

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IGc USP

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA DO SUBSOLO UTILIZANDO OS MÉTODOS
GROUND PENETRATING RADAR (GPR) E ELETORRESISTIVIDADE (ER): UM
CASO DE ESTUDO GEOTÉCNICO.**

TF 23/10

Caroline Costa Nunes da Silva

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas (in memorian)

Orientador: Prof. Dr. Renato Luiz Prado

Co-orientador: Dr. Fernando Augusto Saraiva

São Paulo

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, os maiores incentivadores dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, sem os quais a realização deste trabalho e a permanência na vida acadêmica não seria possível. Agradeço por todo investimento em minha educação, ao apoio, incentivo e amor que foram essenciais na minha vida acadêmica e também durante toda a minha vida. Eu amo vocês.

Agradeço especialmente ao meu companheiro Túlio, por estar sempre segurando minha mão, me ajudando diretamente no dia a dia e também compartilhando seus conhecimentos sobre geofísica comigo colaborando para o meu aprendizado. Por me dar suporte e carinho enquanto dividimos a vida.

À toda minha família, em especial aos meus padrinhos Nilson e Evelise, que participaram de toda minha formação como ser humano, desde quando nasci até hoje. Meu muito obrigada!

Agradeço à minha Tia Vick e Tito por me acolherem nos meus primeiros anos de faculdade e por sempre apoiarem minhas decisões e torcerem por mim. Vocês foram essenciais para eu acreditar na possibilidade de seguir com meus sonhos.

À minha amiga de longa data Tamiê, por servir de inspiração, me incentivar e acreditar no meu potencial quando nem eu mesma acreditei, por me dar seu amor e amizade durante os últimos 18 anos, fazendo com que eu nunca me sentisse sozinha.

Aos meus amigos de curso: Dodô, Brasil e Loris por me fazerem companhia nos momentos de alegrias e também de sofrimento, por serem meus companheiros de campo e de curso, ajudando a superar os momentos difíceis.

À minha amiga Rhuana por estar comigo nos momentos mais complicados da graduação, por me oferecer apoio e palavras de incentivo. E minha amiga Camila por estar sempre disposta a me animar e elevar meu senso de auto-capacidade quando precisei.

À minha amiga Gabi, por ser minha fortaleza na universidade e na vida, por ouvir meus desabafos e sempre estar pronta para me responder com palavras de sabedoria e de acalento. Por me incentivar e me ajudar a acreditar na minha capacidade de seguir com o curso e de conquistar qualquer coisa que eu desejasse.

Agradeço carinhosamente ao Prof. Dr. José Gallas, por ter sido solícito quando demonstrei meu interesse em fazer a pesquisa deste trabalho na sua área, por ter participado da idealização do tema e por ter me ensinado muito sobre geofísica e eletrorresistividade, será sempre recordado com respeito e admiração.

Agradeço ao meu co-orientador Dr. Fernando Saraiva, por juntamente com o Prof. Dr. Gallas me ajudar a idealizar um projeto que tivesse de acordo com meus conhecimentos, e por estar presente durante toda a realização deste trabalho, me auxiliando em campo e nas pesquisas.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renato Prado, por ter aceitado me orientar, pelas correções e boas observações sobre minha pesquisa que me permitiram entregar um trabalho de melhor qualidade.

Ao técnico de campo Paulo Rodrigues de Lima por me auxiliar durante a aquisição de dados para este trabalho de graduação.

Agradecimentos ao CEPAS por fornecer os equipamentos geofísicos necessários para a realização desta pesquisa.

A todos os professores e funcionários do IGc-USP por participarem ativamente do desenvolvimento do meu conhecimento em geologia, por me inspirarem e por estarem dispostos a ajudar quando precisei.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os colegas que conheci durante minha trajetória na Universidade de São Paulo, e aos colegas da turma 62 por me acolherem e fazerem me sentir pertencente à turma.

RESUMO

Silva, C. C. N., 2024, Investigação Geofísica Do Subsolo Utilizando Os Métodos Ground Penetrating Radar (GPR) E Eletorresistividade (ER): Um Caso De Estudo Geotécnico [Monografia], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Neste trabalho foi realizado um estudo geofísico empregando as metodologias Ground Penetrating Radar (GPR) e Eletorresistividade (ER) para uma investigação geotécnica. A investigação se fez necessária devido a problemas relacionados com o abatimento do solo ocorrido em um dos prédios do Instituto de Geociências da USP, mais especificamente no Bloco I, onde trincas nas paredes também foram observadas. A hipótese de que os problemas estruturais observados no prédio possam ser resultado de efeitos de anormalidades do subsolo ao redor, motivou a utilização da geofísica nas áreas próximas à estrutura. Foram então definidas 3 linhas onde os métodos geofísicos foram aplicados para a investigação. O levantamento geoeletrico com o método ER foi aplicado utilizando-se da técnica de caminhamento elétrico e gerou 3 perfis de resistividade. As aquisições GPR foram executadas sobre as mesmas linhas utilizando-se 3 frequências distintas (80, 100 e 200 MHz) para maximizar a resolução na porção mais rasa e aumentar a profundidade de investigação. Os dados foram então processados buscando a melhora na qualidade com relação a ruídos e compensações de perda de energia. Após o processamento, os perfis GPR apresentaram anomalias horizontalizadas e hiperbólicas que podem ser estruturas de interesse ao projeto. Particularmente ocorreu descontinuidade em uma anomalia horizontalizada que chamou a atenção devido à sua correlação com anomalias dos perfis de resistividade. Os perfis de resistividade apresentaram anomalias de baixa resistividade que puderam ser associadas às anomalias GPR. A interpretação destes perfis geofísicos propõe uma zona de umidade gerada pelo vazamento de uma tubulação de água ou esgoto detectada no local pelo método GPR e com presença confirmada *in loco*. Esta interpretação foi ainda corroborada por modelagem numéricas de dados GPR e ER, onde a inserção de vazamentos em modelos digitais do solo local mostraram o mesmo tipo de anomalia nos dados sintéticos identificadas nos dados reais da área. Estes resultados dão fortes indícios de que os locais de umidade identificados pela geofísica possam ter continuidade para áreas ainda mais próximas do prédio, gerando uma fragilidade na estrutura do solo e, conseqüentemente, na estrutura do prédio afetado.

Palavras Chave: GPR, Eletorresistividade, Geotecnia, Geofísica.

ABSTRACT

Silva, C. C. N., 2024, Geophysical Investigation Integrating Ground Penetrating Radar and Resistivity Methods: Geotechnical Case Study [Monography], São Paulo, Institute of Geoscience, University of São Paulo.

This study conducted a geophysical investigation using Ground Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity (ER) methodologies to address geotechnical issues at the institute of geosciences, university of São Paulo, specifically in block I. The investigation was initiated due to soil subsidence issues and visible cracks in the concrete walls of the building. The hypothesis that these structural problems might be due to subsoil anomalies surrounding the structure led to the application of geophysical methods in the nearby areas. Three survey lines were established for this investigation. the ER survey was conducted using the ER tomography technique, resulting in three ER profiles. GPR data was acquired over the same lines using three different frequencies (80, 100, and 200 MHz) to enhance resolution in the shallower sections and increase investigation depth. The data underwent processing to improve quality by reducing noise and compensating for energy loss. the processed GPR profiles revealed both horizontal and hyperbolic anomalies of potential interest to the project. The integration of GPR and ER data showed that a discontinuity in a GPR horizontal anomaly was correlated with low resistivity anomalies in ER profiles. The interpretation of the geophysical profiles pointed to a potential moisture zone, theorized to stem from a water pipe leakage. While the in-situ verification confirmed the presence of the pipeline, the leakage was inferred from the geophysical data and subsequently supported by numerical modeling of GPR and ER data. The introduction of leak scenarios in digital soil models resulted in anomalies consistent with those observed in the actual field data. These insights strongly suggest that the moisture zones identified through geophysical methods might extend closer to the building, potentially affecting the soil's stability and, consequently, the structural integrity of the affected building.

Key words: Gephysics, Geotechnics, GPR, Resistivity

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. METAS E OBJETIVOS	7
3. TRABALHOS PRÉVIOS	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	10
5. RESULTADOS	33
5.1. Resultados das Modelagens Numéricas	33
5.2. Resultados GPR	35
5.3. Resultados ER	38
6. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES	39
6.1. Interpretações dos Dados Sintéticos	39
6.3. Interpretações dos Dados GPR	42
6.3. Interpretações integradas dos Dados ER e GPR	43
7. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos são utilizados para uma ampla gama de investigações indiretas, desde estudos do interior profundo da Terra, até em estudos rasos da subsuperfície.

Devido ao crescimento das grandes cidades e centros urbanos, os métodos elétricos e eletromagnéticos, especialmente, estão ganhando destaque devido à agilidade na aquisição de dados e à boa resolução dos resultados. Atualmente, estes métodos vêm sendo empregados em áreas de estudos relativamente rasos, como planejamento urbano, arqueologia, geotecnia, geologia de engenharia e estudos forenses e ambientais.

O GPR (Ground Penetrating Radar) é um método eletromagnético que se baseia na propagação de ondas de rádio (de alta frequência) e, portanto, apresenta uma alta resolução se comparado aos demais métodos geofísicos. A grande variação nas propriedades elétricas dos materiais comuns, fazem com que o GPR tenha uma ampla gama de aplicações, desde estudos de dezenas de metros de profundidade até estudos onde os alvos de interesse estão a centímetros de profundidade a depender da frequência das antenas empregadas.

O método ER (Eletrorresistividade) se baseia na medição de potencial elétrico gerado por correntes controladas no subsolo e, portanto, faz parte da classe dos métodos elétricos. Devido a sua capacidade de gerar modelos de distribuição de resistividade elétrica e explorando também a ampla variação dos valores desta propriedade nos materiais, este método é de significativa importância em investigações de subsuperfície.

Ambos os métodos mencionados são aplicados em mapeamentos onde a interpretação dos dados é uma etapa essencial para a geração de um resultado com alta confiabilidade. Na última década, processos de interpretação mais avançados estão sendo propostos. Uma vertente destes avanços é o uso de modelos digitais para entender os cenários reais a partir da modelagem realísticas de dados, onde através de dados sintéticos, as características dos dados reais possam ser analisadas e uma interpretação mais assertiva possa ser proposta.

Tanto a modelagem de dados GPR quanto a de dados ER podem ser realizadas utilizando-se softwares livres bem estabelecidos no mercado e no meio acadêmico, onde sua utilização adequada pode agregar informações importantes à análise de dados de projetos de engenharia e geotecnia.

Neste Trabalho de Formatura foi realizado o estudo geofísico pra investigar as causas de patologias na estrutura do prédio do Bloco I do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Para isso foram aplicados os métodos GPR e ER nas redondezas da estrutura,

gerando uma base de dados integrada para avaliar as possíveis causas dos problemas detectados nas estruturas. Como metodologia de interpretação foram utilizadas as análises integradas dos dados do local e modelagens numéricas para validar as hipóteses sobre os dados reais.

No contexto de aplicações geotécnicas, este trabalho fornece um estudo de caso importante para a verificação prática do impacto e importância da integração de diferentes métodos geofísicos, onde as ambiguidades podem ser atenuadas, uma vez que diferentes bases de dados restringem as possíveis interpretações das anomalias geofísicas. Além disso, as modelagens numéricas apresentadas neste trabalho geraram interessantes resultados que permitiram entender o impacto das variações pedológicas nos dados geofísicos.

2. METAS E OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo a utilização de métodos geofísicos para um estudo de caso geotécnico, onde o foco principal é a caracterização do subsolo feita a partir da integração dos métodos GPR e ER, a fim de detectar possíveis causas para um abatimento da superfície do terreno e, conseqüentemente patologias na estrutura do prédio afetado.

Posteriormente a uma tentativa de correção do problema ocorrida há mais de uma década, foram identificados em 2018 novamente os sintomas de desestabilização de paredes e piso em um bloco do Instituto de Geociências – USP. A partir de aumento desses problemas e solicitação da Diretoria do Instituto foram feitos no ano de 2022, estudos com o método de Eletorresistividade utilizando a técnica de caminhamento elétrico a fim de identificar a origem do problema, estudo este feito por equipe liderada pelo Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas e Dr. Fernando Augusto Saraiva.

Desta forma, juntamente com estes dados pré-existentes de estudo realizado por Gallas e Saraiva, foram realizadas na área (Figura 2) aquisições de dados com a utilização do método GPR (Ground Penetrating Radar) buscando agregar essas novas informações, integrando os resultados obtidos pelos dois métodos para que as causas dos colapsos do solo fossem identificadas, localizadas e a remediação seja possível.

A escolha da utilização destes métodos se baseia no fato de serem métodos indiretos não-destrutivos, de fácil e rápida aquisição, e que integrados podem trazer valiosas informações sobre o subsolo, a fim de identificar e possivelmente solucionar esse problema real que afeta a segurança deste prédio da Universidade.

Como resultado, a aplicação dos métodos GPR e ER puderam identificar anomalias de interesse ao projeto e que, após uma análise integrada, puderam ser associadas a alta umidade provinda de um possível vazamento de tubulações de água no local.

3. TRABALHOS PRÉVIOS

Ao longo da realização deste Trabalho Final de graduação, foram feitas pesquisas bibliográficas buscando os principais trabalhos publicados que tenham relação com o presente projeto e que puderam servir de bases para o mesmo. Portanto, foram consideradas publicações que descrevam os fundamentos teóricos dos métodos geofísicos utilizados (Telford, 1990; Daniels, 2004; Borges, 2007; Gandolfo, 2007) e que mostrassem aplicações da geofísica rasa, particularmente utilizando os métodos GPR e ER, em estudos de engenharia (Alves, 2011), meio ambiente (Porsani, 2002; Bicudo, 2021; Saraiva 2010) e geotecnia (Gallas, 2001; Souza, 2005; Lago, 2019). Além disso, softwares e metodologias utilizando modelos numéricos para interpretação dos dados também foram verificadas (Geotomo, 2002; Giannakis, 2015; Warren *et al*, 2016; Giannakis *et al*, 2021).

Telford (1990) apresenta os princípios básicos da utilização dos métodos da geofísica aplicada, abordando os princípios da teoria física em que se baseiam, processos sobre aquisição e interpretação de dados utilizando exemplos teóricos e reais.

Daniels (2004) descreve em detalhes os fundamentos teóricos e aplicações em diversas áreas do método GPR. Ainda é destacado como a utilização comercial do GPR tem sido bem sucedida nas áreas de engenharia.

Borges (2007) utilizou métodos geofísicos para a caracterização de objetos enterrados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do IAG – USP, integrando os dados de GPR com dados de Eletorresistividade e eletromagnético indutivo (EM-38). Os resultados obtidos neste trabalho revelaram informações sobre os tipos e profundidades dos alvos enterrados e permitiram também a caracterização das camadas de aterro e sedimentos, salientando o potencial dos métodos utilizados em aplicações para geotecnia, planejamento urbano, arqueologia e meio ambiente.

Gandolfo (2007) aborda as metodologias de aquisição, processamento e interpretação de dados de caminhamentos elétricos para investigação de alvos rasos em três diferentes áreas com o objetivo de mapear o nível d'água, o topo rochoso e uma provável pluma de

contaminação, comparando as técnicas de aquisição de acordo com melhor eficácia quanto a profundidade investigada e a resolução.

Alves (2011) analisou a utilização do GPR e do método da Eletrorresistividade para a detecção de tubulações metálicas enterradas, concluindo que em solos onde a saturação de água é maior o GPR perde sua eficácia devido à atenuação do sinal eletromagnético, porém o método foi bem sucedido para a localização dos dutos. Ressalta a necessidade da elaboração de novas pesquisas que possam relacionar as anomalias de resistividade com a presença de tubulações metálicas.

Porsani et al. (2002) caracterizaram uma zona de contaminação no aterro controlado de Rio Claro, interpretando uma zona de atenuação do sinal no radargrama emitido pelo GPR como sendo a pluma de contaminação.

Saraiva (2010) comparou os métodos ER, GPR e EM na detecção de alterações do solo devido a escavações e no mapeamento de pluma de contaminação, indicando que dentre os métodos o ER foi o mais eficaz.

Bicudo (2021) integrou dados de ER e dados GPR para a caracterização de plumas de contaminação por hidrocarboneto, obtendo um bom resultado para a detecção e delimitação do contaminante, além de determinar o volume de solo contaminado e os níveis da estratigrafia rasa da área que foi estudada.

Gallas et al (2001) apresentaram um trabalho que através do uso de métodos geoeletricos visou a caracterização de uma área afetada pelo colapso do teto de um túnel em construção sob o Parque do Ibirapuera, onde os resultados obtidos permitiram que a área a ser remediada fosse delimitada satisfatoriamente.

Souza (2005) utiliza o GPR para a caracterização estratigráfica do solo, localização de estruturas enterradas, anomalias decorrentes de contaminação e a profundidade do nível d'água. Os resultados obtidos salientam que a eficácia do GPR se destaca quando as propriedades eletromagnéticas do meio e dos materiais investigados apresentam um grande contraste.

Lago et al. (2019) utilizaram o método GPR para mapear áreas de subsidência na cidade de Teresina no Piauí. A frequência da antena utilizada para tal estudo foi de 200 MHz, calibrada em solos da região para assim obter um dado mais adequado para a interpretação. O

objetivo principal do trabalho foi alcançado, identificando as áreas que sofreram subsidência, bem como o aterro feito a fim de remediar temporariamente o afundamento do solo.

Porsani & Malagutti Filho (1999) empregaram o método GPR para caracterizar a estratigrafia dos materiais geológicos e identificar o nível freático na área da Mineração Jundú em Descalvado, interior de São Paulo.

Alves (2011) realizou o estudo da estratigrafia do subsolo de uma região vizinha à cidade do Rio de Janeiro, onde o objetivo principal foi utilizar o GPR para contribuir com esse tipo de pesquisa, identificando as diferentes camadas sedimentares e nível freático.

Giannakis (2021) propôs um esquema de aprendizagem de máquina para estimativas de formas de alvos utilizando dados GPR. Os modelos de aprendizagem utilizaram como conjunto de treinamento apenas dados sintéticos gerados com modelagem numérica, fazendo com que um conjunto massivo de cenários pudessem ser incorporados aos modelos. Ao se aplicar os modelos em dados reais os resultados foram de alto índice de acerto, mostrando que a modelagem numérica proposta é altamente realista.

O relatório de levantamento geofísico realizado por Gallas e Saraiva (2022) teve como objetivo detectar os locais que sofreram influência dos colapsos de afundamento que ocorreram nos laboratórios do Bloco I do Instituto de Geociências da USP, e através de métodos geoeletricos, utilizando a técnica do caminhamento elétrico, identificou zonas de baixa resistividade na área que virá a ser estudada neste projeto. Estes dados foram utilizados na elaboração deste Trabalho de Formatura. A interpretação dos valores de resistividade para a área foi associada com a presença de água, que promove o aumento do conteúdo iônico do solo resultando em um adensamento da corrente elétrica que diminuirá a resistividade do subsolo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Método GPR

O GPR (Ground Penetrating Radar) é um método geofísico que utiliza ondas eletromagnéticas (EM) em altas frequências, entre 10 e 2600 MHz, para obter imagens em alta resolução da subsuperfície rasa. Este método pode ser aplicado tanto para estudos relacionados à geologia rasa, como por exemplo o estudo de aquíferos e solos, quanto para

estudos relacionados ao planejamento urbano, como por exemplo a detecção de tubulações de água e esgoto.

As ondas EM são transmitidas ao solo e são refletidas quando se deparam com contrastes de propriedades eletromagnéticas. As ondas EM refletidas em subsuperfície são registradas por uma antena receptora e por fim exibidos em um computador portátil. A exibição do sinal que chega ao receptor é feita através de um perfil chamado radargrama que apresenta a amplitude do sinal EM em função do tempo.

Por ser um método eletromagnético, a condutividade elétrica (σ), a permissividade dielétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ) são as propriedades que comandam o comportamento dos sinais GPR. A permissividade dielétrica de um meio é usualmente escrita pela constante dielétrica K (grandeza adimensional), sendo

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

onde ϵ_0 é a permissividade dielétrica do vácuo.

A velocidade de propagação v do sinal GPR é dada pela seguinte expressão

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo.

O funcionamento básico do método GPR é o seguinte – um pulso eletromagnético é emitido ao solo por uma antena transmissora (Tx) e se propaga de acordo com a equação de onda. A onda eletromagnética se propaga até se deparar com uma diferença de permissividade dielétrica ϵ , e quando isso ocorre, parte da energia do sinal é refletida de volta à superfície e é então registrada pela antena receptora (Rx). A Figura 1 ilustra este princípio com o exemplo de uma aquisição GPR.

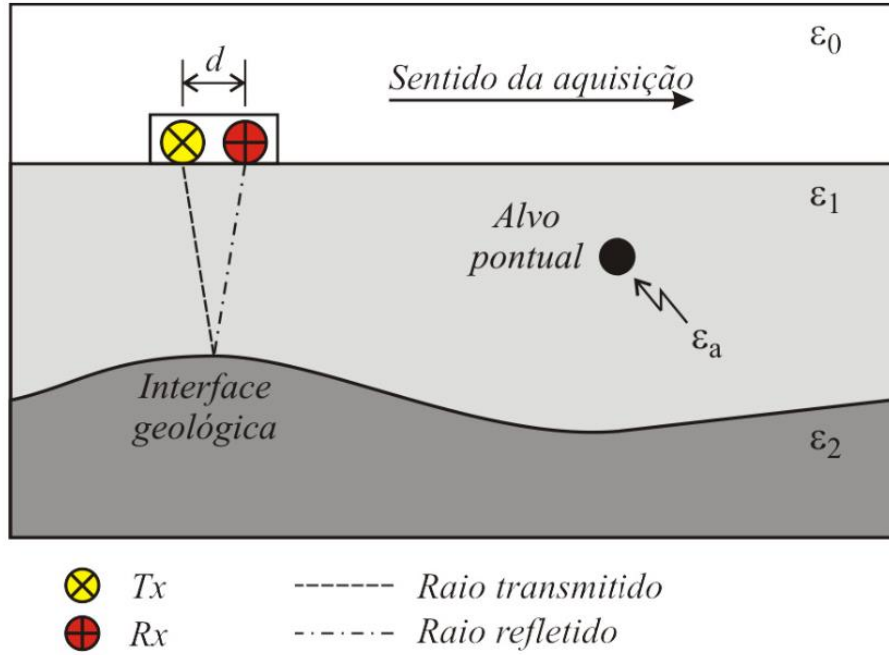


Figura 1: Exemplo de uma aquisição GPR de perfil de reflexão com afastamento constante (Almeida, 2016).

Devido às altas frequências de operação do método, a propriedade física preponderante no fenômeno de propagação dos sinais GPR é a permissividade dielétrica dos materiais. Isso se deve ao fato da permeabilidade magnética μ não variar muito para os materiais comuns podendo ser considerada como a permeabilidade magnética do vácuo μ_0 ($\mu \approx \mu_0$). Já a atenuação do sinal GPR é fortemente relacionada à condutividade elétrica do meio em que se propaga, sendo que quanto maior a condutividade elétrica, maior atenuação o sinal sofrerá. A reflexão do sinal, por sua vez, é controlada tanto pela condutividade elétrica quanto pela permissividade dielétrica.

Para um meio isolante, a porcentagem de energia refletida em uma interface entre diferentes constantes dielétricas K_1 e K_2 é dada pelo coeficiente de reflexão R , sendo

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}}$$

A Tabela 1 apresenta valores de constante dielétrica e condutividade elétrica para alguns materiais.

Materiais Secos	K	σ_0 (mS/m)	Materiais Saturados	K	σ_0 (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia e cascalho	3 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito	5	1	Areia	10 – 30	0,1 – 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 – 10
Solo arenoso	4 – 6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	4 – 6	0,27	Solo arenoso	15 – 30	6,9
Sal	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso	10 – 15	50
Granito	4 – 6	0,01	Arenito	20 – 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário	8	2
Aço	1	10^9	Granito	7	1
PVC	3 – 4	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 – 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	6 – 8	0	Concreto	10 – 30	0

Tabela 1: Valores de constante dielétrica K e condutividade elétrica σ_0 para alguns materiais (Bicudo, 2021).

A penetração do sinal GPR é controlada tanto pelas propriedades eletromagnéticas dos terrenos (condutividade e permissividade dielétrica) quanto pela frequência da antena. Locais onde ocorrem materiais de baixa condutividade, o sinal de radar pode atingir profundidades superiores a 30 metros. Por outro lado, argilas com alta condutividade ou a presença de água com sais dissolvidos no meio geológico podem reduzir consideravelmente

a penetração do sinal. Frequências maiores (800 a 2600 MHz) permitem uma maior resolução (maior detalhamento), porém não permitem grande penetração. Em contrapartida, frequências menores (10 a 400 MHz) permitem uma maior penetração com menor resolução.

O sistema GPR é constituído basicamente por 3 blocos principais:

- 1) Uma unidade de controle central, acoplada a um computador portátil responsável pela visualização e armazenamento dos dados em tempo real;
- 2) Um módulo geralmente blindado que acomoda as antenas transmissora e a receptora;
- 3) Um hodômetro e/ou um GPS que é responsável por obter a informação da posição do equipamento durante a aquisição.

A Figura 2 mostra o exemplo de equipamento GPR da empresa GSSI que consiste em uma antena blindada que opera na frequência de 270MHz, um computador GSSI SIR 3000 e um hodômetro.

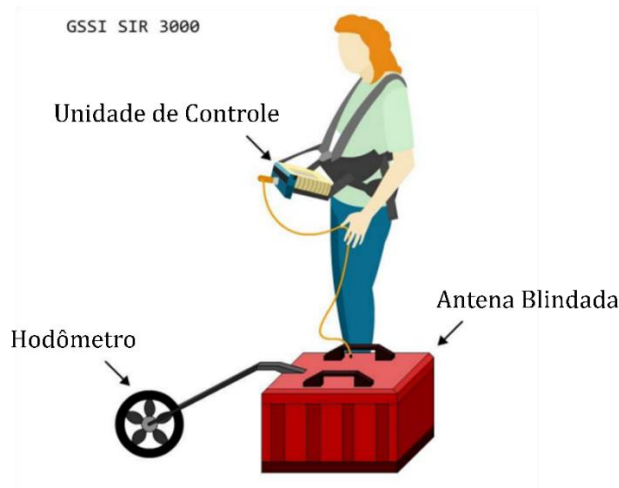


Figura 2: Equipamento GPR GSSI SIR 3000 com antena de 270MHz e hodômetro acoplado.

Existem várias formas de aquisição com o método GPR, sendo a mais utilizada para aplicações comerciais a técnica chamada de “perfil de reflexão com afastamento constante” (common offset), onde o transmissor Tx e o receptor Rx são movimentados juntos durante a aquisição, mantendo-se a distância entre eles constante.

Uma aquisição GPR com a técnica de perfil de reflexão com afastamento constante é efetuada da seguinte forma: uma antena transmissora (Tx) e uma antena receptora (Rx) são rebocadas sobre a superfície com um afastamento constante entre elas (Figura 3a). Um pulso é enviado por Tx e registrado por Rx em um intervalo pré-estabelecido de tempo ou distância. Cada pulso registrado por Rx é chamado de “Traço” ou “A-scan” e é composto por uma discretização no tempo da amplitude do campo eletromagnético. Cada A-scan obtido durante a aquisição é posicionado lado a lado formando um perfil chamado “radargrama” ou “B-scan” (Figura 3b). Nota-se pela Figura 3 que a presença de um alvo é detectada pela presença de uma anomalia hiperbólica no perfil GPR.

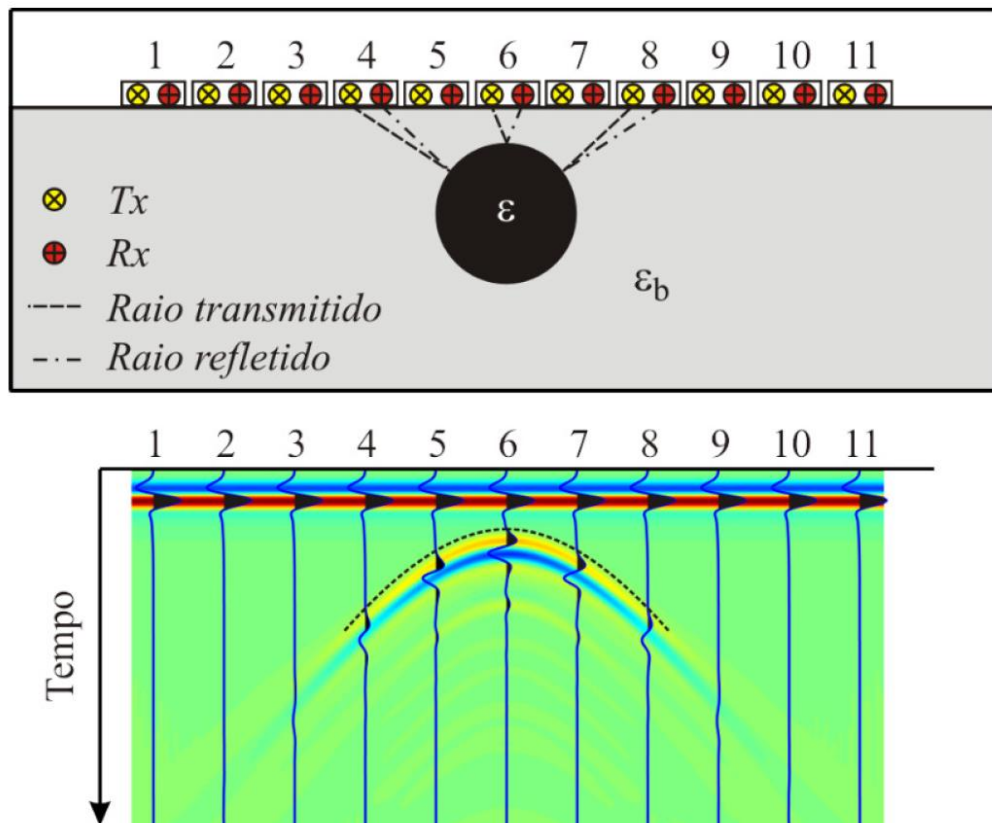


Figura 3: Exemplo de uma aquisição GPR de perfil de reflexão com afastamento constante. a) Croqui do processo de aquisição sobre um alvo arbitrário. b) Perfil GPR ou Radargrama obtido pela aquisição. (Almeida, 2016).

Os perfis adquiridos em campo (radargramas) são submetidos à um processamento que consiste em filtros e correções que são necessários para se fazer a interpretação dos dados. O processamento de dados do GPR obedece a alguns operadores semelhantes aos das técnicas de tratamento de dados sísmicos, uma vez que, de forma simplificada, pode-se dizer que a onda eletromagnética se comporta de forma similar à propagação de uma onda elástica. A seguir são apresentadas as etapas de processamento mais comuns às quais são submetidos os dados brutos:

- Filtro Dewow: Os dados de campo podem estar influenciados com uma frequência extremamente baixa causada pela presença de campos externos. Para eliminar esta componente dos dados é preciso utilizar o filtro dewow. Segundo Almeida (2016), um efeito secundário desta ferramenta é que, minimizando essas componentes de baixa frequência, pode-se compensar o efeito da filtragem passa-baixa causado pela geologia da área.

- Correção do Tempo Zero (Move Start Time): É necessário ajustar o início do registro das amplitudes do sinal para que ele corresponda ao tempo zero do início da aquisição. O registro pela antena receptora é iniciado antes da emissão do sinal, isso garante que todas as amostras sejam registradas. Esse atraso da transmissão com relação ao registro deve ser removido para que não se cometa erros nas distribuições de profundidade no perfil.

- Ganho: A aplicação de um ganho nos traços GPR tem como objetivo o aumento da amplitude do sinal para compensar a atenuação sofrida durante a propagação em um meio com condutividade maior que zero.

- Filtro de Frequência: Esta ferramenta é aplicada com o objetivo de se remover as componentes de frequências indesejadas que podem estar contaminando o sinal GPR. Para se eliminar frequências altas, deve ser utilizado o filtro de frequência passa-baixa que permite que só as frequências abaixo de uma frequência de corte pré-estabelecida permaneçam nos dados. Para se eliminar frequências baixas, deve ser utilizado o filtro de frequência passa-alta que permite que só as frequências acima de uma frequência de corte pré-estabelecida permaneçam nos dados. Para eliminar frequências altas e baixas deve ser utilizado o filtro de frequência passa-banda que permite que só frequências entre duas frequências de corte permaneçam nos dados.

- Remoção de Background (Background Removal): Esta ferramenta tem como objetivo eliminar efeitos de reverberação causados pelo acoplamento da antena com o solo.

- Conversão Tempo-Profundidade: As feições observadas no radargrama podem ser atribuídas a artefatos ou interfaces presentes em subsuperfície após se realizar a conversão da escala de tempo observada nos dados para a escala de profundidade. Esta conversão é feita simplesmente atribuindo uma velocidade constante a todo o radargrama e calculando-se as profundidades das feições através do tempo de reflexão do sinal. Existem diferentes maneiras de se estimar a velocidade das ondas eletromagnéticas no meio (Daniels, 2004): 1) Através do levantamento CMP (common midpoint) que consiste em uma técnica de aquisição de dados, também chamada de sondagem de velocidade; 2) Através do ajuste de hipérboles onde um valor de velocidade é fornecido ao software e uma hipérbole teórica é gerada; 3) Através da profundidade de um objeto conhecido; 4) Através do processo de migração que consiste em um tratamento matemático.

4.2 Método ER

A técnica de Eletorresistividade (ER) é empregada para detectar variações na resistividade elétrica do solo e das formações rochosas abaixo da superfície, identificando descontinuidades tanto horizontais quanto verticais. Esse processo envolve a injeção de correntes elétricas no subsolo e a mensuração dos potenciais elétricos na superfície. Para isso, utiliza-se pares de eletrodos inseridos no solo: um par para aplicar a corrente elétrica e outro para medir a diferença de potencial, ambos na área de estudo.

Historicamente, o uso do método ER remonta ao século XX, inicialmente voltado para a exploração mineral. Na década de 1990, houve uma evolução significativa com a introdução de sistemas automatizados de coleta de dados e o desenvolvimento de equipamentos mais avançados, incorporando computadores com capacidades de cálculo superiores e técnicas inovadoras de interpretação de dados. Hoje, a Eletorresistividade é amplamente utilizada em diversos campos, como geologia, urbanismo, meio ambiente e hidrologia.

A resistividade elétrica, por sua natureza, é uma característica física que mede o grau de resistência de um material à passagem de corrente elétrica. Pode ser definida como a resistência em Ohms entre as faces opostas de um cilindro de um material em particular (Figura 4). Sendo R a resistência do material (Ohm), S a área da secção transversal (m^2) e L o comprimento (m), a resistividade ρ é dada por:

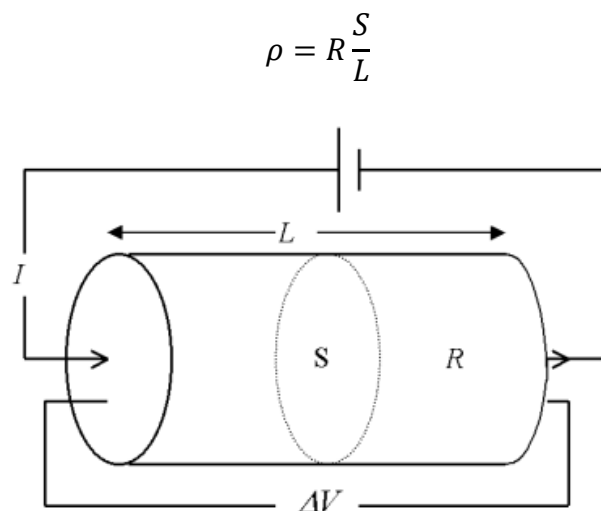


Figura 4: Cilindro de um material em particular de resistência elétrica R e secção transversal S . (Bicudo, 2021).

Aplicando-se uma diferença de potencial elétrico ΔV nas extremidades, gera-se uma corrente elétrica I através do material. Considerando a Lei de Ohm da forma $R = \frac{\Delta V}{I}$, temos que

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{S}{L}$$

Considerando algumas premissas quanto a forma de propagação da corrente elétrica em subsuperfície e também a distribuição de eletrodos em uma geometria em específico, podemos definir a resistividade aparente medida como sendo

$$\rho_{aparente} = K \frac{\Delta V}{I}$$

Onde $\rho_{aparente}$ é a resistividade aparente, ΔV a diferença de potencial medida de entre os eletrodos de potencial, I é a corrente injetada pelos eletrodos de corrente e K é o fator geométrico. O termo "resistividade aparente" refere-se a uma estimativa da resistividade do volume de rocha compreendido entre os eletrodos, ao invés da distribuição real de resistividade no subsolo. O equipamento utilizado para aquisições com o método ER é composto por:

(1) Resistivímetro: Este instrumento é essencial para a injeção controlada de corrente elétrica e a medição do potencial elétrico gerado.

(2) Eletrodos: São hastes metálicas que fazem o contato com o solo, permitindo a injeção da corrente elétrica e a medição do potencial. Existem dois tipos de eletrodos: os eletrodos de corrente, conhecidos como "eletrodos AB", e os eletrodos de potencial, referidos como "eletrodos MN".

(3) Cabos de Conexão: Utilizados para transmitir sinais entre o resistivímetro e os eletrodos.

(4) Bateria: Fornece a energia necessária para a operação do resistivímetro e para a injeção de corrente.

A disposição dos eletrodos no solo segue uma geometria específica, conhecida como "arranjo". Este arranjo é crucial, pois influencia diretamente a eficácia do método ER. A Figura 5 ilustra os arranjos mais comuns usados em projetos comerciais.

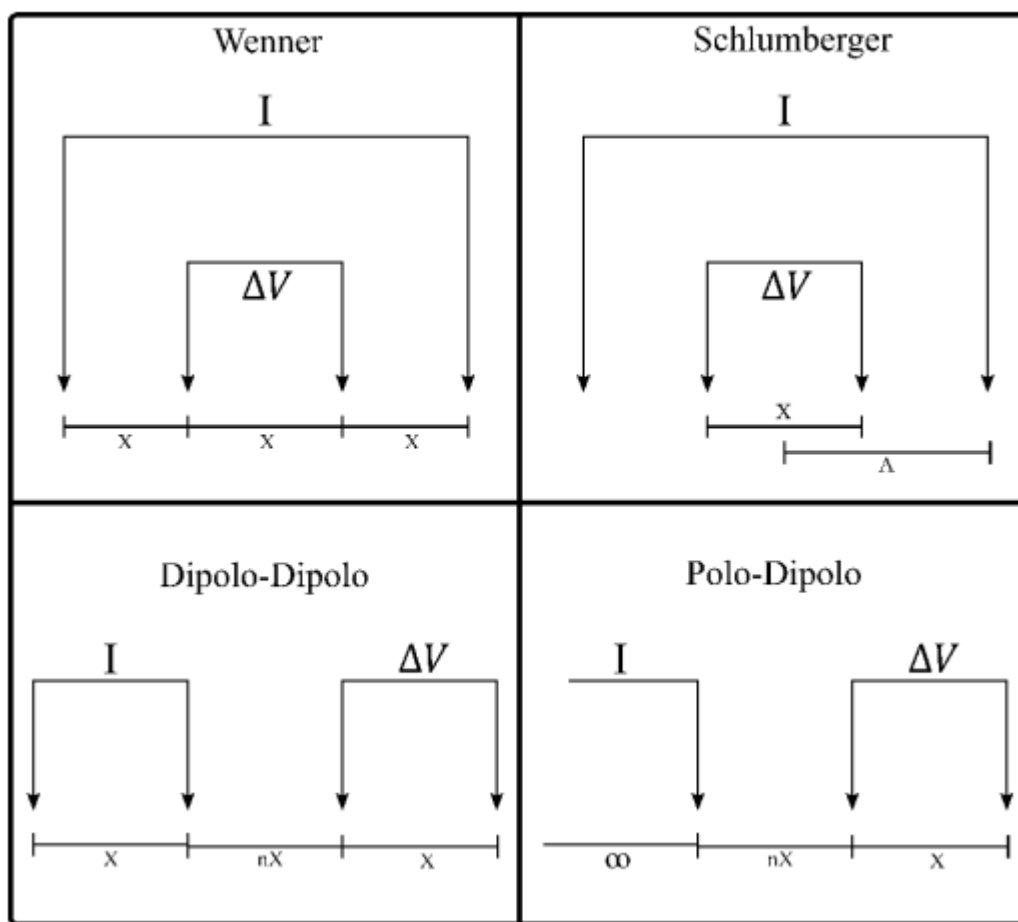


Figura 5: Principais arranjos de eletrodos utilizados em projetos comerciais. (Bicudo, 2021).

Na metodologia de Eletrorresistividade, diversas configurações de eletrodos são utilizadas, incluindo os arranjos Wenner e Schlumberger, nomeados em homenagem a seus criadores. Nestes arranjos, a localização para medição da resistividade aparente é definida como o ponto médio entre os eletrodos de potencial. A profundidade dessa medição é determinada pela distância entre os eletrodos de corrente.

Existem duas técnicas principais de aquisição: (1) a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), que permite sondar a resistividade aparente verticalmente, e (2) o Caminhamento Elétrico (CE), que realiza medições da resistividade aparente horizontalmente.

Depois da coleta de dados em campo, estes são levados para análise laboratorial. Um processamento inicial é feito para avaliar e, se necessário, remover dados anômalos. Os valores de resistividade obtidos a partir das medições de potencial e corrente, considerando a geometria dos eletrodos, são denominados resistividade aparente. Para determinar a

verdadeira distribuição de resistividade no subsolo, é necessário submeter esses valores a um processo de inversão.

Esse processo de inversão pode ser visualizado de forma simplificada através de modelagem computacional, como demonstrado na Figura 6. Primeiro, constrói-se um modelo digital do terreno com uma distribuição de resistividade conhecida (Figura 6a). Em seguida, simula-se uma aquisição de dados ER sobre esse modelo, para obter a distribuição de resistividade aparente que seria encontrada em campo (Figura 6b). Por fim, os dados de resistividade aparente são submetidos ao processo de inversão, para recuperar a distribuição real de resistividade (Figura 6c). Assim, fica evidente que os valores de resistividade aparente não mostram exatamente a distribuição de resistividade do modelo, mas após a inversão, é possível obter uma distribuição que corresponde de maneira mais precisa ao modelo inicial.

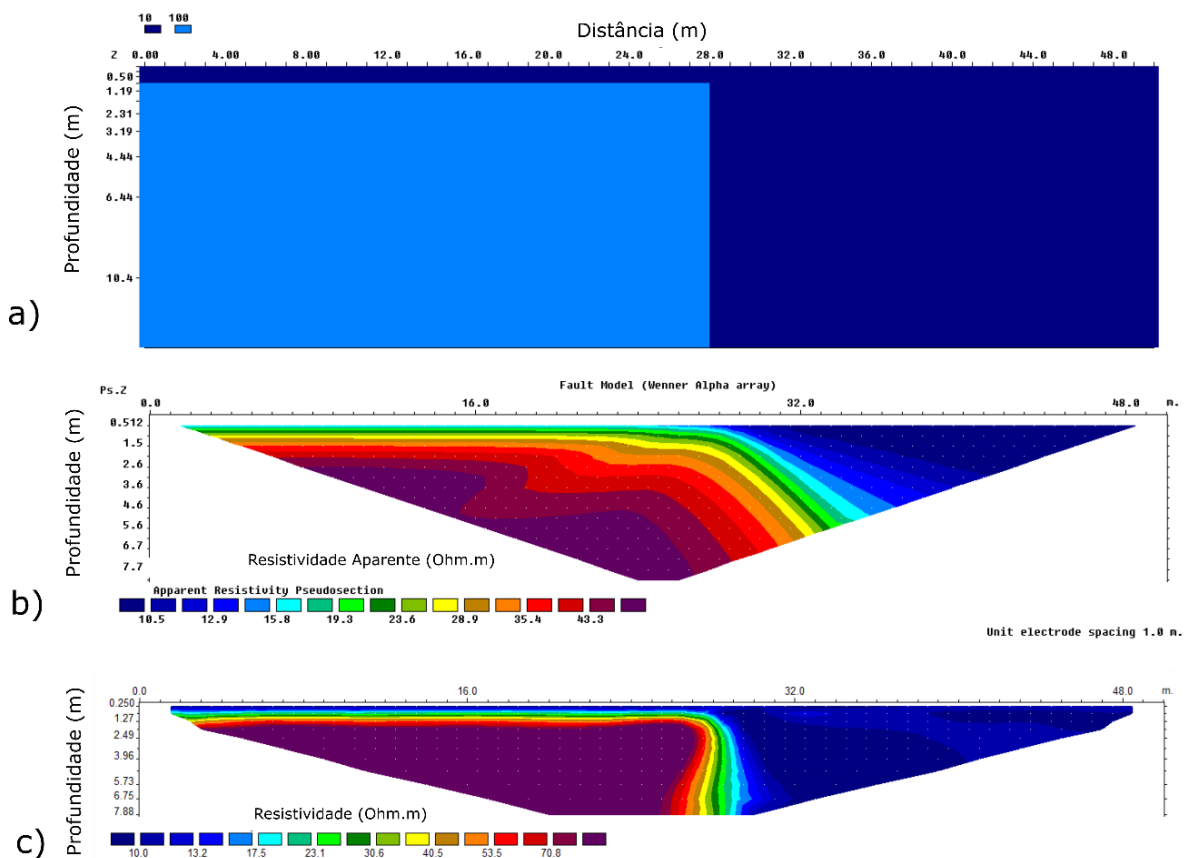


Figura 6: Representação do processo de modelagem e inversão ER. a) Modelo de resistividade. b) Distribuição de resistividade aparente calculada sobre o modelo. c) Distribuição de resistividade após a inversão dos dados modelados.

4.3 Área de Estudo

A área de estudo deste projeto está localizada no Bloco I do Instituto de Geociências da USP e seus arredores (Figura 7), onde as aquisições de dados foram realizadas no bloco I e no terreno à jusante do mesmo (Figura 8).



Figura 7: Mapa de Localização IGc – USP (em azul) e Bloco I (em vermelho).

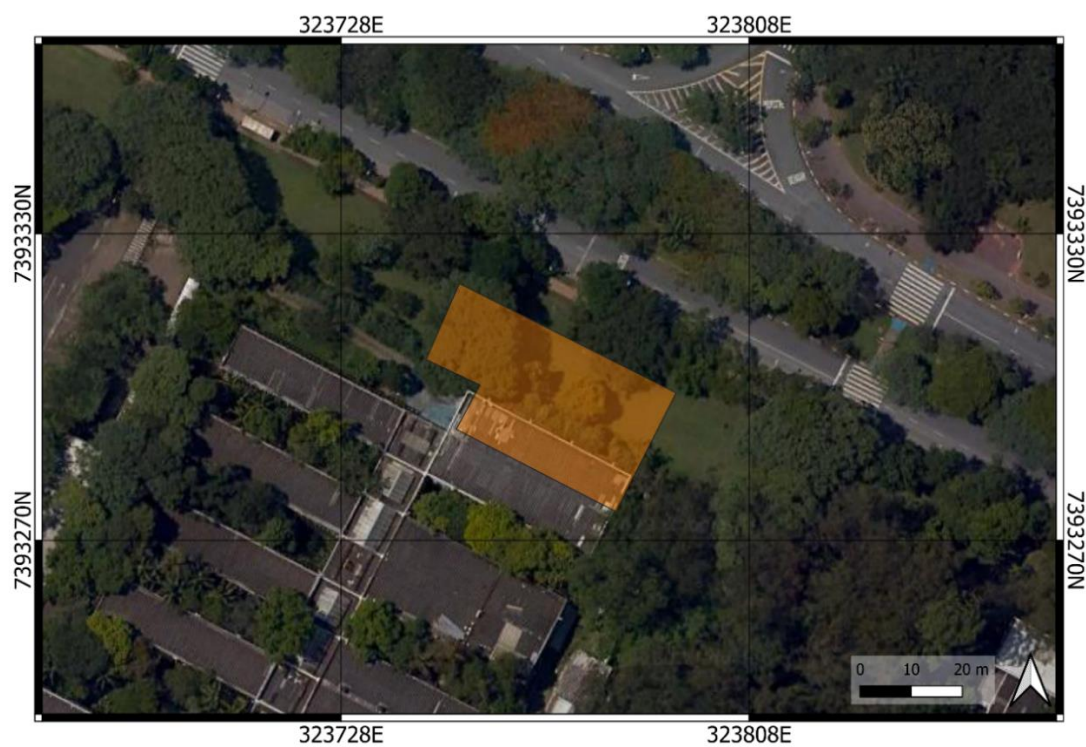


Figura 8: Localização da área de estudo nas dependências do Bloco I no Instituto de Geociências da USP (em laranja)

4.4 Aquisição de Dados Geofísicos

As aquisições de dados foram realizadas em duas mobilizações sobre 3 linhas definidas a partir da posição relativa ao prédio afetado pela patologia, no Bloco I do IGC (Figura 9).

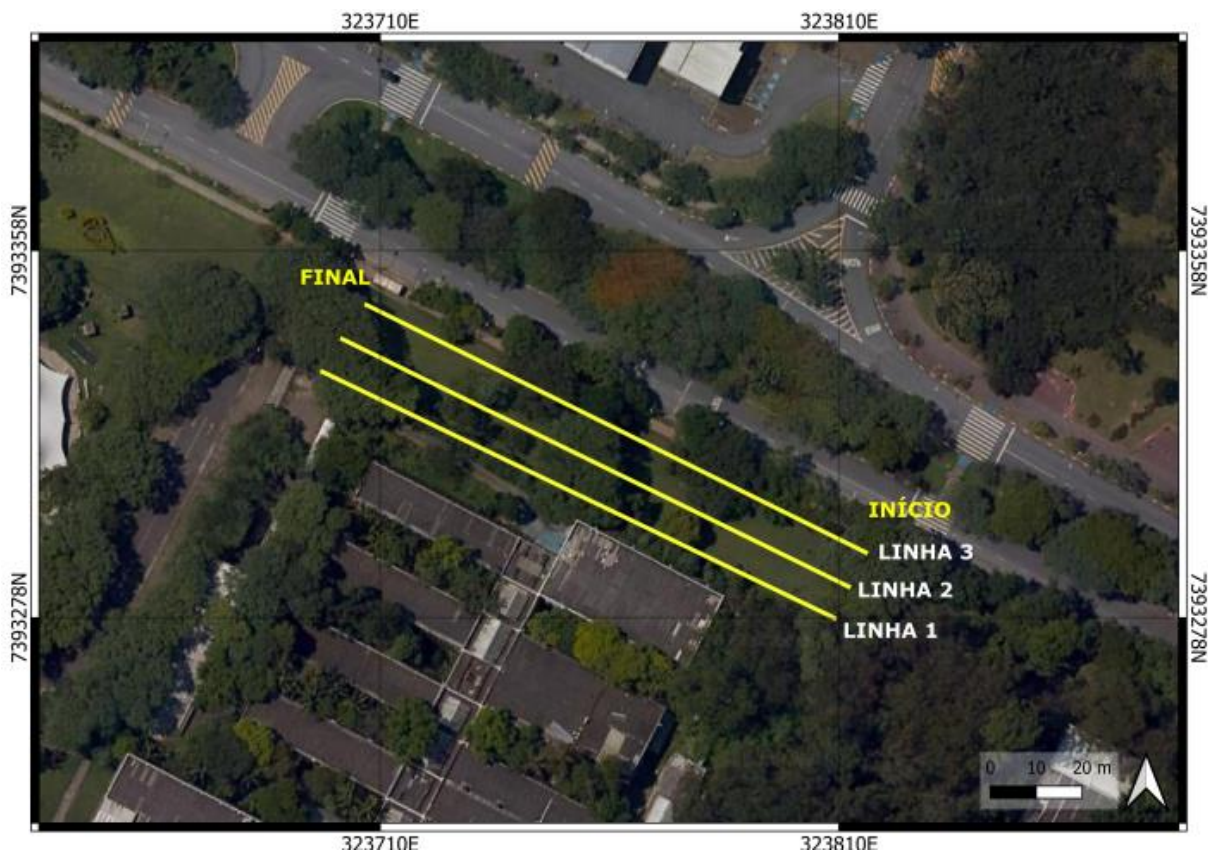


Figura 9: Localização das linhas de aquisição dos dados de GPR e de Eletorresistividade, indicando o sentido de aquisição.

Aquisição de Dados ER

A primeira mobilização para aquisição de dados foi realizada, em junho de 2022 e teve como objetivo a coleta de dados ER sobre as três linhas apresentadas (Figura 9) na área externa a jusante do prédio. Os equipamentos utilizados foram disponibilizados pelo IGc e consistem em um sistema da fabricante IRIS *Instruments* – resistímetro (Syscal PRO II), eletrodos e cabamentos (Figura 10). Foi empregada a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo. O espaçamento entre eletrodos foi de 5 metros e a extensão total entre o primeiro e último eletrodo de 115 metros ponderando entre as limitações do terreno e a maximização da profundidade a ser investigada.



Figura 10: Processo de aquisição de dados ER com equipamento Syscal da fabricante Iris Instruments.

Aquisições de Dados GPR

A segunda bateria de aquisições foi realizada no dia 04/07/2023 com o objetivo de coletar os dados com o método GPR (Figura 11). As linhas GPR foram adquiridas exatamente sobre as posições das linhas ER para que fosse possível a integração dos dados e, consequentemente gerar interpretações integradas das anomalias geofísicas.

Foram utilizadas as antenas de 80, 100 e 200 MHz sobre as 3 linhas de estudos. Os parâmetros de aquisição foram configurados de forma a maximizar a resolução lateral e permitir uma penetração do sinal de no mínimo 8 metros considerando meios com alta permissividade dielétrica.



Figura 11: Processo de aquisição de dados GPR com antena de 100 MHz.

4.5 Modelagem de Dados

Foram realizadas modelagens de dados sintéticos com o objetivo de compará-las às interpretações dos dados reais. Para este fim serão utilizados softwares bem estabelecidos e de uso livre.

Modelagem de Dados ER

No caso da modelagem de dados ER, foi utilizado o software RES2DMOD versão 3.03 (Geotomo, 2002) que pode ser utilizado gratuitamente através do site da companhia criadora. O RES2DMOD pode simular aquisições com o método ER gerando dados sintéticos controlados sobre um modelo conceitual de entrada dado pelo usuário. Dessa forma, diversos cenários (modelos) podem ser testados simulando problemas que podem estar afetando a área estudada.

A geração dos modelos teóricos da forma como foram propostos, considerou as análises dos trabalhos realizados próximos à área de estudos (Borges, 2007; Santos, 2016) onde os autores descrevem a estratigrafia rasa do solo local em detalhe através de amostragens diretas de pontos de escavação.

Após a análise prévia dos dados reais adquiridos sobre a área de estudos, dois modelos foram propostos (Figura 12):

O primeiro modelo (modelo sem zonas saturadas) foi construído com duas camadas de diferentes resistividades, a primeira camada mais rasa com espessura de 2,5 metros e resistividade de 500 $\Omega.m$ representando um aterro antrópico de material areno-argiloso e a segunda camada a partir dos 2,5 metros de profundidade e resistividade de 100 $\Omega.m$ representando um solo argiloso (Figura 12a).

O segundo modelo (modelo com zonas saturadas) foi construído também com as duas camadas exatamente iguais ao primeiro, porém foram adicionadas células de simulação de saturação por água, onde na região mais rasa tem-se uma camada superior de solo areno-argiloso com resistividade de 10 $\Omega.m$ e na parte mais profunda uma camada de solo argiloso com resistividade de 1 $\Omega.m$ (Figura 12b).

O modelo com zonas saturadas simula uma região com vazamento de água que se inicia na camada mais superficial e que se estende até maiores profundidades relativamente. A iniciativa da inserção das células de saturação no modelo parte da hipótese da existência de um possível vazamento no local. Esta hipótese foi levantada através de interpretações prévias dos dados adquiridos no local e que serão discutidas posteriormente.

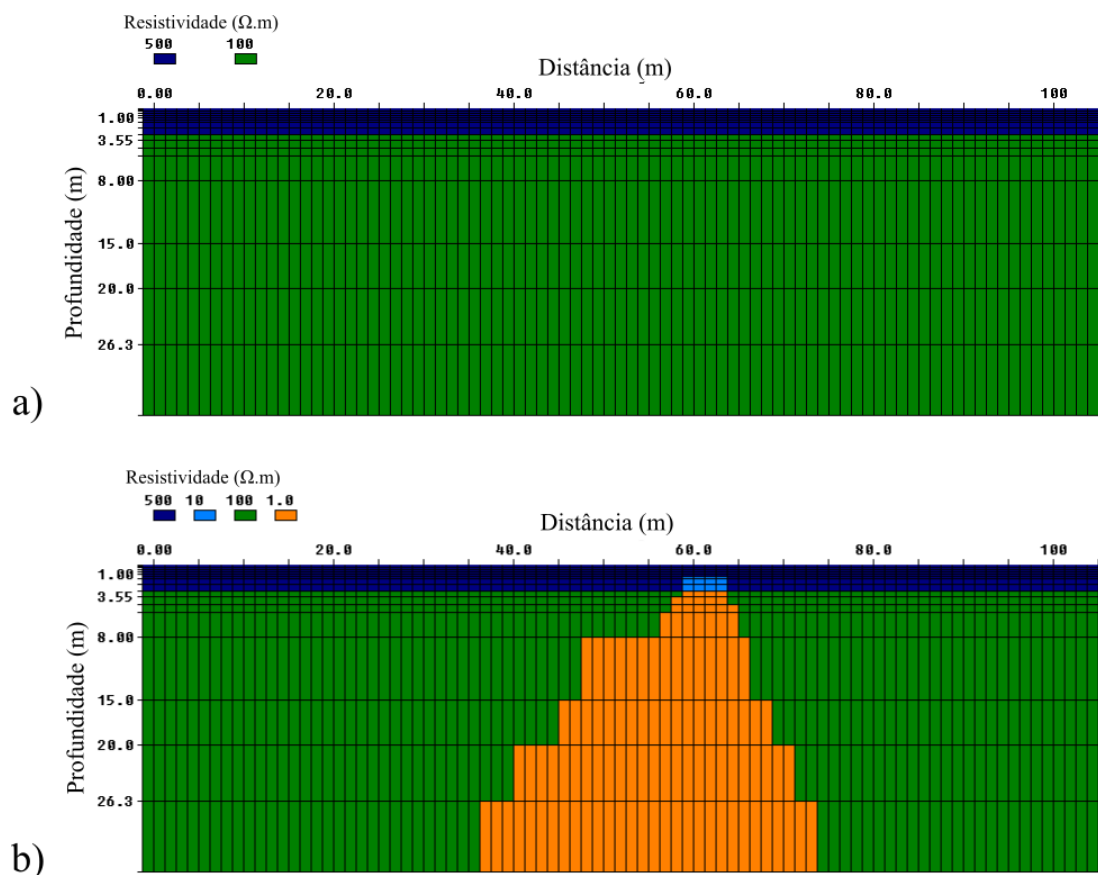


Figura 12: Modelos de resistividade. a) Modelo sem zonas saturadas para simular a área de estudo. b) Modelo com zonas saturadas para simular um vazamento de água na área de estudo.

Modelagem de Dados GPR

No caso da modelagem de dados GPR, foi utilizado o software livre gprMax (Giannakis, 2015; Warren, 2016) escrito em linguagem python e distribuído gratuitamente através do site e github dos criadores. Este software é capaz de construir modelos realísticos do subsolo e antenas GPR comerciais trazendo aos dados sintéticos gerados uma boa aplicabilidade no suporte à interpretação de dados reais.

De forma muito semelhante aos modelos discutidos anteriormente, dois modelos foram propostos (Figura 13 e 14):

O primeiro modelo (modelo sem zonas saturadas) foi construído com duas camadas de diferentes propriedades eletromagnéticas, a primeira camada mais rasa com espessura de 0,25 metros representando um aterro antrópico de material areno-argiloso e a segunda camada a partir dos 0,25 metros de profundidade representando um solo argiloso (Figura 13). Além disso, duas tubulações com diâmetros de 0,02 metros foram inseridas.

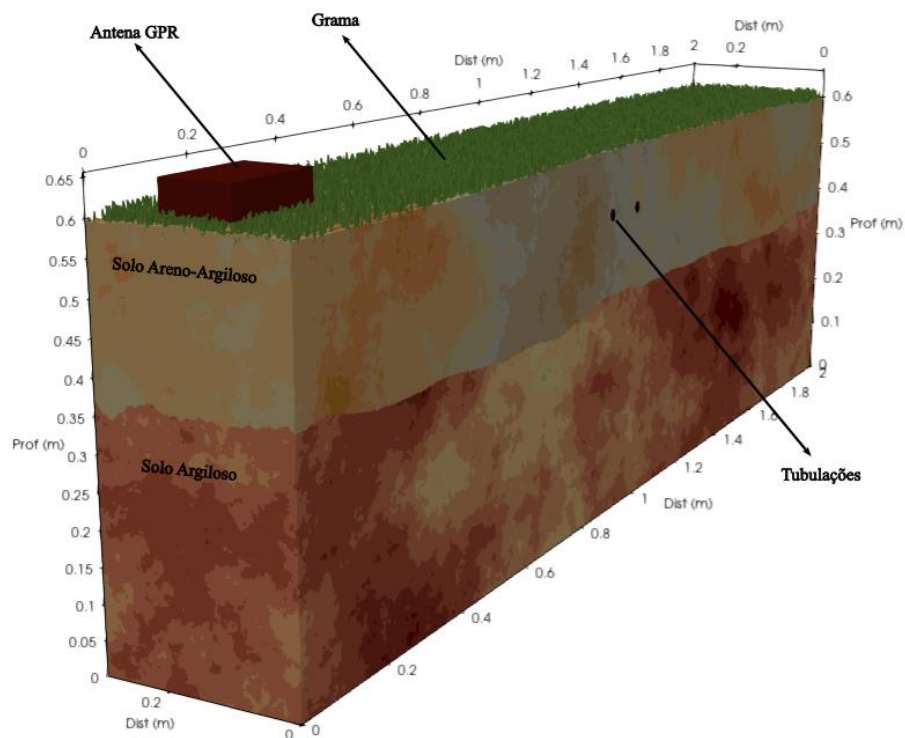
O segundo modelo (modelo com zonas saturadas) foi construído também com as duas camadas exatamente iguais ao primeiro, porém foram adicionadas células de simulação de saturação por água, onde as células mais rasas estão na camada superior de solo areno-argiloso e as células da parte mais profunda na camada de solo argiloso (Figura 14).

Os solos foram simulados através de um modelo matemático proposto por Peplinski (1995), onde podem ser controlados as porcentagens de argila e areia assim como de umidade relativa. As distribuições aleatórias das folhas de grama e dos grãos que compõem os solos são criadas a partir de fractais onde os parâmetros também são controlados.

O modelo com zonas saturadas simula uma região com vazamento de água que se inicia a partir de umas das tubulações e que se estende verticalmente até os limites do modelo. Assim como no caso dos modelos de resistividade elétrica, a iniciativa da inserção das células de saturação no modelo também parte da mesma hipótese da existência de um possível vazamento no local.

Por fim, em ambos os cenários, é adicionada sobre a grama um modelo realístico de antena transmissora da marca GSSI que opera na frequência central de 1500 GHz. Ao realizar a modelagem a posição da antena é atualizada a cada novo registro, podendo então gerar um radargrama sobre cada cenário.

a)



b)

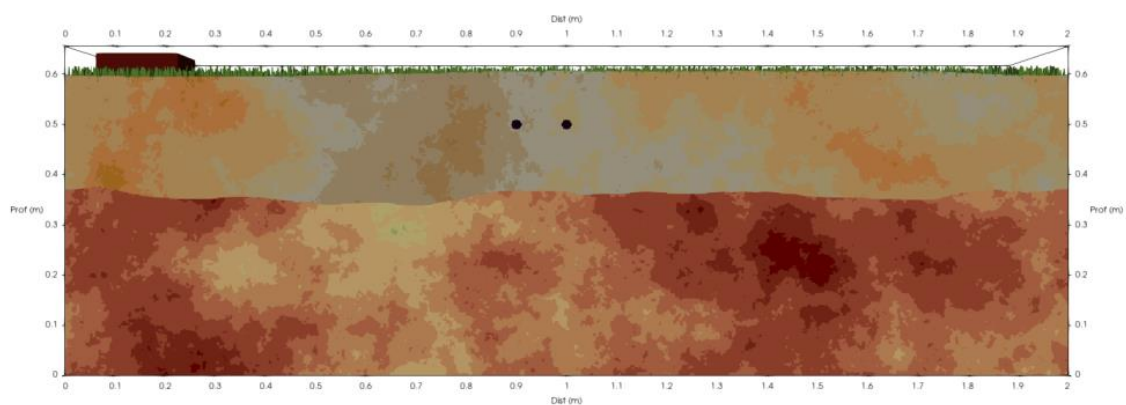
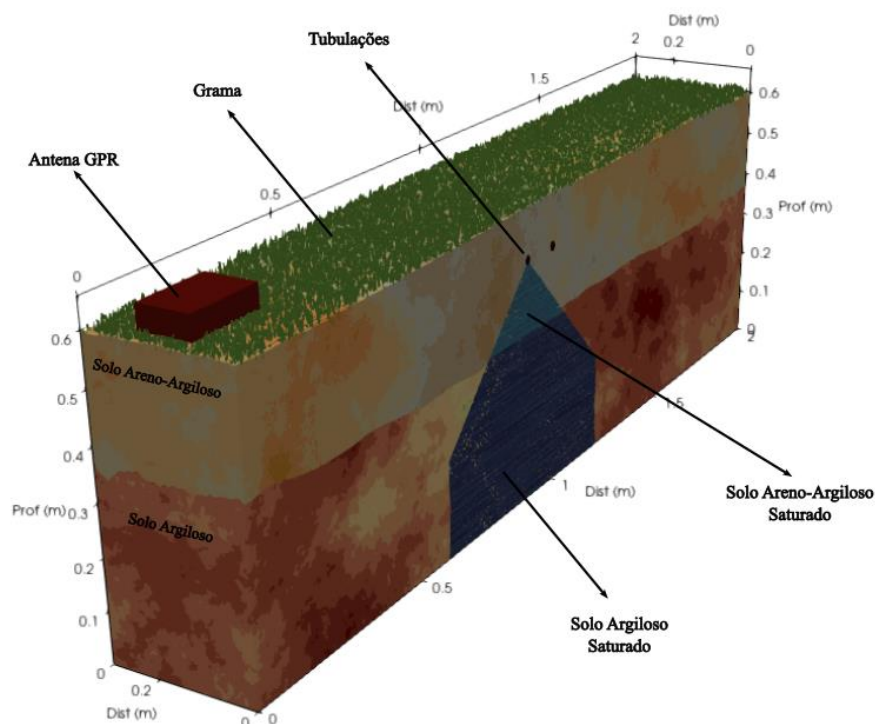


Figura 13: Modelo de propriedades eletromagnéticas sem zonas saturadas para simular a área de estudo. a) vista diagonal do modelo. b) vista lateral do modelo.

a)



b)

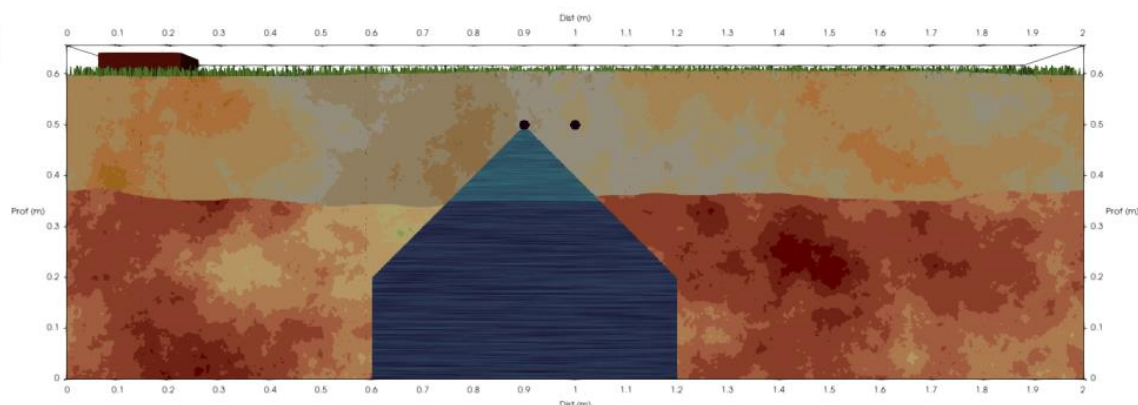


Figura 14: Modelo de propriedades eletromagnéticas com zonas saturadas para simular um vazamento na área de estudo. a) vista diagonal do modelo. b) vista lateral do modelo.

4.6 Processamento de Dados

Os dados brutos adquiridos em campo foram submetidos às etapas de processamento a fim de se gerar dados processados que são passíveis de serem interpretados. No caso dos dados GPR a etapa de processamento é fundamental para retirada de ruídos de frequências indesejadas, compensar as atenuações sofridas na propagação de onda e corrigir efeitos dos parâmetros escolhidos durante as aquisições. Os dados ER, por sua vez, são submetidos a uma análise com relação à qualidades dos

pontos que o compõe e submetido ao processo de modelagem inversa. Esta modelagem produz um resultado, teoricamente, compatível com a distribuição das resistividades em subsuperfície.

Processamento GPR

Descrevendo inicialmente o processamento utilizado nos dados GPR, a aplicação da seguinte sequência de ferramentas se fez necessária: (1) filtro Dewow, (2) correção do tempo zero, (3) ganho temporal, (4) filtro 2D de remoção de background, (5) filtro de frequência passa-banda e (6) corte da janela temporal.

O efeito do processamento nos dados brutos pode ser visto na Figura 15. Nota-se que o dado bruto provindo diretamente do equipamento apresenta fortes reflexões superficiais e frequências indesejáveis que, juntamente com a falta de compensação da atenuação, mascaram as anomalias de interesse (Figura 15a). O dado processado permite a visualização de feições mais profundas e de anomalias que podem caracterizar zonas de interesse ao projeto em questão (Figura 15b).

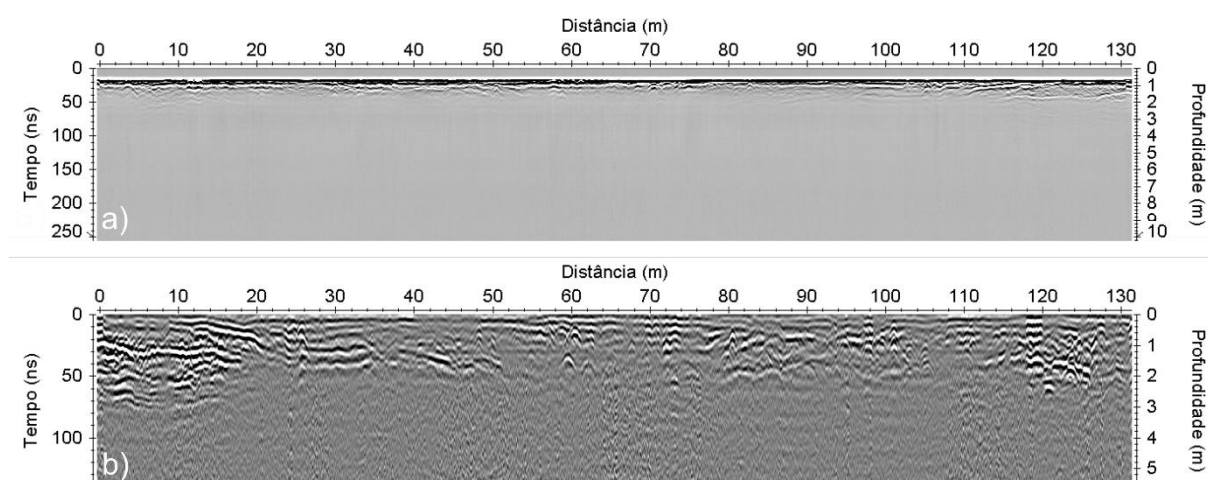


Figura 15: Processamento de dados GPR. a) Dado bruto provindo diretamente do equipamento. b) Dado após a aplicação da rotina de processamento.

Cada uma das etapas de processamento foi aplicada com um objetivo específico. A seguir são comentadas as necessidades da utilização de cada uma delas:

- (1) Filtro Dewow: campos EM externos provindos de outras fontes podem contaminar os dados de campo com uma frequência extremamente baixa. Para eliminar esta componente de baixíssima frequência dos dados é preciso aplicar o filtro dewow.

(2) Correção do Tempo Zero: com o intuito de não se perder nenhum dado durante a aquisição, o operador pode ajustar o tempo do primeiro registro dos dados GPR. O registro pela antena receptora pode ser iniciado antes da emissão pelo transmissor garantindo o registro de todas as amostras. A correção do tempo zero tem como objetivo remover este atraso do transmissor com relação ao receptor, dessa forma ajustando o perfil para os cálculos das profundidades.

(3) Ganho: a aplicação de um ganho nos traços GPR tem como objetivo o aumento da amplitude do sinal para compensar a atenuação sofrida durante a propagação em um meio com condutividade maior que zero.

(4) Remoção de Background (Background Removal): essa ferramenta tem como objetivo eliminar efeitos de reverberação causados pelo acoplamento da antena com o solo.

(5) Filtro de Frequência: essa ferramenta é aplicada com o objetivo de se remover as componentes de frequências indesejadas que podem estar contaminando o sinal GPR. Para se eliminar frequências altas, deve ser utilizado o filtro de frequência passa-baixa que permite que só as frequências abaixo de uma frequência de corte pré-estabelecida permaneçam nos dados. Para se eliminar frequências baixas, deve ser utilizado o filtro de frequência passa-alta que permite que só as frequências acima de uma frequência de corte pré-estabelecida permaneçam nos dados. Para eliminar frequências altas e baixas deve ser utilizado o filtro de frequência passa-banda que permite que só frequências entre duas frequências de corte permaneçam nos dados.

(6) Corte da janela temporal: durante a aquisição o operador controla o tempo de aquisição. Durante as análises dos dados em laboratório é possível verificar qual o alcance em profundidade do mapeamento realizado. Amostras no tempo em profundidades onde não foram observadas reflexões relevantes, devem ser retiradas. Para isso se usa o filtro de corte.

Para se efetuar a conversão tempo-profundidade (cálculo das profundidades) é necessário se estimar a velocidade de propagação das ondas EM para o solo do local. No presente projeto foi utilizada uma estimativa de 0,08 m/ns obtida através do ajuste de hipérbole teórica sobre os dados processados (Figura 16).

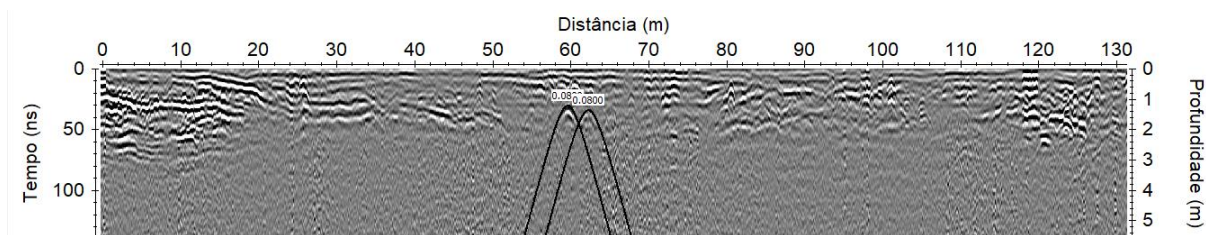


Figura 16: Processo de ajuste de hipérbole teórica para estimativa de velocidade de propagação no meio.

Processamento ER

Os dados ER adquiridos em campo precisam ser analisados com base na qualidade das medidas através da verificação do ruído de cada ponto coletado (Figura 17). Para tal fim, o software Res2Dinv foi utilizado, permitindo a visualização dos pontos (pontos pretos) e seleção para a extração de pontos espúrios (pontos em vermelho)

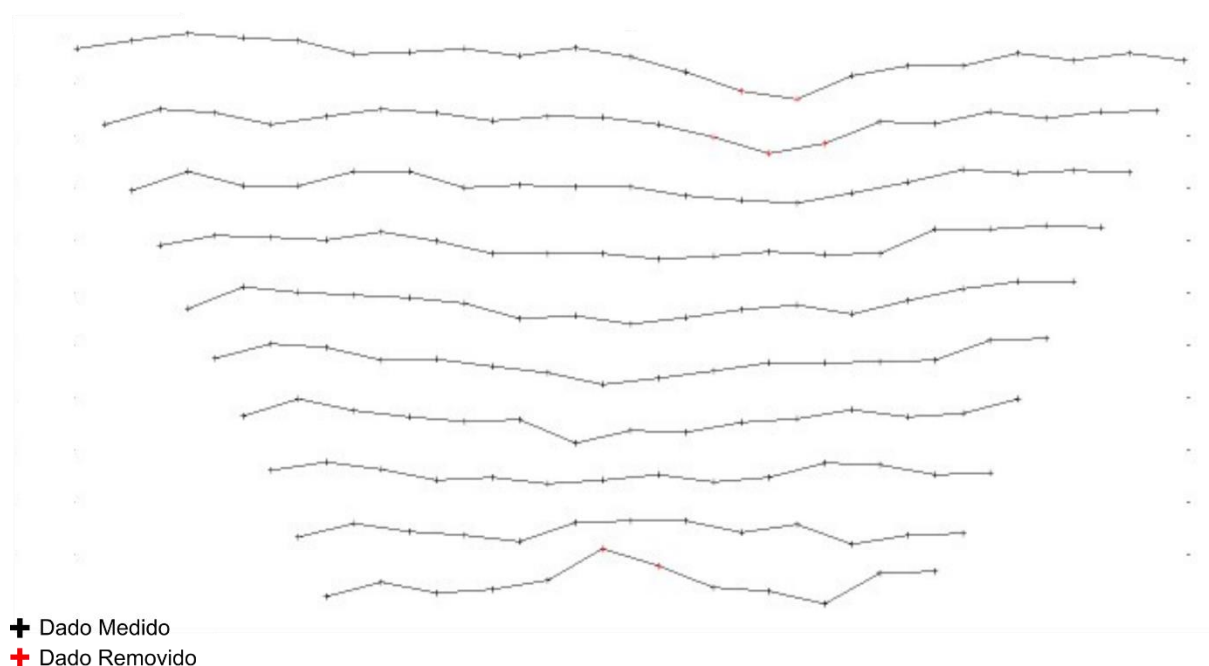


Figura 17: Remoção de pontos espúrios (em vermelho) dos dados ER da linha 1.

Após a etapa de remoção dos pontos, os dados são então submetidos ao processo de inversão (Figura 18). Na Figura 18 é apresentada o perfil gerado pela interpolação dos dados da Linha 1 após a inversão. Ao longo desta monografia este tipo de perfil será chamado de “perfil de resistividade”. Através dos perfis de resistividade pode-se iniciar o processo de interpretação baseado nos valores de resistividade encontrados em cada anomalia.

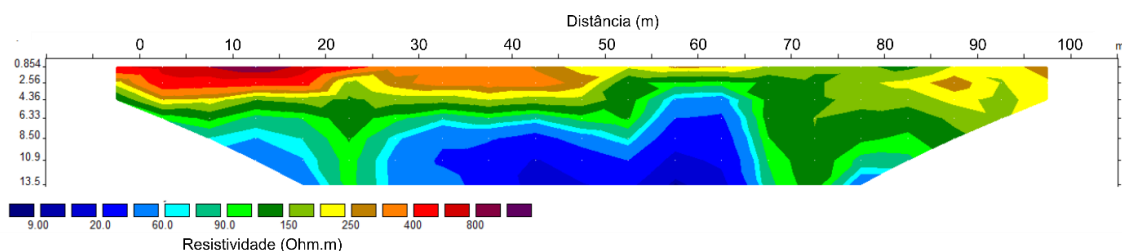


Figura 18: Perfil de Resistividade da Linha 1 após a inversão.

5. RESULTADOS

Após a etapa de processamento dos dados é possível iniciar a análise dos resultados. Neste tipo de análises prévias, os dados são observados para verificações simples em buscas de anomalias de interesse ou ruídos que possam ser facilmente identificados. Este processo de análise é necessário para que os resultados possam ser verificados antes do processo de interpretação final. Após este processo, feições de interesse são marcadas sobre os perfis finais.

5.1. Resultados das Modelagens Numéricas

Os resultados das modelagens GPR geraram dois radargramas sintéticos com anomalias úteis para auxiliar e corroborar hipóteses de interpretação (Figura 19). No radargrama gerado sobre o modelo sem zonas saturadas notamos anomalias de reflexão esperadas como a reflexão da onda direta e de acoplamento da antena com a superfície (Figura 19a). Além disso, a interface entre as diferentes camadas de solo pode ser observada em uma reflexão horizontalizada ao longo de todo o perfil. As anomalias hiperbólicas sobrepostas eram esperadas pela presença das duas tubulações inseridas no modelo. Reverberações tanto das anomalias hiperbólicas quanto das reflexões horizontalizadas também estão presentes (Figura 19a).

No radargrama gerado sobre o modelo com vazamento de água observamos anomalias correspondentes ao radargrama do primeiro modelo, porém observamos a descontinuidade da reflexão horizontalizada referente a interface entre as camadas de solos (Figura 19b). A posição desta descontinuidade condiz exatamente com a posição da zona saturada. A posição em profundidade das reverberações se desloca para baixo na zona saturada devido a mudança da velocidade de propagação no solo saturado (Figura 19b).

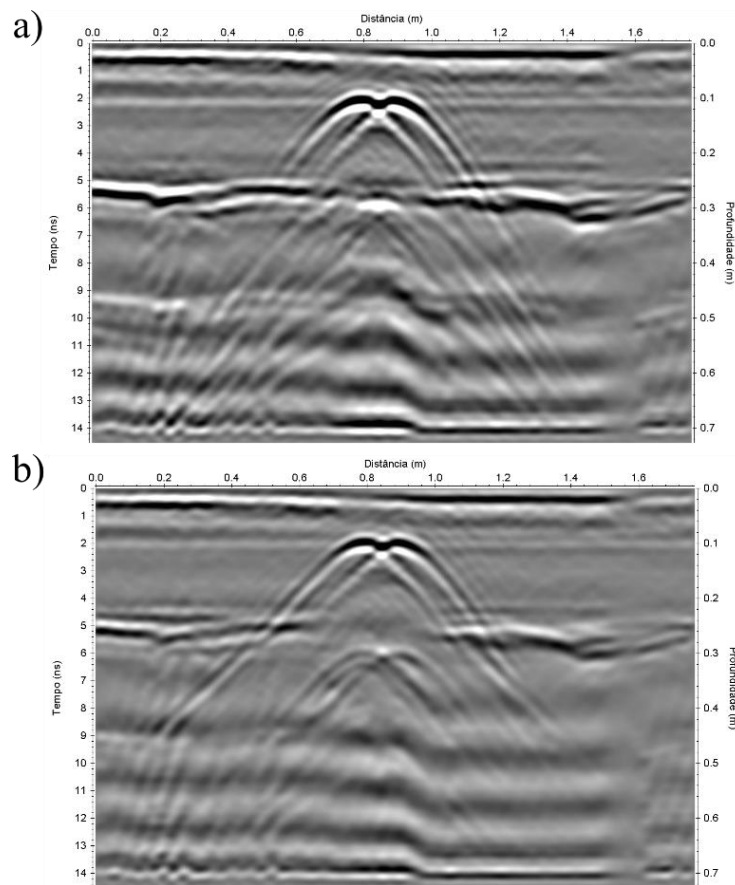


Figura 19: Radargramas sintéticos processados provindos das modelagens de dados gpr sobre os modelos de propriedades eletromagnéticas no gprMax. a) Radargrama sintético gerado sobre o modelo sem zonas de saturação. B) Radargrama sintético gerado sobre o modelo com zonas de saturação por “vazamento de água”.

De forma semelhante, as modelagens ER geraram dois perfis de resistividade sintéticos com anomalias úteis para corroborar hipóteses de interpretação dos dados reais (Figura 20). O perfil gerado a partir do modelo de camadas sem zona de saturação mostra uma capacidade de delimitação clara da interface entre as diferentes camadas de solo (Figura 20a). Uma vez que este mesmo arranjo e parâmetros de aquisição foram executados na aquisição dos dados reais, espera-se um perfil semelhante tanto na forma quanto na amplitude das anomalias de resistividade.

O perfil gerado a partir do modelo de camadas com a zona de saturação mostra também a capacidade de delimitação das camadas, porém, neste caso a anomalia de baixa resistividade gerada pela zona saturada é bem marcada com resistividades de $10 \Omega.m$ como esperado (Figura 20b). Caso haja zonas de saturação nos dados reais, é esperado que uma anomalia semelhante esteja presente nos perfis de resistividade das linhas.

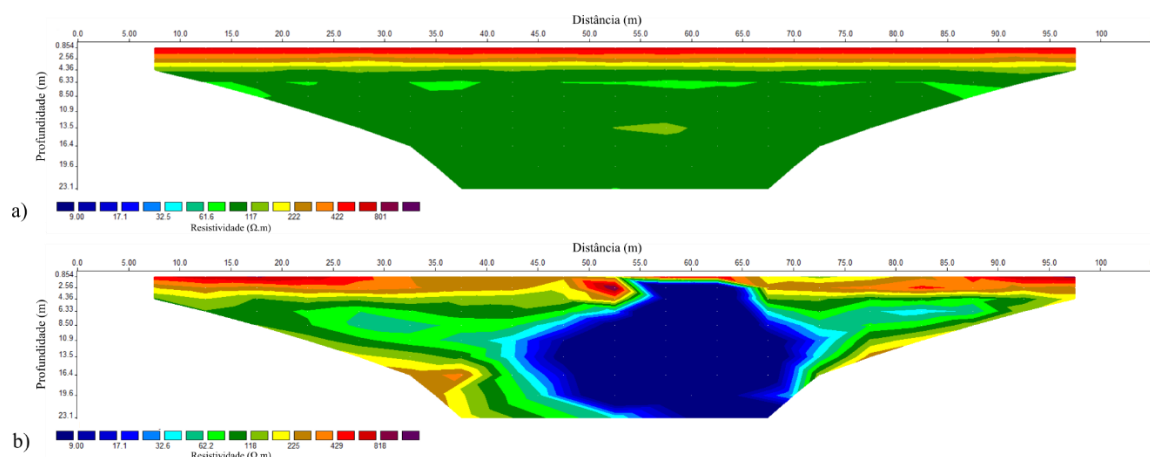


Figura 20: Perfis de resistividade sintéticos providos das modelagens de dados ER sobre os modelos de resistividade elétrica no RES2DMOD. a) Perfil de resistividade gerado sobre o modelo de camadas sem zonas de saturação. b) Perfil de resistividade gerado sobre o modelo de camadas com zonas de saturação simulando vazamentos.

5.2. Resultados GPR

As figuras de 21 a 23 apresentam os perfis GPR processados de cada uma das linhas de aquisição para as 3 frequências utilizadas. No geral, o método GPR não foi capaz de atingir profundidades maiores que 4 metros. Este fato pode ser observado nos radargramas, onde mesmo os perfis gerados com a frequência de 80 MHz, não apresentam anomalias de reflexões abaixo dessa profundidade.

Os perfis da Linha 1 (Figura 21) mostram anomalias de reflexões bem definidas até profundidades de 2,5 metros ao longo de todo o radargrama. Essas anomalias são da forma hiperbólica e também horizontalizadas que devem ser interpretadas de acordo com suas características (forma, amplitude e profundidade).

No perfil da frequência de 80MHz (Figura 21a) observa-se em sua maioria anomalias horizontalizadas, geralmente interpretadas como camadas estratigráficas de diferentes tipos de solo. Os perfis das frequências de 100 e 200MHz (Figuras 21b e 21c), por sua vez, apresentam além das anomalias horizontalizadas, anomalias hiperbólicas que geralmente são interpretadas como tubulações, cabeados ou até mesmo alvos pontuais.

Considerando as anomalias horizontalizadas mais profundas (em torno de 2,5 metros) da Figura 21b, notamos que há uma perda de continuidade entre as posições de 50 e 80 metros ao longo do perfil.

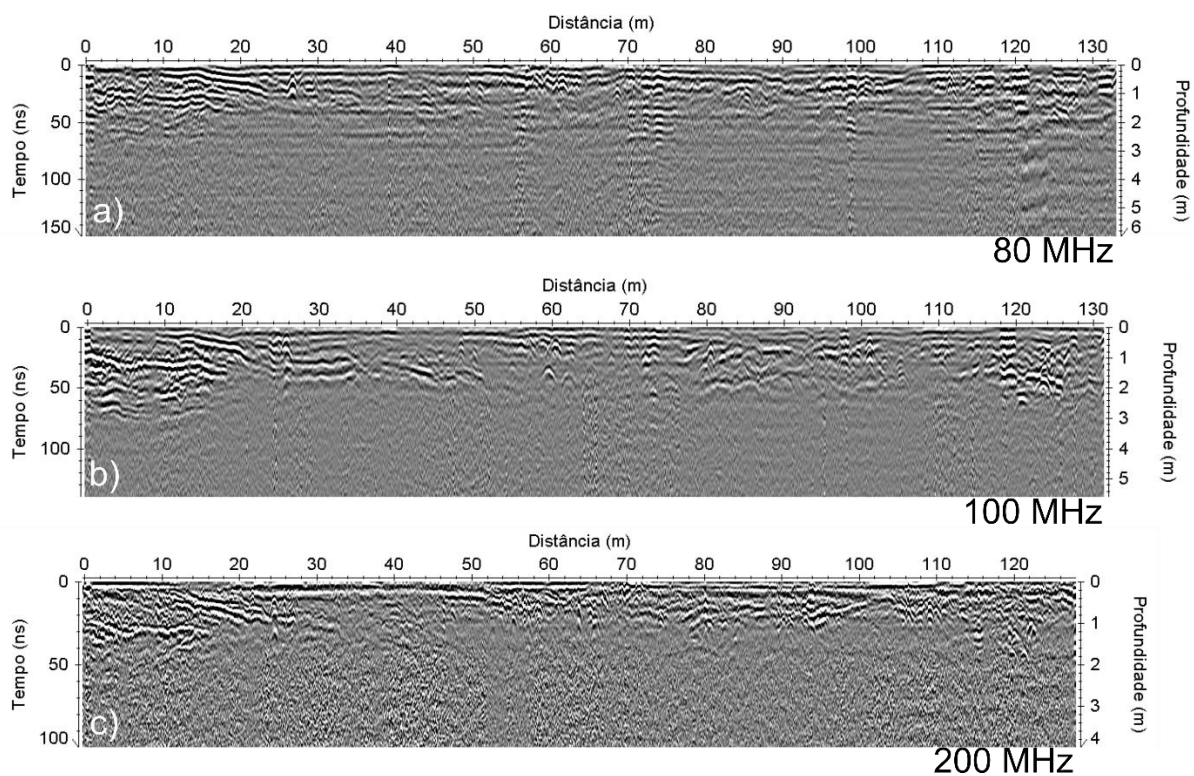


Figura 21: Perfis GPR da linha 1.

O que se observa nos resultados das Figuras 22 e 23 são características e anomalias muitos semelhantes aos discutidos anteriormente para os resultados da Figura 21, exceto pela perda de continuidade das anomalias horizontalizadas que ocorreram nos perfis da Linha 1. Portanto, pode-se observar as anomalias hiperbólicas e também horizontalizadas em todos os perfis. Porém, o fato da descontinuidade não estar presente nas linhas mais distantes do prédio afetado pela patologia, nos dá o indicativo de que esta anomalia provavelmente está ligada ao problema estrutural do prédio.

Todas as feições de interesse serão marcadas sobre o radargrama e apresentadas de forma clara no capítulo seguinte onde serão apresentadas as interpretações dos resultados. Essas marcações não são colocadas nos radargramas apresentados neste capítulo para que seja possível a visualização integral de todos os dados durante esta análise prévia.

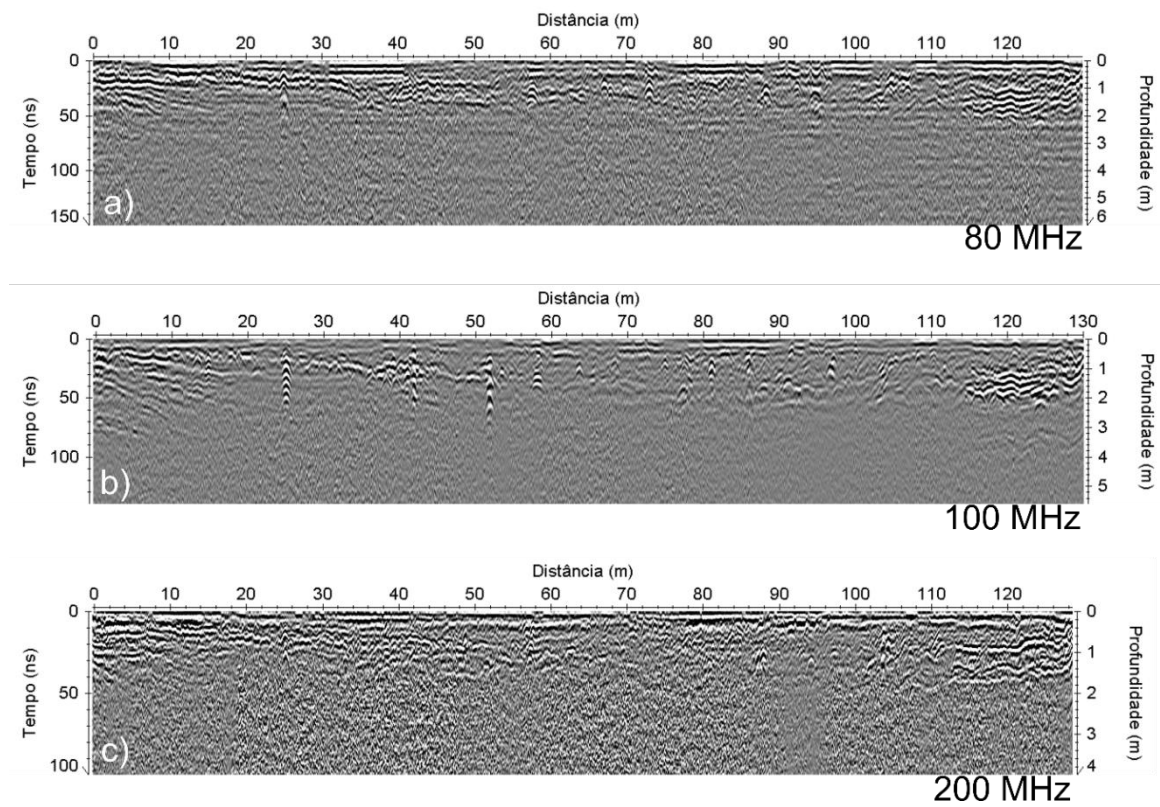


Figura 22: Perfis GPR da linha 2.

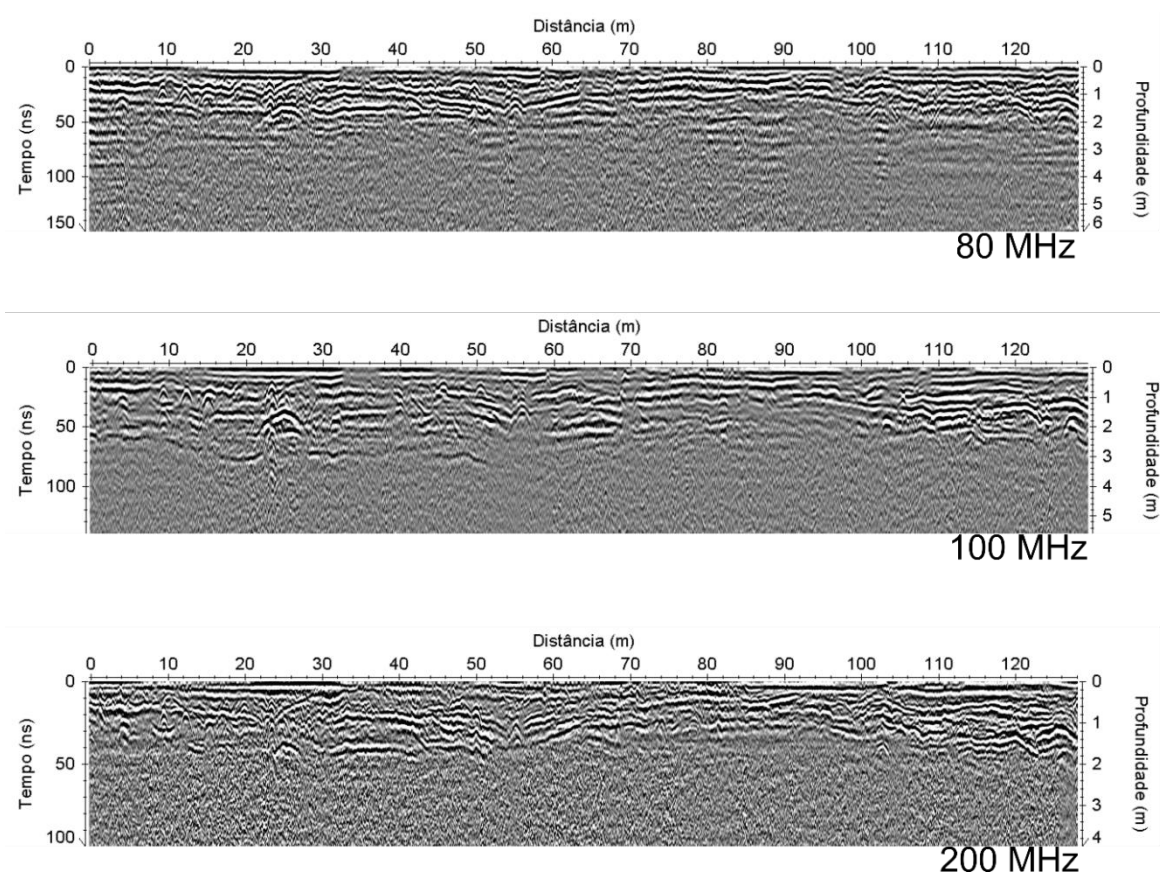


Figura 23: Perfis GPR da linha 3.

5.3. Resultados ER

A seguir são apresentados os resultados dos perfis de resistividade para as 3 linhas de estudo (Figura 24).

No perfil de resistividade adquirido sobre a Linha 1 (Figura 24a), é possível observar uma anomalia no centro do perfil de mais baixa resistividade (valores entre 9 e 60 $\Omega.m$). Essa anomalia tem um ponto mais raso próximo à superfície centralizado na posição de 60 metros ao longo do perfil.

No perfil gerado pela aquisição sobre a Linha 2 (Figura 24b), os valores de resistividade são mais altos com relação ao perfil da Linha 1, apresentando predominantemente valores de resistividade em torno de 90-150 $\Omega.m$ espalhados de maneira mais homogênea ao longo do perfil, e uma anomalia com valores ainda mais altos (entre 250 e 400 $\Omega.m$) localizados bem próximo à superfície. Esta anomalia provavelmente reflete a presença de resquícios do aterro antrópico que, pelo fato deste perfil estar mais abaixo na topografia, não tem mais uma espessura considerável.

Por fim, no perfil da Linha 3 (Figura 24c), é observado valores intermediários de resistividade, em que 90-250 $\Omega.m$ são os valores que aparecem predominantemente. O que pode ser concluído é que os valores menores neste perfil são decorrentes da maior umidade do solo nesta linha, considerando que esta é a linha mais baixa na topografia do terreno. Nota-se também que nenhum indício de aterro antrópico é detectado neste perfil.

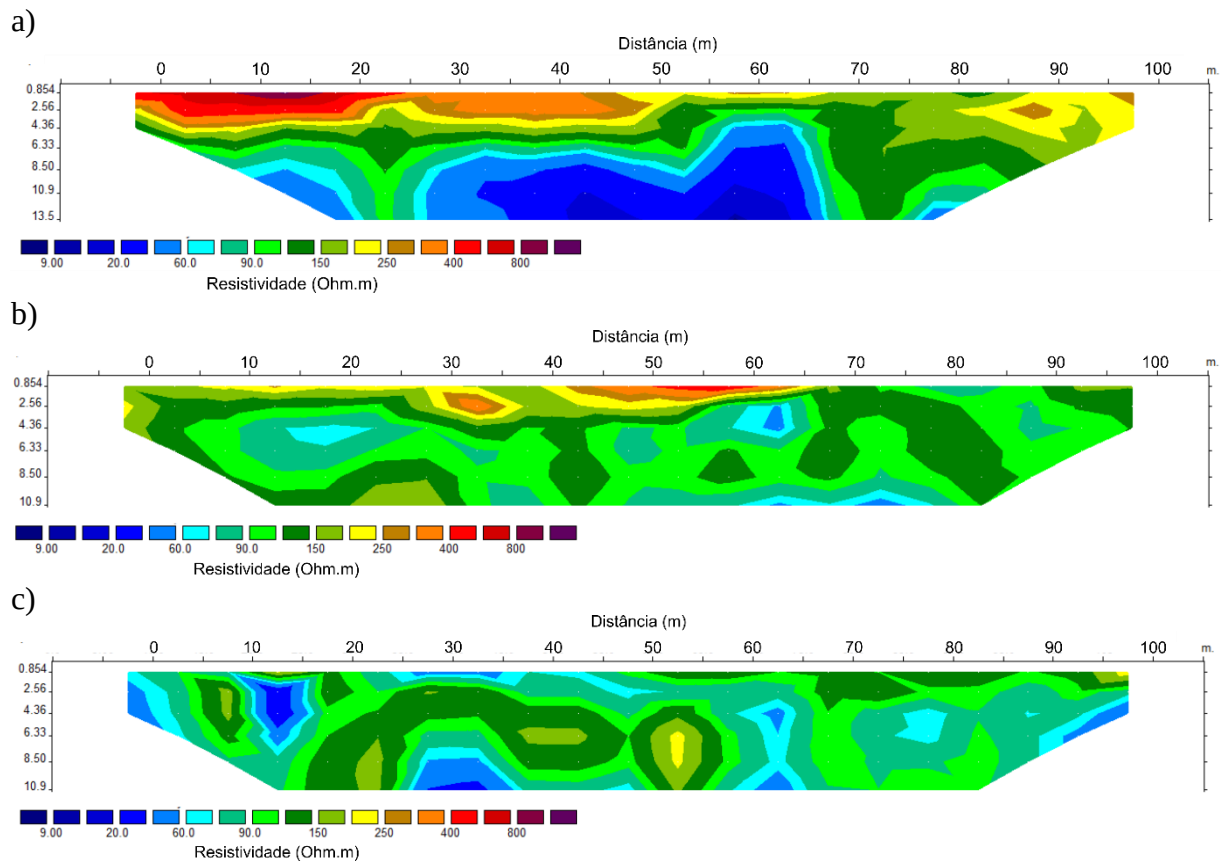


Figura 24: Perfis de resistividade das 3 linhas de aquisição. a) Linha 1. b) Linha 2. c) Linha 3.

6. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES

Após a análise prévia dos resultados, as hipóteses foram repensadas e uma delas foi corroborada tanto pela integração dos dados GPR e ER quanto pelas modelagens numéricas realizadas.

6.1. Interpretações dos Dados Sintéticos

As marcações feitas sobre os perfis sintéticos mostram as principais feições a serem estudadas e que corroboraram as interpretações dos dados reais da área de estudo. Inicialmente acerca dos radargramas sintéticos (Figura 25), vemos que em ambos os perfis fica clara a presença da tubulação identificada pelas anomalias hiperbólicas de alta amplitude a profundidades de 0,1 metros (discos em vermelho).

Além disso, a interface entre as diferentes camadas de solo é facilmente identificada pela anomalia de reflexão horizontalizada em profundidades de aproximadamente 0,25 metros (linha tracejada azul). As reverberações são possíveis de serem identificadas devidos a suas

características peculiares como a perda de amplitude ao longo do tempo e a repetição exata do padrão/forma da reflexão primária.

Apesar das características comuns entre os dois radargramas, é possível observar que a anomalia horizontalizada gerada na interface entre as camadas de solo se estende ao longo de todo o perfil do modelo sem zona de saturação (Figura 25a). O mesmo não acontece para o perfil gerado a partir do modelo com vazamento de água, onde a reflexão apresenta uma descontinuidade que coincide com a posição da zona de saturação (Figura 25b). Esta diferença mostra que a saturação da região atenua a diferença nos valores de permissividade dielétrica dos solos fazendo com que a reflexão também tenha baixíssima amplitude, resultando na descontinuidade desta anomalia.

Com relação aos perfis de resistividade sintéticos, vemos que os resultados são bem coerentes com os modelos propostos (Figura 26). No perfil gerado sobre o modelo de camadas sem saturação, vemos claramente duas camadas com valores de resistividades diferentes e interface plana em torno de 2,5 metros de profundidade (Figura 26a). Vemos que a transição de valores na interface é abrupta, o que era esperado devido a forma também abrupta do modelo.

O perfil de resistividade gerado sobre o modelo com zona de saturação apresenta uma anomalia de baixa resistividade na porção do modelo que representa a zona saturada (Figura 26b). Os valores de resistividade inseridos no modelo para as zonas saturadas foram de 1 $\Omega.m$ para o solo argiloso saturado e de 10 $\Omega.m$ para o solo areno-argiloso saturado. A anomalia do perfil de resistividade apresenta mesmo na porção mais rasa valores abaixo de 9 $\Omega.m$, mostrando que valores mais baixos de resistividade são preponderantes nos dados invertidos.

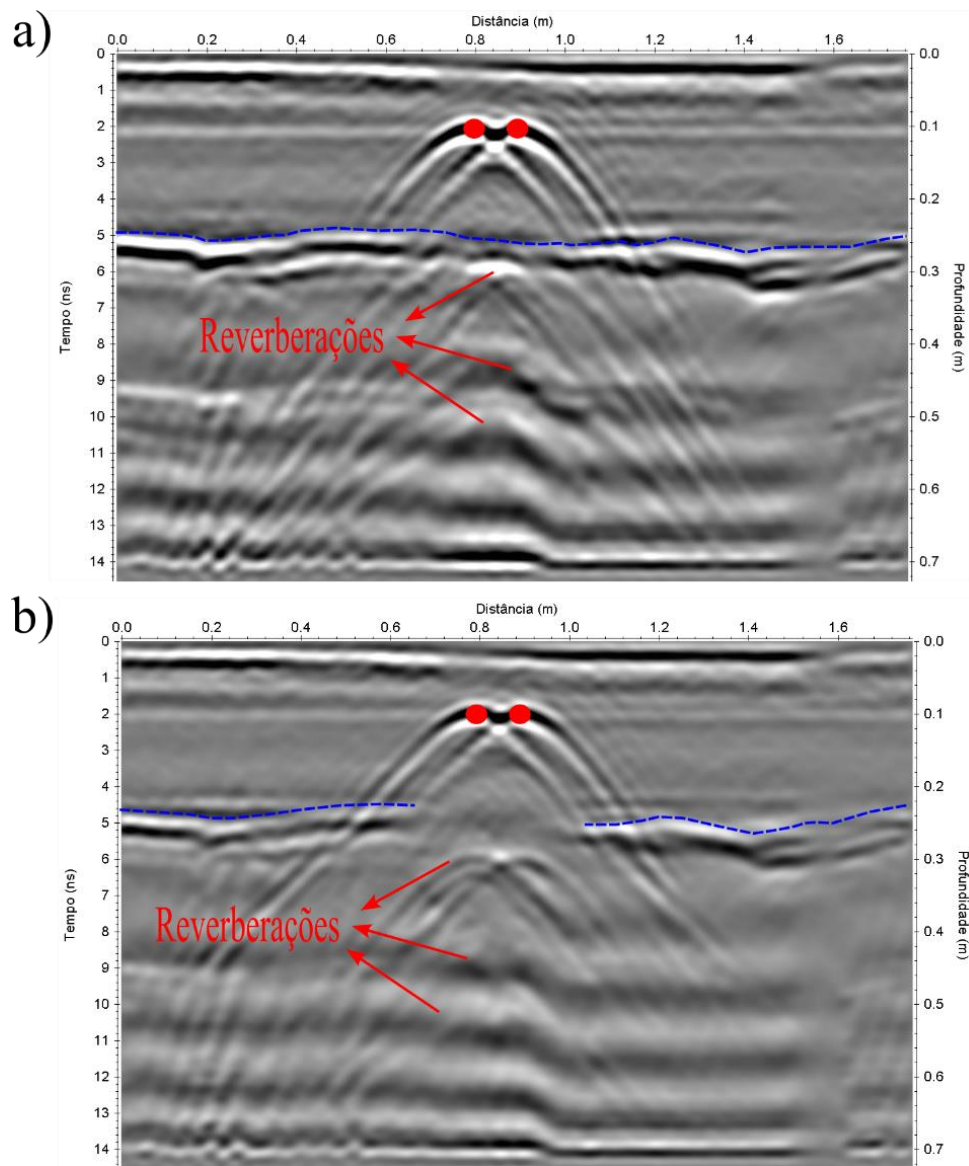


Figura 25: Radargramas sintéticos processados e interpretados onde em azul tracejado está marcada a reflexão gerada na interface entre as camadas de solo e os discos vermelhos marcam a posição das tubulações. a) Radargrama sintético gerado sobre o modelo sem zonas de saturação. b) Radargrama sintético gerado sobre o modelo com zonas de saturação por “vazamento de água”.

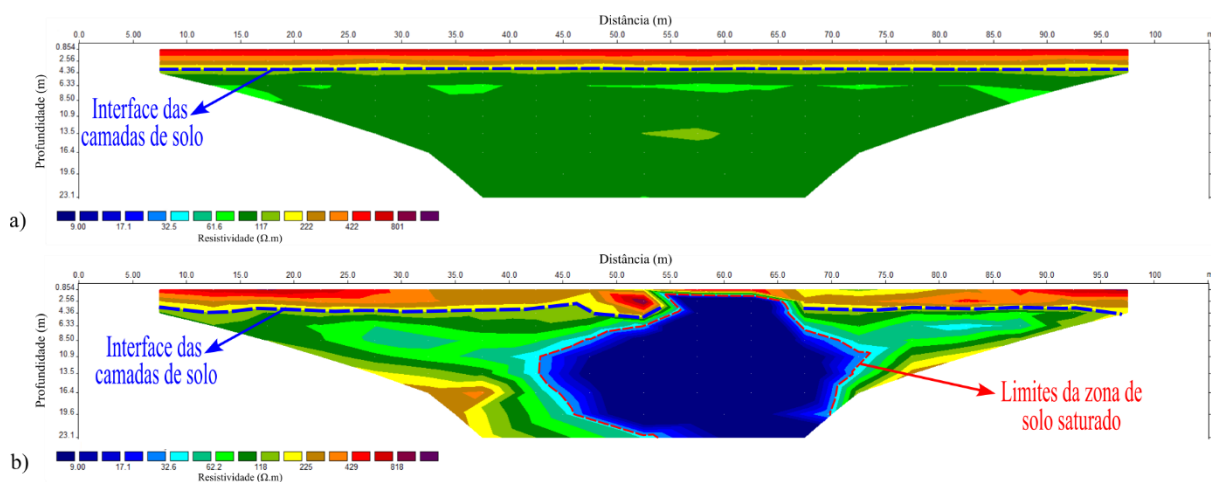


Figura 26: Perfis de resistividade sintéticos interpretados, onde em azul tracejado está marcada a interface entre as camadas de solo e em vermelho tracejado estão marcados os limites de uma anomalia de baixa resistividade elétrica. a) Perfil sintético gerado sobre o modelo sem zonas de saturação. B) Perfil sintético gerado sobre o modelo com zonas de saturação por “vazamento de água”.

6.3 Interpretações dos Dados GPR

As interpretações dos dados GPR e ER assim como a integração de ambas consideraram os resultados das modelagens numéricas, informações observadas in loco e também resultados prévios de estudos da área.

Com relação ao perfil GPR da Linha 1 (Figura 27) e considerando informações diretas obtidas no local, a anomalia hiperbólica no centro do perfil foi interpretada como sendo correspondente da presença de uma tubulação de água. A anomalia horizontalizada marcada em azul, interpretada como a interface entre o aterro antrópico areno-argiloso e o solo argiloso, apresenta uma característica importante de descontinuidade que está associada à presença da tubulação.

Este tipo de descontinuidade foi observada e discutida nos modelos sintéticos, e no caso do perfil da linha 1, a presença da tubulação associada a esta descontinuidade mostra fortes evidências de que um vazamento de água está causando a saturação dos solos nessa zona em específico e consequentemente atingindo a bases do prédio. Foi também inserida a projeção da posição do prédio afetado para que as anomalias identificadas possam ser relacionadas ou não à patologia do prédio. Nesta hipótese do vazamento, vemos que a proximidade com a região do prédio afetada torna possível esta associação.

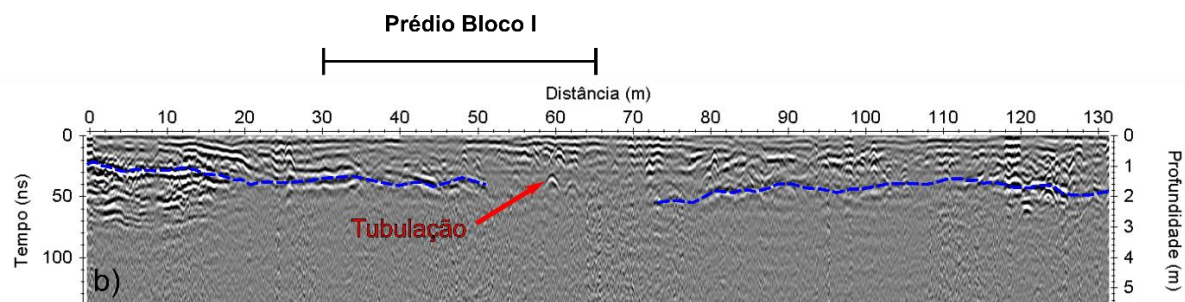


Figura 27: Perfil GPR com interpretação de anomalias de interesse: Uma interface entre camadas de solos (em azul) e uma hipérbole identificando a posição de uma tubulação (em vermelho).

6.3 Interpretações integradas dos Dados ER e GPR

No perfil de resistividade da Linha 1 (Figura 28), foi inserida a posição da tubulação encontrada pelo GPR (em vermelho), pois esta tubulação apresenta uma estrutura de interesse ao projeto e faz parte da principal hipótese para o problema geotécnico. A anomalia de mais baixa resistividade (tracejado vermelho) foi interpretada como uma zona de saturação, que está relacionada com a presença da tubulação. A forma desta anomalia de baixa resistividade, confrontada com a posição da tubulação mostra claras evidências de vazamento nesta área. presença da tubulação marcada em vermelho, onde se observa o efeito de um possível vazamento.

A porção mais rasa do perfil que apresenta valores de resistividades maiores foi interpretada como a camada de aterro antrópico areno-argilose (tracejado azul) devido à sua correspondência com a anomalia GPR horizontalizada e a comparação com a modelagem sobre o modelo da área.

Essa associação é corroborada pelo fato da descontinuidade da anomalia GPR horizontalizada estar relacionada com a exata posição da anomalia de baixa resistividade interpretada como zona de saturação devida ao vazamento de água.

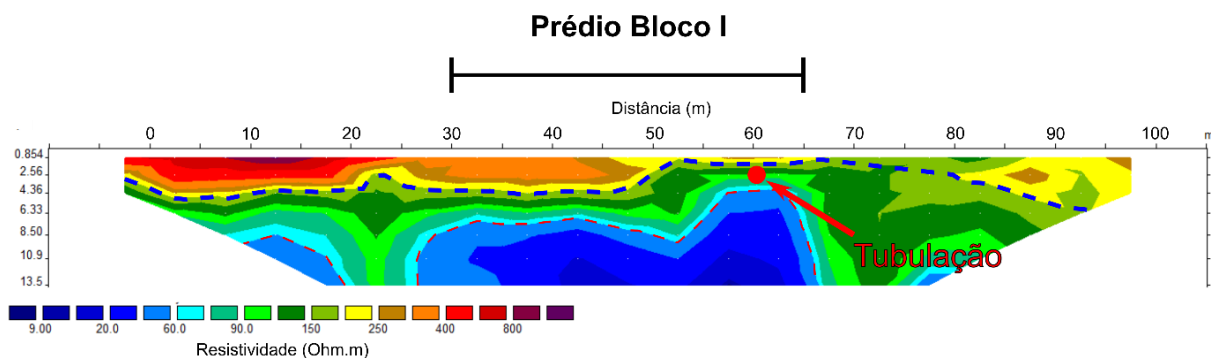


Figura 28: Perfil ER com interpretação de anomalias de interesse: Uma interface entre camadas de solos diferentes (em azul tracejado) e a delimitação de uma anomalia de baixa resistividade (em vermelho). No perfil também é inserida a posição da tubulação encontrada pelo GPR.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho de graduação realizou uma análise geofísica com aplicação geotécnica, empregando métodos de Ground Penetrating Radar (GPR) e Eletrorresistividade (ER), para investigar as causas de anomalias estruturais em um dos prédios do Instituto de Geociências da USP. Os dados coletados revelaram variações significativas na resistividade do subsolo e anomalias de reflexões, sugerindo a presença de zonas de umidade/saturação na área investigada.

A presença de zonas de saturação, identificadas como áreas de baixa resistividade e descontinuidades nas reflexões do GPR, foi um achado crucial. Essas zonas são indicativas de potenciais vazamentos de água, corroborando a hipótese de que a umidade no subsolo pode estar afetando a integridade estrutural do prédio.

As modelagens numéricas desempenharam um papel fundamental na validação das interpretações dos dados reais. A simulação de cenários com e sem zonas de saturação proporcionou um entendimento mais profundo sobre como essas condições podem se manifestar nos dados geofísicos, reforçando as análises realizadas.

Os resultados deste estudo têm implicações significativas para práticas de investigação geotécnica, especialmente em contextos urbanos. Demonstram a eficácia da integração de métodos geofísicos para diagnosticar problemas estruturais complexos e oferecem insights para futuras investigações em áreas similares.

Conclui-se que a combinação de GPR e ER é uma ferramenta poderosa para a investigação geotécnica. Recomenda-se a realização de estudos adicionais para explorar ainda

mais as capacidades dessas técnicas, particularmente em áreas com desafios geotécnicos complexos, como em grandes cidades e centros urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, A.A. 2011. Análise da aplicabilidade do GPR e eletrorresistividade na detecção de dutos. [Trabalho de Graduação]: Salvador, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências.

Alves, F. S. 2011. Uso do georradar para estudos de estratigrafia do subsolo. [Dissertação de Mestrado]: Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Bicudo, T. C., 2021, Caracterização de contaminação por hidrocarboneto creosoto utilizando os métodos GPR e Eletrorresistividade, [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.

Borges, W.R. 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.

Daniels, D.J. 2004. Ground Penetrating Radar 2nd Edition. Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Gallas, J. D. F., Saraiva, F. A. 2022. Relatório de Levantamento Geofísico. Relatório Interno. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

Gallas, J.D.F., Taioli, F., Filho, W.M., Prado, R.L., Dourado, J.C, 2001, Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano, Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 19(1).

Gandolfo, O.C.B. 2007. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

Geotomo, 2002, RES2DMOD, Ver. 3.01, Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods, User's Manual. 15p.

Geotomo, 2003, RES2DINV, Version 3.53 for Windows 98/ME/2000/NT/XP, Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method, User's Manual, 66p.

Giannakis, I. 2015. An advanced GPR modelling framework: the next generation of gprMax. Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 8th International Workshop. Florence, Italy.

Giannakis, I. Giannopoulos, A., Warren, C., 2021, A Machine Learning Scheme for Estimating the Diameter of Reinforcing Bars Using Ground Penetrating Radar, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 18, no. 3, pp. 461-465, March 2021, doi: 10.1109/LGRS.2020.2977505.

Lago, A.L., Borges, W.R., Amaral, E.S., 2019, Mapeamento de áreas de subsidência com GPR em Teresina PI, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 16º, Rio de Janeiro: RJ, 19-22, Agosto.

Peplinski, N. R., Ulaby F. T., Dobson, M. C., 1995, Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 3, pp. 803-807, May, doi: 10.1109/36.387598.

Porsani, J.L., Malagutti Filho, W. 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP.

Porsani, J.L.,Filho, W. M., Elis, V. R., Shimeles, F., Dourado, J.C., Moura, H. P, 2002, The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil, Journal of Applied Geophysics, v. 55, p. 199-209, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.11.001/>.

Saraiva, F.A. 2010. Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de plumas de necrochorume. Tese de Doutorado em Geociências (Recursos Minerais e Hidrogeologia) Orientador Prof.Dr. Fabio Taioli. Universidade de São Paulo. IGc USP.

Souza, M.M. 2005. Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais. [Dissertação de Mestrado]: Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E, 1990, Applied geophysics, in. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 770. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>.

Warren, C., Giannopoulos, A., & Giannakis I., 2016, gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, Computer Physics Communications, doi: 10.1016/j.cpc.2016.08.020.