serviço, ou seja, a conservação da água por meio da gestão da demanda ou redução na perda pode afetar o dimensionamento das tubulações (MAYS, 1996). E, a quantidade de água perdida ou não contabilizada entre as estações de tratamento e os consumidores finais é tipicamente varia entre 20 e 30% da produção (HUNAIDI et al., 2000).

O problema dos vazamentos nos sistemas públicos de água prejudica seriamente a eficiência dos recursos hídricos. Portanto, a localização de vazamentos em tubos

subterrâneos é uma das etapas cruciais para a otimização do uso de recursos hídricos, pois o vazamento geralmente é o maior componente de perda de distribuição (CATALDO et al., 2017a). Essa localização de vazamentos pode se dá de diversas formas, que vão desde a inspeção visual até a utilização de métodos geofísicos.

Assim, de forma a tentar identificar os locais passíveis de vazamentos em tubulações de grande diâmetro (adutoras), o presente trabalho pretende simular o uso do método geofísico da eletrorresistividade na detecção destes vazamentos. O método consiste na injeção de corrente elétrica no solo e as diferenças potenciais resultantes são medidas. Para tanto, são utilizados quatro eletrodos, dois deles utilizados para a injeção da corrente elétrica (eletrodos de corrente), e dois para medir a diferença de potencial resultante (eletrodos de potencial). Essas diferenças de potencial fornecem informações sobre as propriedades da subsuperfície (SAMOUËLIAN et al., 2005).

A simulação realizada será feita por meio do método dos elementos finitos (MEF), ele propõe que as infinitas variáveis desconhecidas sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Esses elementos possuem dimensões finitas, e são conectados entre si por pontos denominados de nós. Ao conjunto de elementos e nós dá-se o nome de malha (MOAVENI, 2014). Para tanto, será utilizado o software COMSOL Multiphysics®, que é um software de simulação multipropósito, cuja plataforma engloba todas as etapas do fluxo de trabalho de modelagem. O software foi escolhido, pois, além de possuir flexibilidade através da modelagem baseada em equações, o departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG possui sua licença de utilização.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar a influência do tamanho da pluma do vazamento e a idade do concreto da adutora na precisão da detecção deste vazamento por meio da eletrorresistividade. As hipóteses levantadas são que quanto maiores as plumas e quanto mais velho o concreto, menor será a precisão do método de detecção.

METODOLOGIA

Área de Estudo

O local de estudo se encontra em Nova Lima, município de Minas Gerais (Brasil), latitude 19° 59′ 9″ S e longitude 43° 50′ 49″ W (figura 4.10). A adutora de água tratada possui diâmetro de 2.400 mm e faz parte do chamado “Sistema Produtor do Rio das

Velhas” que por sua vez faz parte do “Sistema Integrado de Abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Este sistema é responsável pelo fornecimento de água a cerca de 2.200.000 pessoas, abrangendo os municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos, Santa Luzia e Sabará, todos localizados em Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2013).

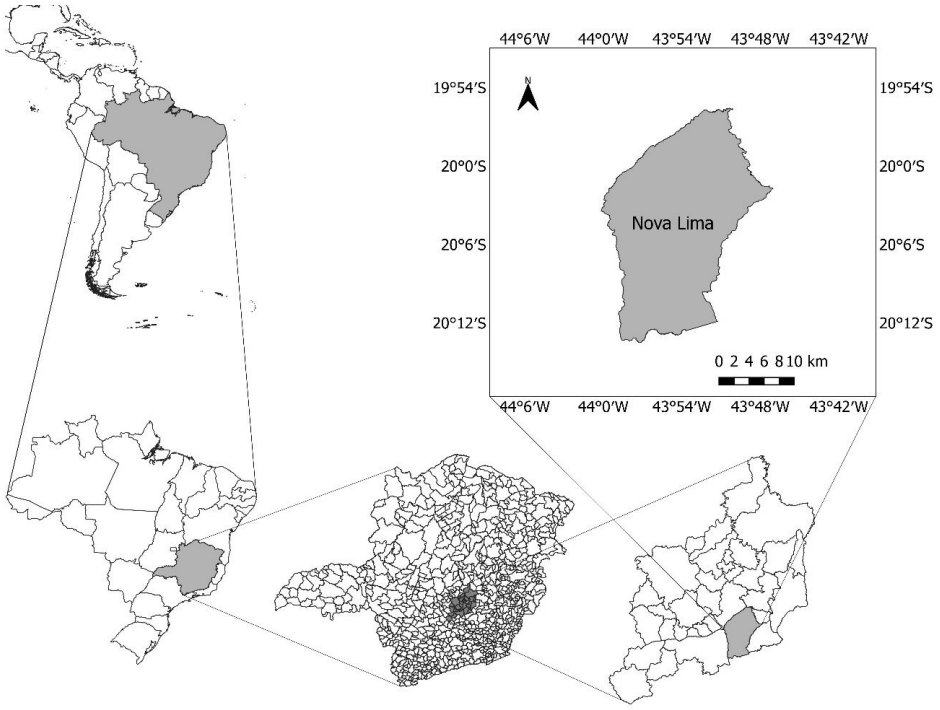


Figura 4.10 - Mapa da localização do município de Nova Lima - Minas Gerais
FONTE: A autora

Física do problema

A lei que inter-relaciona as grandezas diferença de potencial, corrente e resistência, é a Lei de Ohm.

$$\overrightarrow{E} = \rho \vec{J} \tag{4.1}$$

Onde

$\vec{J}$ é a densidade de corrente [A / m²]

ρ é a resistividade elétrica [Ω.m]

$\overrightarrow{E}$ é o intensidade do campo elétrico existente em um meio condutor [N/C]

O princípio de conservação da carga elétrica estabelece que o vetor densidade de corrente deve ser nulo em todo lugar do espaço, menos no ponto de injeção de

corrente, indicando que não há acúmulo de carga elétrica em seu interior (condição de divergência). Assim:

$$\nabla \times \vec{J} = 0 \tag{4.2}$$

O campo elétrico, do tipo conservativo, pode ser expresso pelo gradiente de uma função escalar (V) denominada potencial elétrico e definida de forma que $\overrightarrow{E}$ seja o seu gradiente.

$$\overrightarrow{E} = -\nabla \mathrm{V} \tag{4.3}$$

Sabe-se que o solo é quase sempre não homogêneo e essas não-homogeneidades podem assumir muitas formas. Ele é formado normalmente por várias camadas, que podem ser aproximadamente horizontais e paralelas à superfície ou podem ser inclinadas em um ângulo em relação à superfície. Além disso, o nível freático também atua como uma camada adicional, uma vez que o aumento no teor de umidade abaixo do nível freático resultará em uma mudança significativa na resistividade (TAGG, 1964).

De acordo com (TAGG, 1964), se uma corrente entra no solo em um ponto A na superfície do mesmo, a solução total para o potencial em qualquer ponto na superfície em uma distância “r” da corrente A é:

$$V_{1=} \frac{\mathrm{I}\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{[r^2 + (2nh)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] \tag{4.4}$$

O valor do potencial na superfície é o que a modelagem numérica computacional procurará resolver. A solução numérica do problema é obtida a partir da transformação do domínio em pontos nodais da grade de discretização do domínio. Em seguida os termos das equações diferenciais são discretizados em função desta grade, de forma que suas variáveis sejam expressas como funções dos pontos nodais (YU et al., 1999).

Geometria e Criação da Malha

O perfil da adutora (figura 4.11) foi utilizado para a confecção da geometria do problema no software AutoCAD em 2D. A extensão na direção Z foi de 200 metros, uma vez que é a distância entre os poços de visita (PV) existentes na adutora.

Na confecção da geometria da adutora foram feitas algumas simplificações, sendo a mais relevante, a desconsideração da armadura de aço presente no interior da adutora. Entretanto, ressalta-se que na simulação o concreto especificado foi o concreto armado.

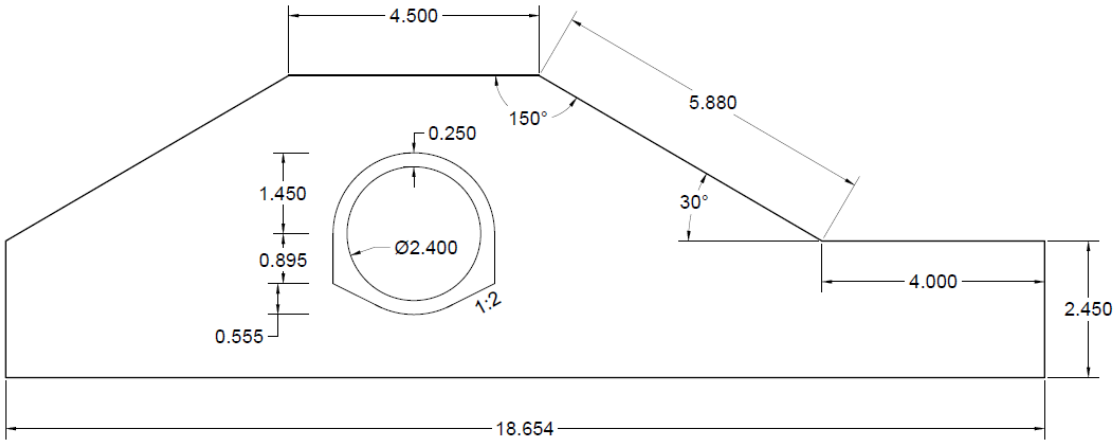


Figura 4.11 - Perfil da adutora de água tratada
FONTE: A autora

Para simular o vazamento de água, foi considerado um prisma envolvendo a adutora. Este prisma possui uma base quadrada de 4,5m de lado, e altura de 10m de comprimento, e foi inserido no meio da adutora, isto é, entre Z = 95m e Z = 105m. A figura 4.12 mostra a geometria da adutora, e a seta indica a localização do prisma que representará o solo úmido.

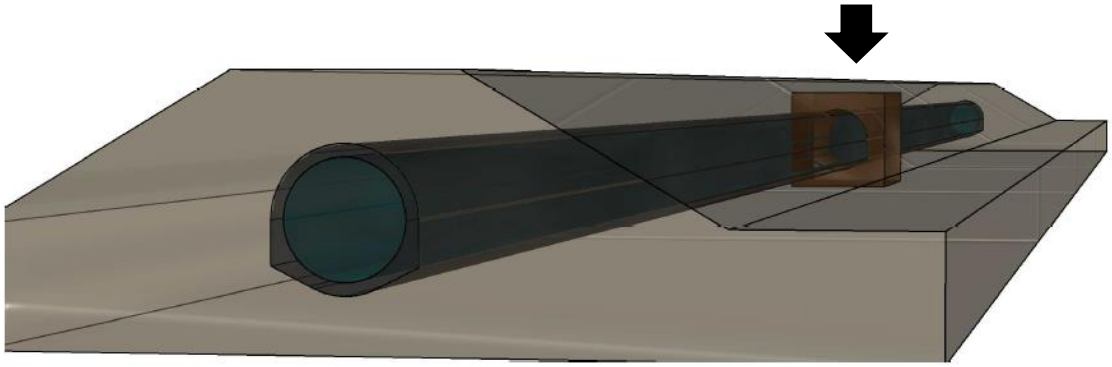


Figura 4.12 - Geometria da adutora
FONTE: A autora

Após a construção da geometria, esta foi exportada para o software COMSOL Multiphysics®, para que assim, fosse possível construir a malha de simulação.

Condições de contorno

Após importar a geometria no software COMSOL é necessário definir os materiais referentes a cada sólido. No estudo em questão foram utilizados apenas quatro materiais diferentes, sendo eles solo insaturado para a geometria do talude, solo saturado para a geometria que representa a pluma de vazamento, concreto armado no sólido da adutora, e por fim, água preenchendo o sólido da adutora.

Na aplicação da física no software é preciso que as propriedades físicas condutividade elétrica e permissividade relativa de cada material sejam definidas. Como o solo da região estudada é majoritariamente argiloso, estes parâmetros foram definidos conforme Porsani (1999) estando representados na tabela a seguir:

Tabela 4.4 - Condutividade e permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação numérica

Materiais	**Permissividade Relativa (εr)**	**Condutividade Elétrica (mS/m)**
Solo Argiloso Seco	2,4	0,27
Solo Argiloso Saturado	15	50
Concreto Armado	12,5	0
Água	81	0,5

FONTE: PORSANI, 1999. (Adaptado)

A amplitude da corrente utilizada no modelo, tanto a positiva injetada no solo quanto a negativa é de 10mA por ser um valor plausível de ser obtido em trabalhos em campos utilizando o método da eletrorresistividade.

RESULTADOS

Os resultados da simulação que considerou a tubulação sem vazamento, isto é, sem a parcela do solo úmido é apresentada na figura 4.13.

A partir desta figura é possível notar que há uma grande variação entre a resistividade obtida na camada superficial e a obtida nas camadas mais profundas (1 e 2 metros da superfície). Além disso, nota-se que os resultados das camadas mais profundas são semelhantes.

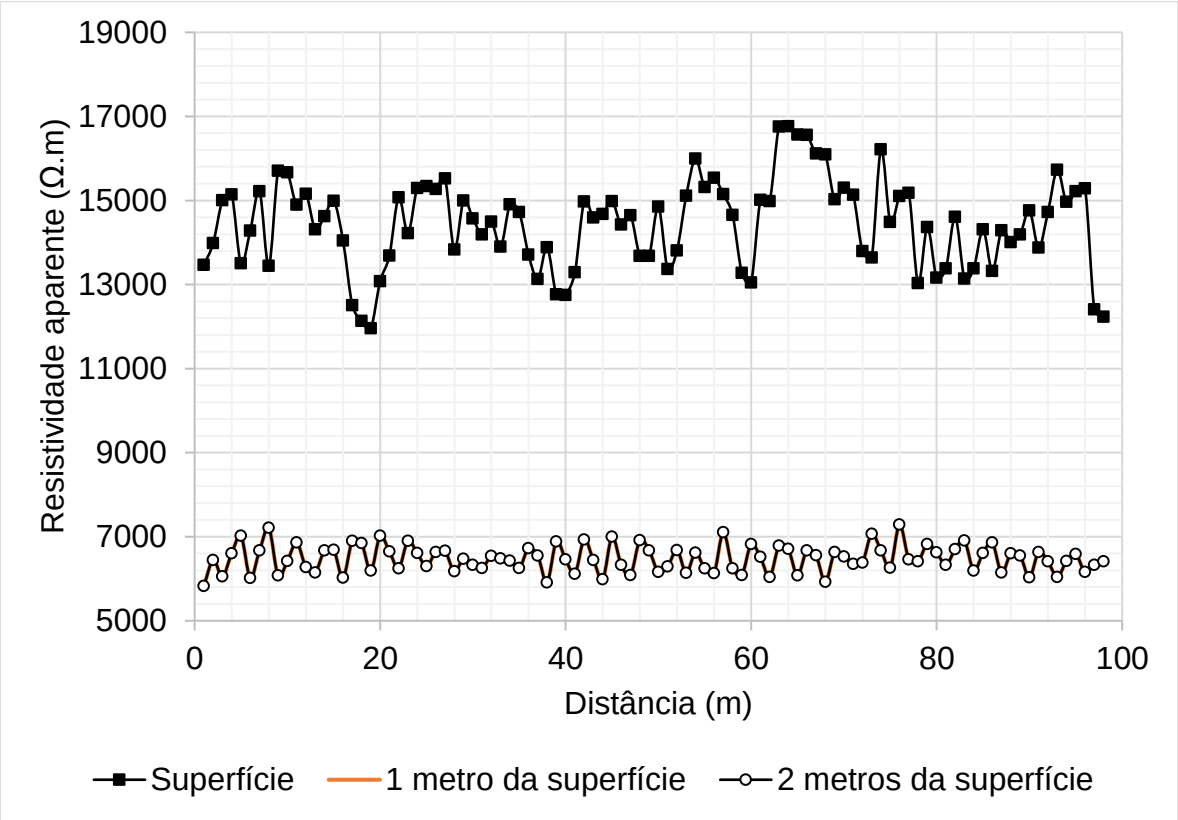


Figura 4.13 Resistividade aparente na superfície, e a 1 e 2 metros de profundidade obtida através da simulação utilizando a malha *finer*

Percebe-se também, por meio da figura, que mesmo nos resultados das camadas de 1 e 2 metros da superfície, a variação da resistividade é muita alta, indo de aproximadamente 5.800 Ω.m a aproximadamente 7.300 Ω.m. As demais malhas analisadas apresentaram o mesmo padrão de resultado.

DISCUSSÃO

Toda simulação é feita através de simplificações de um determinado problema. Na simulação realizada neste trabalho trabalhou-se com algumas simplificações, sendo as principais a diminuição da extensão da adutora, que possui 17 km de comprimento, mas a simulação considerou apenas 200 m (distância de um PV a outro), o uso de apenas quatro tipos de materiais (solo seco e úmido, água e concreto). Além disso, o solo foi considerado homogêneo e isotrópico.

Como foi possível perceber na figura 4.13, o resultado obtido com a simulação sofre oscilação no valor da resistividade. Entretanto, quando o solo é uniforme, a resistividade é constante e independente do espaçamento do eletrodo e da localização

da superfície. Apenas quando existem heterogeneidades na subsuperfície, a resistividade varia de acordo com a posição relativa dos eletrodos (BERTRAND, 1967 apud SAMOUËLIAN et al., 2005).

Dessa forma, levando em consideração que a simulação realizada, foi concebida com um solo uniforme, esta apresenta alguns pontos que precisam ser melhorados, uma vez que diferentemente da resistividade constante o resultado obtido foi variado.

Para verificar se a interferência variava com o tipo da malha e com o arranjo de eletrodos escolhidos, foram realizadas simulações variando estes parâmetros. Entretanto, o resultado obtido foi similar. Assim, faz-se necessário rever o processo de modelagem do problema proposto, verificando o índice de qualidade de elemento (malha), as condições de contorno e se ocorreu efeito de borda na simulação.

CONCLUSÕES

Buscou-se simular a influência do tamanho da pluma do vazamento e a idade do concreto da adutora na precisão da detecção deste vazamento por meio da eletrorresistividade.

Os dados obtidos mostraram que se faz necessário uma adequação do modelo construído, uma vez que os resultados da simulação não estão de acordo com a teoria do método estudado. Assim, é necessário verificar o índice de qualidade de elemento (malha), as condições de contorno e se ocorreu efeito de borda na simulação.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÃO

A precisão e eficiência do método da eletrorresistividade foi avaliada para a detecção de vazamentos de água em adutoras de concreto. Utilizou-se para tanto contraprovas por meio de inspeção *in loco* e radagramas de GPR.

O trabalho foi dividido em duas grandes partes: a primeira trata-se da aplicação em campo das técnicas geofísicas da eletrorresistividade e GPR, já a segunda trata da simulação da influência do tamanho da pluma do vazamento e da idade do concreto da adutora na precisão da detecção deste vazamento por meio da eletrorresistividade.

Na primeira parte, os resultados obtidos, juntamente com a inspeção visual devido a escavação do local, comprovaram que ambos os métodos são capazes de detectar os vazamentos, não de uma maneira exata, mas precisa o suficiente para auxiliar nos trabalhos de manutenção das empresas de saneamento que trabalham com este tipo de tubulação de distribuição de água.

Ou seja, é possível concluir que o método da eletrorresistividade é eficiente na detecção de vazamentos nas condições avaliadas, sendo elas: em adutora de concreto armado que não funciona pressurizada e que está localizada em uma área onde o solo apesar de conter uma grande presença de finos não interfere significativamente na resposta do equipamento. Entretanto, apesar de eficiente, o método é menos preciso que o GPR, mas é preciso o suficiente para auxiliar nos trabalhos de manutenção das empresas de saneamento que trabalham com este tipo de tubulação de distribuição de água.

Houve a ausência de informações coletadas no período seco, por problemas técnicos, assim, não foi possível avaliar o contraste causado efetivamente pela pluviosidade sobre os dados obtidos com as técnicas utilizadas. Entretanto, entende-se que como as respostas adquiridas em período chuvoso foram positivas, aquelas coletadas em tempo seco mostrarão com maior precisão os vazamentos da adutora.

Como limitação tem-se que trabalho foi elaborado considerando o sistema construtivo da adutora estudada, o que pode limitar sua aplicabilidade, mas não a validade dos resultados. A segunda limitação trata dos dados coletados em campo, que são passíveis de interferência (ruídos).

Na segunda parte do trabalho, os resultados não alcaçaram o objetivo proposto. Sendo assim, faz-se necessário uma adequação do modelo numérico computacional construído.

Por fim, em ambos os estudos realizados neste trabalho percebeu-se que um entendimento adequado da teoria do método, dos procedimentos de campo, da interpretação dos dados, bem como conhecimento da geologia local são fatores necessários para realizar com sucesso um levantamento geofísico, independente da técnica utilizada.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

As seguintes propostas são apresentadas como continuidade deste trabalho:

- Analisar a diferença de resposta de tubulações de diferentes materiais, como por exemplo, ferro fundido e PVC;
- Adequação do modelo numérico computacional construído, considerando possíveis efeito de borda e refinamento de malha;
- Realizar coletas em diversos períodos do ano, para a comparação da qualidade de resposta dos métodos geofísicos de acordo com a variação da umidade;
- Realizar prospecção com o GPR com a utilização de duas antenas (biestática).

REFERÊNCIAS

ABEM. **Instruction Manual: Terrameter SAS 4000 / SAS 1000**Sundbyberg, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. Brasilia: ANA: Engecorps/Cobrape, 2010.

ALGEO, J.; VAN DAM, R.; SLATER, L. Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content during Irrigation in Clay Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 15, p. 9, 3 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.935: 2011. Investigações ambientais - Aplicação de métodos geofísicos**, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.097: 2012. Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.457:2016 Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.181: 2016. Solo - Análise granulométrica**, 2016b.

ATEF, A.; ZAYED, T.; HAWARI, A.; KHADER, M.; MOSELHI, O. Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks. **Automation in Construction**, v. 61, p. 162–170, 1 jan. 2016.

AUERSWALD, K.; SIMON, S.; STANJEK, H. Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. **Soil Science**, v. 166, n. 6, p. 382–390, 2001.

AYLSWORTH, R. L.; VAN DAM, R. L.; LARSON, G. J.; JESSEE, M. A. Characterizing large-scale glaciotectonic sediment deformation using electrical resistivity methods. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 13, n. 2, p. S39–S49, 1 abr. 2016.

BACH, P. M.; KODIKARA, J. K. Reliability of Infrared Thermography in Detecting Leaks in Buried Water Reticulation Pipes. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 9, p. 4210–4224, 2017.

BATISTA, V. H. F. **Geração de malhas não estruturadas tetraédricas utilizando um método de avanço de fronteira**. Rio de Janeiro: Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

BENESTY, J.; CHEN, J.; HUANG, Y.; COHEN, I. Pearson Correlation Coefficient. In: [s.l.] Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 1–4.

BINLEY, A.; DAILY, W.; RAMIREZ, A. Detecting leaks from environmental barriers using electrical current imaging. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 2, n. 1, p. 11–19, 1997.

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. São Paulo: Tese de doutorado, 2007.

BRAGA, A. C. DE O. **Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRASIL. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2016**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério dass Cidades, 2018.

CATALDO, A.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; HUEBNER, C.; TREBBELS, D. Performance comparison of TDR-based systems for permanent and diffused detection of water content and leaks. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 1, 2017a.

CATALDO, A.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; MASCIULLO, A.; GIAQUINTO, N.; MARIA D 'AUCELLI, G.; COSTANTINO, N.; DE LEO, A.; MIRAGLIA, M. Recent advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection. **Measurement**, v. 98, p. 347–354, 2017b.

CATALDO, A.; PERSICO, R.; LEUCCI, G.; DE BENEDETTO, E.; CANNAZZA, G.; MATERA, L.; DE GIORGI, L. Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes. **NDT & E International**, v. 62, p. 14–28, mar. 2014.

COLOMBO, A. F.; LEE, P.; KARNEY, B. W. A selective literature review of transient-based leak detection methods. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 2, n. 4, p. 212–227, 1 abr. 2009.

COPASA. **Programa de redução de perdas de água no sistema de distribuição**. Belo Horizonte: Copasa, 2003.

COPASA. **Tratamento de Água**. Disponível em: <http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/agua-de-qualidade/tratamento-da-agua>.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DAHLIN, T.; ZHOU, B. A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays. **Geophysical Prospecting**, v. 52, p. 379–398, 1 set. 2004.

FALLIS, P.; HÜBSCHEN, K.; OERTLÉ, E.; ZIEGLER, D.; KLINGEL, P.; KNOBLOCH, A.; BAADER, J.; TRUJILLO, R.; LAURES, C. **Guía para la reducción de las pérdidas de agua: Un enfoque en la gestión de la presión**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2011.

FARLEY, M.; TROW, S. **Losses in Water Distribution Networks**. Fist ed. London: IWA Publishing, 2003.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (BRASIL). **Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água**. 2. ed. Brasília: Funasa, 2014.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. Porto: Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.

HAMILTON, S.; CHARALAMBOUS, B. **Leak Detection: Technology and Implementation**. London: IWA Publishing, 2013.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. DE. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting leaks in plastic pipes. **American Water Works Association. Journal**, v. 92, n. 2, p. 82–94, fev. 2000.

HUNAIDI, O.; WANG, A. A new system for locating leaks in urban water distribution pipes. **Management of Environmental Quality**, v. 17, n. 4, p. 450–466, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 7 jun. 2018.

JORDANA, J.; GASULLA, M.; PALLÀS-ARENY, R. Electrical resistance tomography to detect leaks from buried pipes. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 8, p. 1061–1068, 1 ago. 2001.

KALINSKI, R.; KELLY, W. Estimating Water Content of Soils from Electrical Resistivity BT - Estimating Water Content of Soils from Electrical Resistivity. 1993.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Third ed. [s.l.] Blackwell Science Ltd, 2002.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KHULIEF, Y. A.; KHALIFA, A.; MANSOUR, R. BEN; HABIB, M. A. Acoustic Detection of Leaks in Water Pipelines Using Measurements inside Pipe. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 3, n. 2, p. 47–54, maio 2012.

KUMMU, M.; GUILLAUME, J.; MOEL, H.; EISNER, S.; FLOERKE, M.; PORKKA, M.; SIEBERT, S.; VELDKAMP, T. I. E.; WARD, P. The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. **Scientific Reports**, v. 6, p. 15, 9 dez. 2016.

LAI, W. W. L.; CHANG, R. K. W.; SHAM, J. F. C.; PANG, K. Perturbation mapping of water leak in buried water pipes via laboratory validation experiments with high-frequency ground penetrating radar (GPR). **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 52, p. 157–167, 2016.

LOKE, M. H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies**, 2000. Disponível em: <http://www.heritagegeophysics.com/images/lokenote.pdf>

MAYS, L. W. Water Distribution. In: **Water Resources Handbook**. Tempe, Arizona: McGraw-Hill, 1996. p. 1–44.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, v. 2, n. 2, p. 6, 12 fev. 2016.

MINAS GERAIS. **Paracer Único Nº 321/2013 (SIAM: 2062754/2013)**Belo HorizonteSecretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, , 2013.

MINAS GERAIS. **IDE Sisema**. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 24 dez. 2018.

MOAVENI, S. **Finite element analysis: theory and applicationj with ANSYS**. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2014.

MUALEM, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical Prediction of Electrical Conductivity in

Saturated and Unsaturated Soil. **Water Resources Research**, v. 27, n. 10, p. 2771–2777, out. 1991.

NASCIMENTO, N.; HELLER, L.; BAPTISTA, M.; HELLER, P.; CHERNICHARO, C.; KNAUER, S.; CHAMPS, J. R. **Long-term uncertainties and potential risks to urban waters in Belo HorizonteFirst SWITCH Scientific Meeting**. Birmingham: [s.n.]. Disponível em: <http://switchurbanwater.lboro.ac.uk/outputs/pdfs/CBEL_PAP_Uncertainties_and_risks_to_urban_waters_BH.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2018.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J.; SELUCHI, M.; CUARTAS, L.; ALVES, L. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, p. 252–262, 2 fev. 2016.

OCAÑA-LEVARIO, S. J.; CARREÑO-ALVARADO, E. P.; AYALA-CABRERA, D.; IZQUIERDO, J. GPR image analysis to locate water leaks from buried pipes by applying variance filters. **Journal of Applied Geophysics**, v. 152, p. 236–247, 1 maio 2018.

POPINI, M. V. F.; PORSANI, M. J.; PORSANI, J. L. **Processamento de dados GPR utilizando métodos da sísmica de reflexão.Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica**SalvadorSBGf, , 2001.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regioes de Rio Claro e Descalvado-SP**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, 1999.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. **Urban Water Journal**, v. 7, n. 1, p. 25–45, fev. 2010.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005.

SANDBERG, C.; HOLMES, J.; MCCOY, K.; KOPPITSCH, H. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 25, n. 5, p. 906–909, 1989.

SCHWARTZ, B. F.; SCHREIBER, M. E.; YAN, T. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 3–4, p. 234–246, 5 dez. 2008.

SEVIL, J.; GUTIÉRREZ, F.; ZARROCA, M.; DESIR, G.; CARBONEL, D.; GUERRERO, J.; LINARES, R.; ROQUÉ, C.; FABREGAT, I. Sinkhole investigation in an urban area by trenching in combination with GPR, ERT and high-precision leveling. Mantled evaporite karst of Zaragoza city, NE Spain. **Engineering Geology**, v. 231, p. 9–20, 14 dez. 2017.

SILVA, F. M. DA; CHAVES, M. DOS S.; LIMA, Z. M. C. Classificação e tipos de solos do Brasil e do estado do Rio Grande do Norte. In: **Geografi a Física II**. Natal, RN: EDUFRN, 2009. p. 240.

TAGG, G. F. **Earth Resistences**. First ed. London: Pitman Pub. Corp, 1964.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (EDS.). Resistivity Methods. In: **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990a. p. 522–577.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Electromagnetic Methods. In: **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990b. p. 343–521.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulida e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

YU, L.; RIGHETTO, A. M.; MARTINS, R. P.; ROSMAN, P. C. C.; EIGER, S. **Metodos Numericos em Recursos Hidricos 4**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999.

ZHOU, Y. F.; THAM, L. G.; YAN, R. W. M.; XU, L. The mechanism of soil failures along cracks subjected to water infiltration. **Computers and Geotechnics**, v. 55, p. 330–341, 1 jan. 2014.