

MAPEAMENTO DE REDES DE TUBULAÇÕES SUBTERRÂNEAS E DEFINIÇÃO DE SUAS CARACTERÍSTICAS UTILIZANDO O MÉTODO GEOFÍSICO GPR

Túlio Cordeiro Bicudo⁽¹⁾

Mestre em Ciência. Formou-se Bacharel em Geofísica pelo Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo (IAG-USP). Foi intitulado Mestre em Ciência com Ênfase em Ciências da Terra (Stricto Sensu). Atua a mais de 8 anos em prospecções geofísicas para a engenharia, geotecnia, meio ambiente, arqueologia, água subterrânea, planejamento urbano entre outras. Especialista em aplicações dos métodos geofísicos eletromagnéticos (GPR), elétricos, Sísmico de Ondas de Superfície e perfilagem de poços.

Itiro Nakakura

Diretor Executivo.

Endereço⁽¹⁾: Av. Vital Brasil, 177 – Sala 506 – Butantã – São Paulo – SP - Tel (11) 996656231 – email: tulio.bicudogeo@gmail.com.

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação do método geofísico GPR no mapeamento de um sistema de tubulações subterrâneas. Com o crescimento das grandes cidades e centros urbanos, o mapeamento e a caracterização de tubulações enterradas se tornam fundamentais para um desenvolvimento adequado no âmbito do planejamento urbano. Metodologias não destrutivas são essenciais pela facilidade da aplicação, alta produtividade e pelos baixos custos com relação aos métodos diretos de inspeção. O método GPR é uma ferramenta amplamente utilizada em todo o mundo pelo seu caráter não destrutivo, sua alta resolução e sua capacidade de cobrir grandes áreas de maneira rápida, contínua e com baixo custo de aplicação. No presente trabalho, o método GPR foi utilizado com o objetivo de se mapear um sistema subterrâneo de distribuição de água potável, caracterizando as posições e as profundidades das tubulações do sistema, o material que as compõem e detectando possíveis vazamentos. Uma grande área urbana de mais de 50.000 m² foi submetida ao mapeamento. Uma vez executada adequadamente a metodologia de aquisição, as tubulações puderam ser caracterizadas, suas profundidades estimadas e os vazamentos localizados. O mapeamento foi então disponibilizado através de uma planta georreferenciada caracterizando o sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento, GPR, Geofísica.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O método geofísico *Ground Penetrating Radar* (GPR), ou Georadar, como é conhecido comercialmente no Brasil, é uma ferramenta de mapeamento não-destrutiva que pode ser aplicada em muitas áreas. Atualmente, o GPR é utilizado em estudos de engenharia (Dinh et al 2018; Giannakis, 2020, Bicudo et al 2022), pavimentos (Benedeto et al, 2016; Rasol et al, 2022), planejamento urbano (Santos, 2014; Bicudo, 2018), meio ambiente (Bertolla et al, 2014; Bicudo, 2021), entre outras.

No âmbito do planejamento urbano, o GPR é indispensável pela sua capacidade de caracterizar alvos de interesse de forma rápida e contínua. Pode-se mapear tubulações, cabeamentos e galerias com alta resolução, identificando as posições, estimando as profundidades e, por fim, caracterizando os sistemas subterrâneos. A detecção de patologias como vazamentos, trincas ou níveis de corrosão também pode ser feita. Informações ainda mais detalhadas dos alvos podem ser estimadas, como os diâmetros ou os tipos de materiais que os compõem.

Muitos estudos já foram realizados com o objetivo de aprimorar a utilização do método GPR no mapeamento de tubulações e cabeamentos (Porsani, 2010; Bicudo, 2019). Considerando o problema da estimativa de profundidades, pesquisas se concentraram na obtenção mais precisas dos valores de velocidade de propagação de ondas EM. Pesquisas quanto a estimativas de diâmetros de alvos utilizando o método GPR também vem sendo realizadas com o objetivo de avançar ainda mais na extração de características a partir de dados indiretos.

Se tratando de planejamento urbano, estudos utilizando o GPR mostram que este método é muito útil na caracterização de tubulações, cabeamentos e outras interferências de interesse. Pesquisadores ao redor do mundo

produziram trabalhos importantes que servem como base tanto para pesquisas acadêmicas quanto para aplicações comerciais. Pode-se citar estudos para detecção de alvos (Borges, 2007), diferenciação de materiais enterrados (Santos, 2014; Poluha, 2018), detecção de vazamentos ou outras patologias (Bicudo e Santos, 2018) e estimativas de geometrias de alvos (Porsani, 2017).

Borges (2007) mostrou que o GPR pode realizar a detecção e o mapeamento de utilidades de diversos tipos enterrados em solo argiloso. Os resultados das análises 2D e 3D dos dados apresentados permitiram o entendimento do efeito de diferentes características dos alvos enterrados. Dentre os tipos de alvos estudados se destacam cenários complexos como alvos de PVC preenchidos com diferentes tipos de fluídos.

Santos (2014) apresentou um estudo utilizando inteligência artificial para detectar e diferenciar diferentes tipos de materiais que compõem as tubulações enterradas. O resultado mostrou que este tipo de tecnologia computacional é capaz automatizar tanto a detecção quanto a classificação de anomalias GPR. Em solos argilosos, a aplicabilidade do algoritmo foi testada e os resultados foram satisfatórios.

Poluha (2018) apresentou um estudo GPR que acompanhou a instalação de um sitio controlado que consiste em uma grande variedade de alvos simulando situações reais encontradas no Brasil. Dentre os alvos encontrados neste importante “laboratório” podemos citar tubulações, manilhas, cabos e artefatos arqueológicos. A grande quantidade e variedade de alvos, somadas a uma ampla gama de frequências utilizadas, fazem deste estudo uma referência importante para se entender quais os impactos de cada tipo de cenário nas aplicações comerciais do método GPR.

Bicudo e Santos (2018) apresentaram um trabalho onde um processamento especial foi aplicado a dados GPR para se detectar patologias em alvos do planejamento urbano. O processamento aplicado trata-se de uma análise espectral nos dados adquiridos sobre manilhas de concreto, tambores de plástico e tambores de metal. Os dados analisados puderam ser comparados a experimentos complexos realizados em escada laboratorial. Como resultado foi possível inferir patologias como oxidação, perfurações e amassados a partir dos dados GPR.

Porsani (2017) mostrou como a tomografia eletromagnética pode ser utilizada para estimar geometrias de alvos enterrados a partir de levantamentos GPR. O estudo aplicou um algoritmo complexo de tomografia de micro-ondas sobre os dados GPR adquiridos sobre utilidades do planejamento urbano. Os resultados mostraram que o GPR fornece resolução suficiente para que a tomografia de micro-ondas possa fornecer boas estimativas quanto a forma e dimensões dos alvos enterrados.

No presente estudo, o método GPR foi utilizado para mapeamento e caracterização do sistema de distribuição de água potável em uma cidade do interior do estado de São Paulo. Avenidas e ruas em locais estratégicos foram selecionadas e submetidas à aplicação do método. A cidade em questão sofre com problemas na distribuição de água potável, sendo a dificuldade na localização das tubulações e de possíveis vazamentos um dos principais empecilhos para solucionar o problema.

O principal objetivo foi a determinação das posições das tubulações de água potável, porém todas as utilidades enterradas ao longo do percurso estudado foram detectadas e caracterizadas. A localização de possíveis vazamentos e a disposição georreferenciada dos resultados também estavam no escopo do estudo. Dados GPR controlados foram utilizados para embasar as interpretações dos resultados obtidos no projeto. Por fim, possíveis vazamentos na rede de água foram detectados para que intervenções direcionadas pudessem ser executadas.

METODOLOGIA

O GPR é um método geofísico bastante difundido que se baseia na reflexão de ondas EM de altas frequências para o estudo da subsuperfície rasa. Este método opera dentro do range das frequências de rádio (entre 10 e 3000 MHz) e permite um imageamento em alta resolução do subsolo e do interior de estruturas. Uma ampla gama de frequências de operação do método combinado a uma grande variação de propriedades eletromagnéticas nos materiais, permitem com que o GPR possa ser aplicado a estudos de poucos centímetros até dezenas de metros de profundidade.

Uma vez que o GPR faz uso de altas frequências, a permissividade dielétrica ϵ dos materiais é a propriedade EM mais importante e está ligada à propagação do sinal (Annan, 2003). Para se referir a esta propriedade tão importante, utiliza-se a equivalente adimensional permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{equação (1)}$$

onde ϵ_0 é a permissividade dielétrica no vácuo.

Ainda considerando as altas frequências de operação, pode-se definir o coeficiente de atenuação α , em dB/m, como sendo:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \quad \text{equação (2)}$$

onde σ é a condutividade elétrica (S/m) e μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo. A equação 2 mostra que a atenuação do sinal eletromagnético é diretamente proporcional à condutividade elétrica do meio em que se propaga. Com isso, materiais e solos com baixas condutividade caracterizam ambientes favoráveis a aplicação do método GPR.

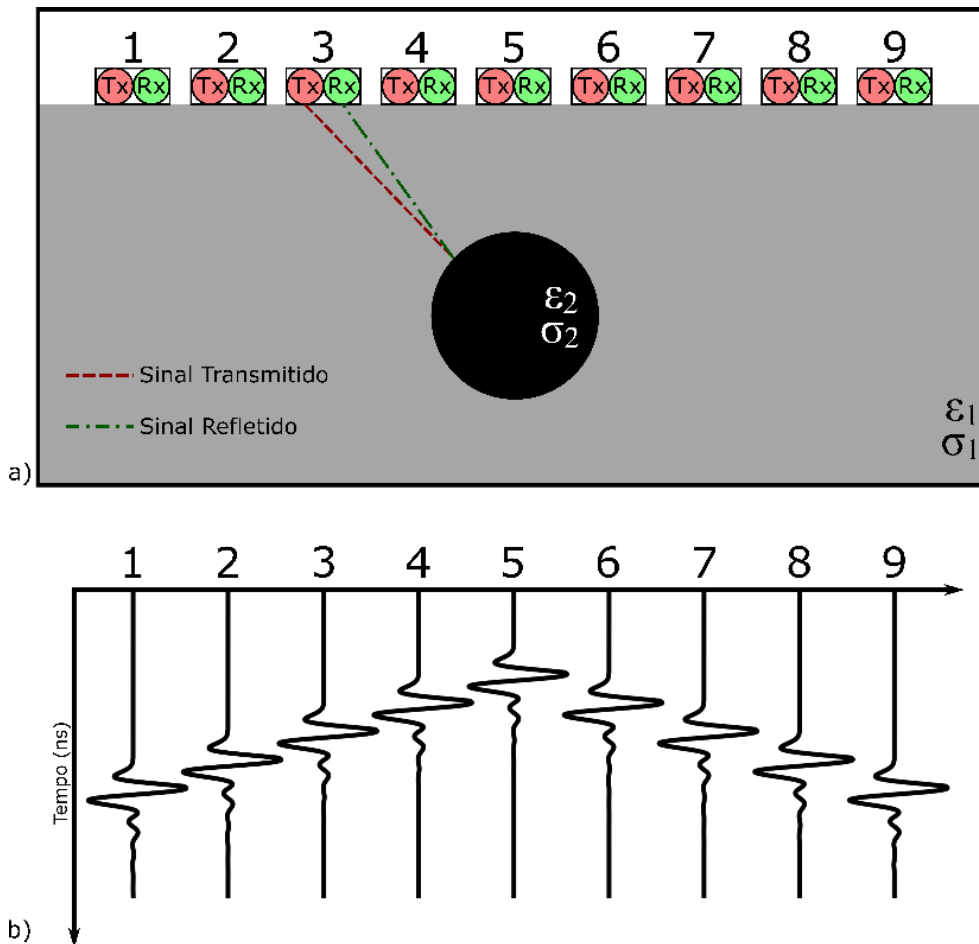
Em meios com baixa perda ($\sigma \cong 0$ S/m), a velocidade v de propagação de uma onda EM, dada em m/s, pode ser descrita como sendo:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{equação (3)}$$

onde $c \cong 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo. A equação 3 mostra que, para meios com baixa perda, a velocidade de propagação não depende da frequência do sinal.

O GPR se baseia na reflexão de ondas EM, sendo o princípio de funcionamento descrito da seguinte maneira (Figura 1): Um pulso EM é emitido em direção à subsuperfície por uma antena transmissora Tx. Ao se deparar com uma diferença de constante dielétrica, parte da energia EM é refletida e o sinal desta reflexão é registrado por uma antena receptora Rx (Figura 1a). Este processo é aplicado repetidamente conforme o conjunto de antenas se desloca pela superfície. O sinal de reflexão registrado pela antena receptora Rx consiste na amplitude do campo eletromagnético e no tempo decorrido após a emissão.

Figura 1 - Princípio de funcionamento do método GPR. a) Emissão e registro de pulsos eletromagnéticos durante uma aquisição de dados. b) Radargrama obtido em uma aquisição apresentando os dados utilizados para a interpretação.



Os dois parâmetros do sinal registrado são apresentados em forma de traços (A-scan) e disposto lado a lado de acordo com a posição em superfície. O perfil GPR, composto por todos os traços, é chamado de Radargrama e caracteriza o dado final que já pode ser analisado e interpretado (Figura 1b).

A Figura 1 mostra que a anomalia observada no radargrama devido a presença de uma tubulação tem a forma hiperbólica. Tal anomalia é chamada de hipérbole de refração e é gerada quando o radargrama é adquirido na direção perpendicular ao eixo da tubulação. As amplitudes das anomalias dependem dos contrastes de propriedades eletromagnéticas.

Considerando novamente um meio de baixa perda ($\sigma \approx 0$ S/m), pode-se calcular a porcentagem de energia que é refletida em uma interface entre dois meios. Isto é feito através do coeficiente de reflexão r dado por:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad \text{equação (4)}$$

onde os subíndices 1 e 2 fazem referência à dois meios diferentes. A equação 4 mostra que a amplitude da anomalia é tão alta quanto a diferença de constante dielétrica entre o solo onde a onda EM se propaga e o alvo o qual a anomalia está relacionada.

A Tabela 1 mostra valores de constante dielétrica e condutividade elétrica de alguns materiais comuns. Com este tipo de informação podemos ter uma previsão, de forma geral, da aplicabilidade do método GPR em estudos específicos, avaliando por exemplo o nível de contraste de constante dielétrica ou os níveis de atenuação através da condutividade elétrica.

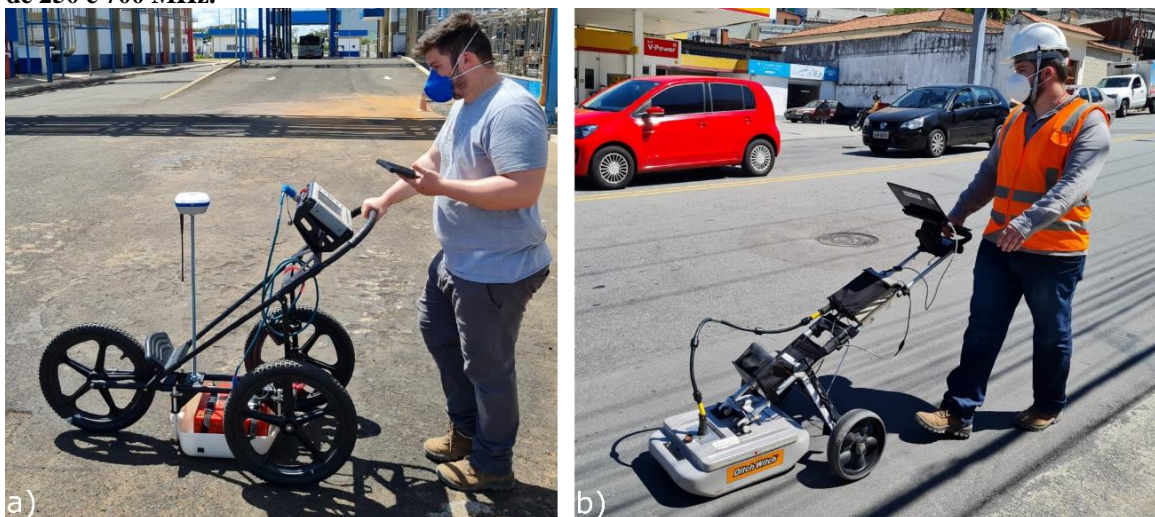
Tabela 1 - Propriedades elétricas de alguns materiais. (Bicudo *et al*, 2021).

Material	ϵ_r	σ (mS/m)
Ar	1	0
Água Fresca	81	0,5
Água Salgada	81	3000
Solo Argiloso Seco	4-6	0,27
Solo Argiloso Saturado	10-15	50
Solo Arenoso Seco	4-6	0,14
Solo Arenoso Saturado	15-30	6,9
Petróleo	2	10^{-8}
Ferro/Aço	1	10^9
Concreto	6-8	0
Granito	7	1

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Os equipamentos utilizados foram escolhidos considerando informações disponíveis acerca das características esperadas das tubulações e do solo local (Figura 2). Dois sistemas GPR distintos: um sistema da fabricante GSSI que opera na frequência de 400 MHz (Figura 2a) e um sistema da fabricante IDS que opera nas frequências de 250 e 700 MHz (Figura 2b).

Figura 2 - Sistemas GPR durante as aquisições de dados. a) Sistema GSSI de 400 MHz. b) Sistema IDS de 250 e 700 MHz.



As aquisições de dados foram realizadas sobre vias, em avenidas e ruas importantes, onde a caracterização do sistema de tubulações foi necessária. Devido ao fato de se tratarem de locais com grande movimentação de pessoas e veículos, a maioria das aquisições foram executadas durante a madrugada. Ao todo foram mapeados mais de 2 km de percurso, considerando calçadas e vias que se tratavam principalmente de avenidas com quatro faixas.

A metodologia de aquisição foi estabelecida de forma a adquirir uma linha GPR a cada 5 metros, cruzando na direção perpendicular às ruas e avenidas a serem mapeadas, possibilitando assim a detecção e caracterização das tubulações paralelas a elas.

Quatro linhas paralelas às vias também foram adquiridas, distribuídas de maneira simétrica, neste caso possibilitando a detecção de tubulações que adentravam as calçadas, residências ou outras benfeitorias. Em locais de cruzamentos com ruas secundárias, um detalhamento muito maior foi realizado com o objetivo de se localizar os cotovelos do sistema de tubulações (Figura 3). A Figura 3 mostra um croqui esquemático de como as linhas GPR foram adquiridas nas ruas e avenidas submetidas às aquisições.

Durante as aquisições de dados GPR, um sistema GNSS também foi acoplado para que os dados pudessem ser georreferenciados com alta precisão. As informações de georreferenciamento são fundamentais para que uma planta final com as posições das utilidades (tubulações e cabeamentos) em alta precisão seja disponibilizada ao cliente.

Após a aquisição das linhas cobrindo todo o trajeto a ser mapeado, os dados são levados ao laboratório para a etapa de processamento. Nesta primeira etapa, a finalidade do processamento ao qual os dados foram submetidos foi realçar os contrastes do sinal GPR, utilizando-se de ganhos para compensar perdas de amplitude e filtros de frequência e espaciais para retirada de ruídos e melhorar a resolução dos dados.

Neste projeto, o processamento foi efetuado utilizando-se a linguagem de computação Python 3.0. A aplicação da seguinte sequência de processamento se fez necessária: (1) Remoção do Ganho de Cabeçalho, (2) Filtro Dewow, (3) Correção do Tempo Zero, (4) Ganho Temporal, (5) Remoção de Background, (6) Filtro de Frequência Passa-Banda. O efeito do processamento nos dados brutos pode ser visto na Figura 4. Nota-se que através da visualização dos dados brutos* não é possível se identificar feições de interesse como hipérboles ou camadas horizontalizadas (Figura 4a). O dado processado permite a visualização de porções mais profundas e de anomalias em forma de hipérboles que caracterizam os alvos de interesse ao projeto em questão (Figura 4b).

Figura 3 - Croqui esquemático das posições onde as linhas GPR foram adquiridas (com relação às ruas e avenidas mapeadas).

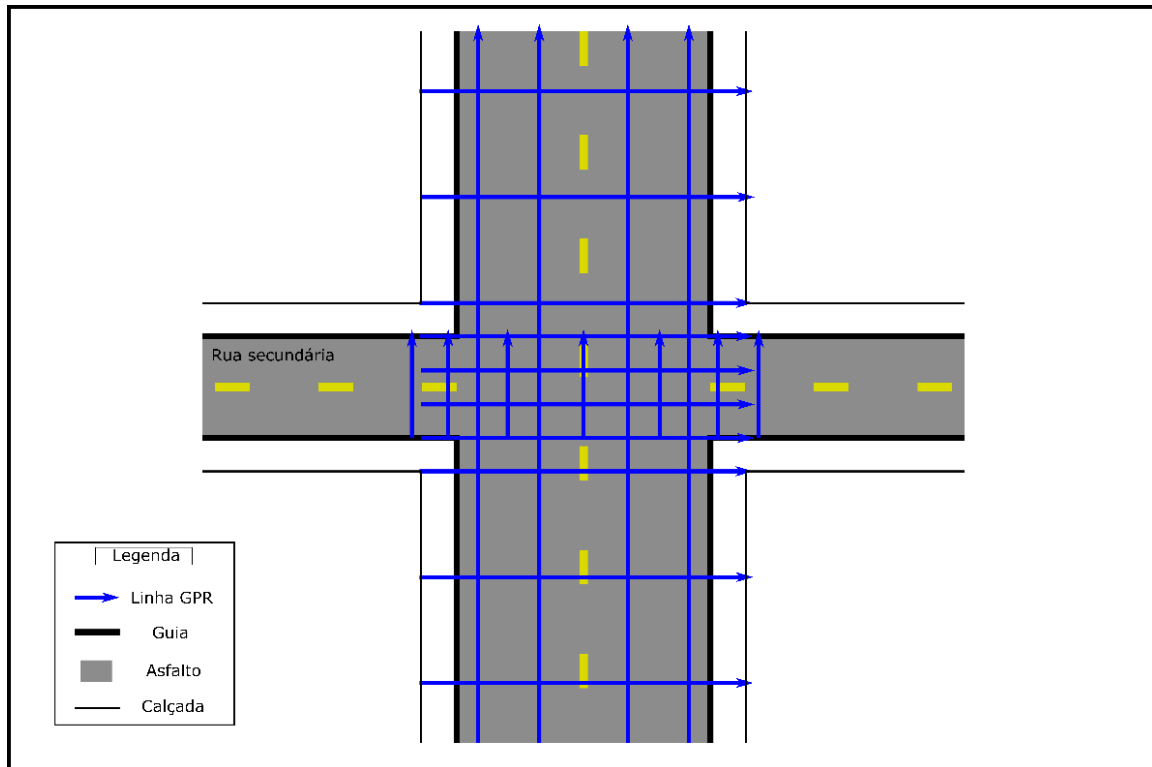
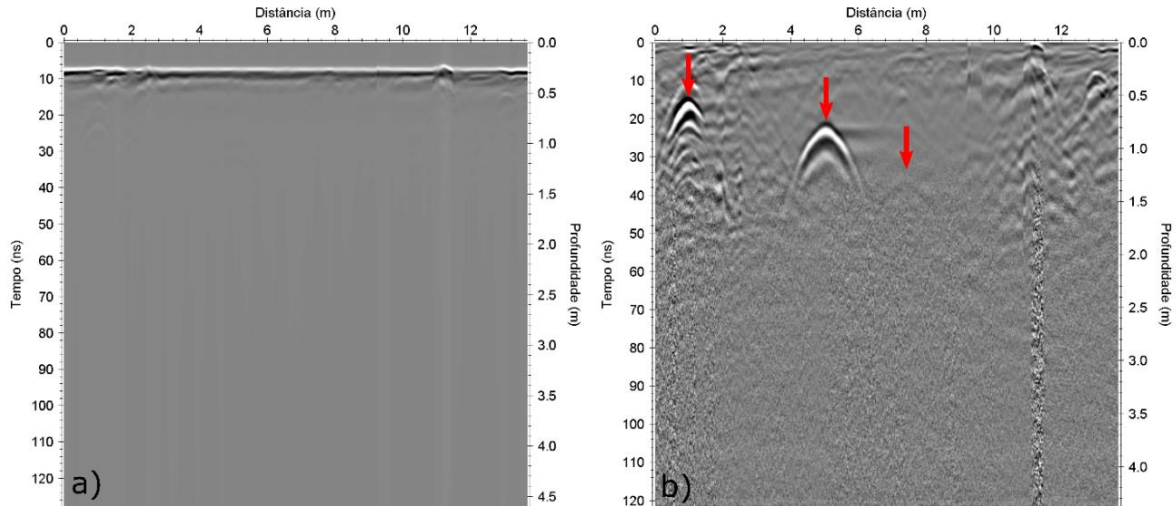
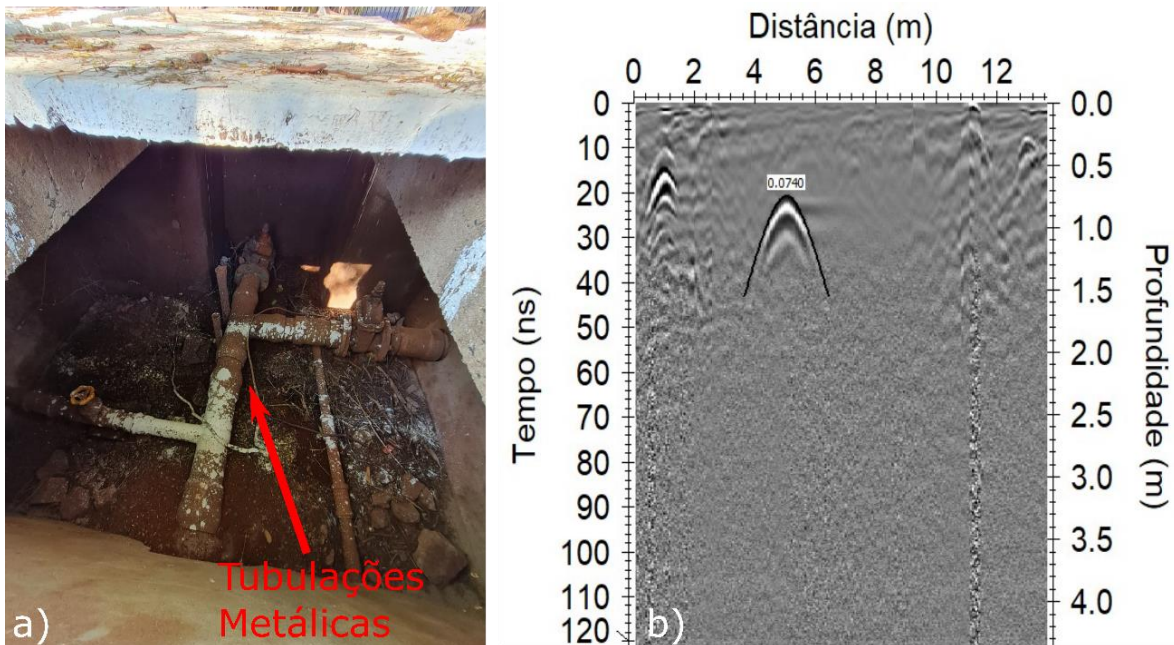


Figura 4 - Efeito da aplicação do processamento nos dados brutos. a) Dado bruto. b) Dado processado em laboratório.



Para se efetuar a conversão Tempo-Profundidade (cálculos de estimativas de profundidades) é necessário se estimar a velocidade de propagação das ondas EM para o solo local (Figura 5). Neste projeto foram utilizadas duas maneiras de se estimar esta velocidade. A primeira maneira foi a utilização de uma tubulação com profundidade conhecida que pôde ser acessada diretamente no local de estudo (Figura 5a). A segunda maneira foi o ajuste matemático de hipérbole teórica sobre as hipérboles observadas nos dados que, neste caso, foi estimada em 0,074 m/ns (Figura 5b).

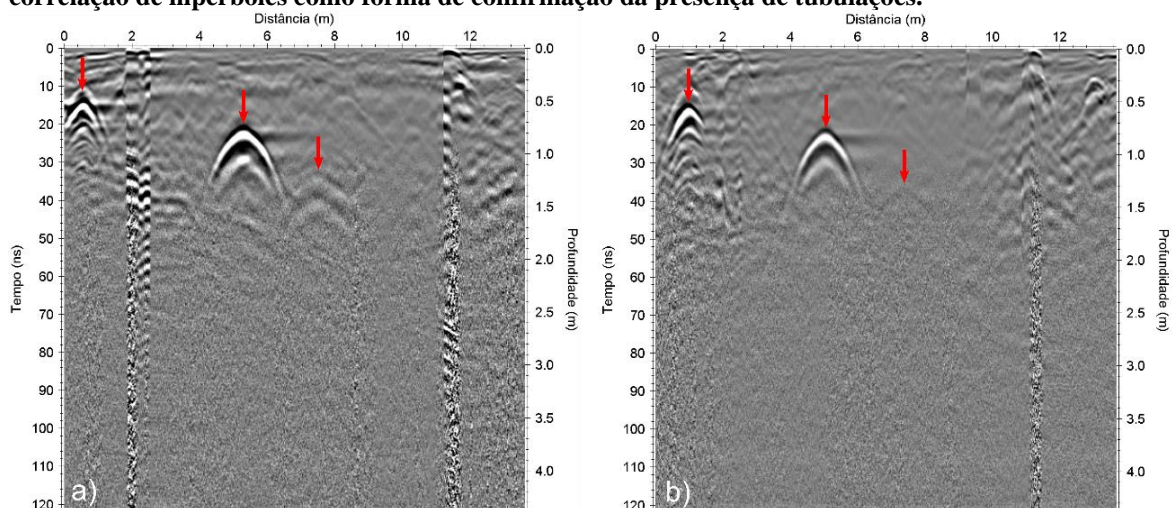
Figura 5 - Métodos de estimativa/ajuste de velocidade para a conversão Tempo-Profundidade. a) Procedimento de ajuste através de um alvo enterrado com profundidades conhecidas. b) Procedimento de ajuste de hipérbole teórica de acordo com velocidade pré-estabelecida.



ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Após o processamento dos dados, cada um dos perfis GPR é analisado em busca de feições hiperbólicas. As hipérbolas são geradas pela presença de tubulações, cabeamentos ou alvos pontuais enterrados quando aqueles são cruzados de forma perpendicular pelos perfis GPR. Perfis paralelos adjacentes são analisados em conjunto para que a presença de tubulações seja confirmada. Observando-se dois perfis paralelos adjacentes adquiridos a 20 metros de distância um do outro, podemos confirmar a presença de tubulações ou cabeamentos e diferenciar hipérbolas localizadas relacionadas à alvos pontuais (Figura 6). No primeiro perfil, nota-se a presença de três hipérbolas, indicadas pelas setas vermelhas, que podem indicar a presença de tubulações e/ou cabeamentos (Figura 6a). No segundo perfil, adquirido a 20 metros de distância do primeiro, nota-se três hipérbolas com evidentes semelhanças com as do primeiro perfil (Figura 6b), o que nos leva a concluir uma correspondência óbvia entre as hipérbolas. Esta correspondência de hipérbolas entre perfis paralelos é a confirmação da presença da tubulação.

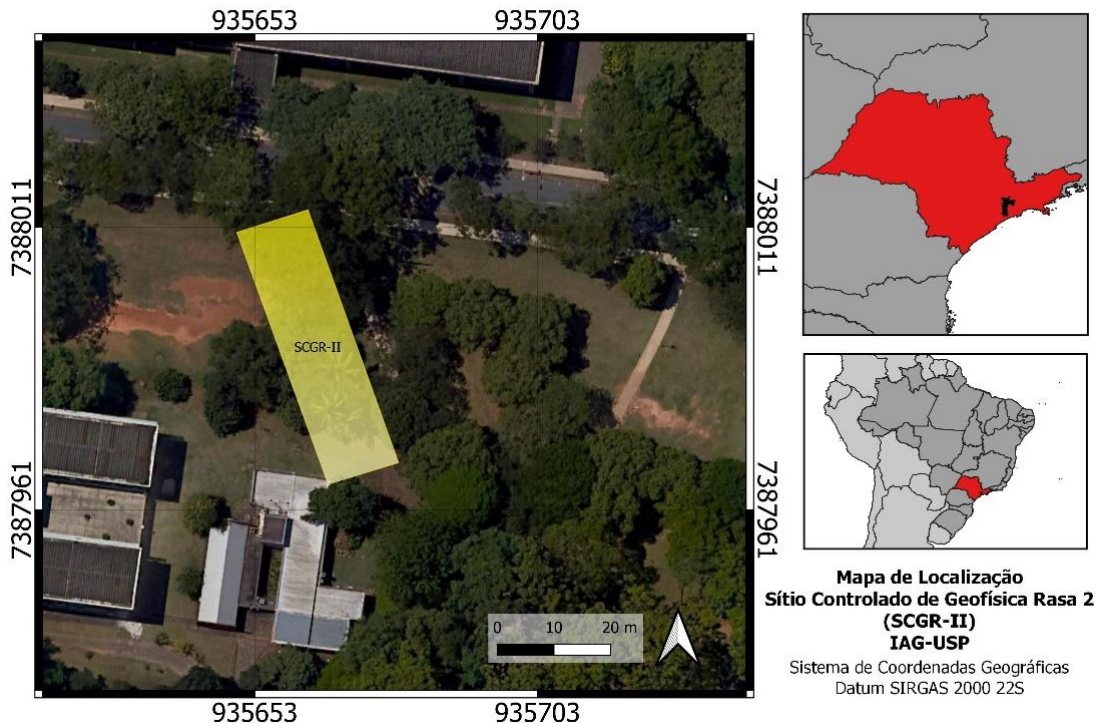
Figura 6 - Dois radargramas paralelos com 20 metros de distância um do outro. Este exemplo mostra a correlação de hipérbolas como forma de confirmação da presença de tubulações.



Para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos, foram feitas aquisições GPR em um local controlado onde estão localizados alvos enterrados (Figura 13). Este grande laboratório geofísico, onde se encontram alvos simulando situações reais, é chamado de Sítio Controlado de Geofísica Rasa 2 (SCGR-II) e está localizado na

Universidade de São Paulo. O SCGR-II é utilizado por alunos, professores e pesquisadores de todo o Brasil para estudos geofísicos envolvendo alvos rasos comumente encontrados no planejamento urbano, arqueologia e outras aplicações.

Figura 7. Mapa de Localização do Sítio Controlado de Geofísica Rasa 2 (IAG-USP).



O SCGR-II é composto por três linhas de alvos de diversos tipos enterrados de forma ordenada (Figura 13a). A Linha 1 é constituída por tambores plásticos e metálicos, tubulações de ferro e manilhas de concreto. A Linha 2 é caracterizada por cabos elétricos não energizados, conduítes de PVC e fibra óptica, visando simular as redes elétricas e telefônicas enterradas no subsolo das cidades. A Linha 3 é caracterizada pelos principais ramais e redes de passagem de gás, água e coleta de esgotos utilizados pelas principais concessionárias de abastecimento da cidade de São Paulo, como COMGAS e SABESP (Figura 13b).

Foi feita uma aquisição sobre a Linha 3 do SCGR-II e o resultado obtido é mostrado na Figura 14. Nota-se que a amplitude das hipérboles referentes aos alvos metálicos é significativamente maior que alvos de cerâmica. Este fato pode ser explicado pela diferença de coeficiente de reflexão que apresentam os alvos desta linha. Considerando que não existe variação lateral significativa nas propriedades do solo ao longo da linha, o cenário entre o solo local e os alvos metálicos apresenta coeficiente de reflexão muito maior do que aquele no cenário com os alvos de cerâmica e PVC.

Uma vez que nos dados reais adquiridos ao longo das vias do projeto, um dos grandes desafios do ponto de vista geofísico é a diferenciação entre tubulações de metal que fazem parte do sistema de distribuição de água e tubulações de cerâmica do sistema de esgoto, as análises considerando dados adquiridos sobre o SCGR-II foram de grande importância para auxiliar na interpretação dos resultados obtidos.

Figura 8 - Sítio Controlado de Geofísica Rasa 2 (IAG-USP). a) Disposição das linhas do SCGR-II. b) Perfil da Linha 3 do SCGR-II com a disposição dos alvos ao longo da linha.

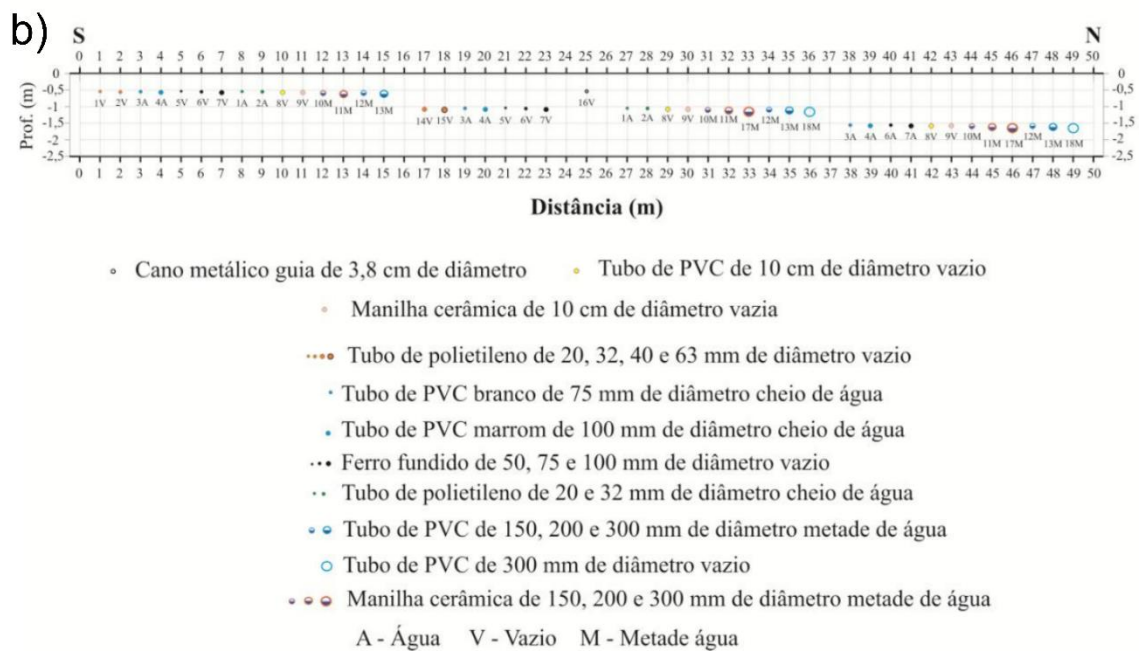
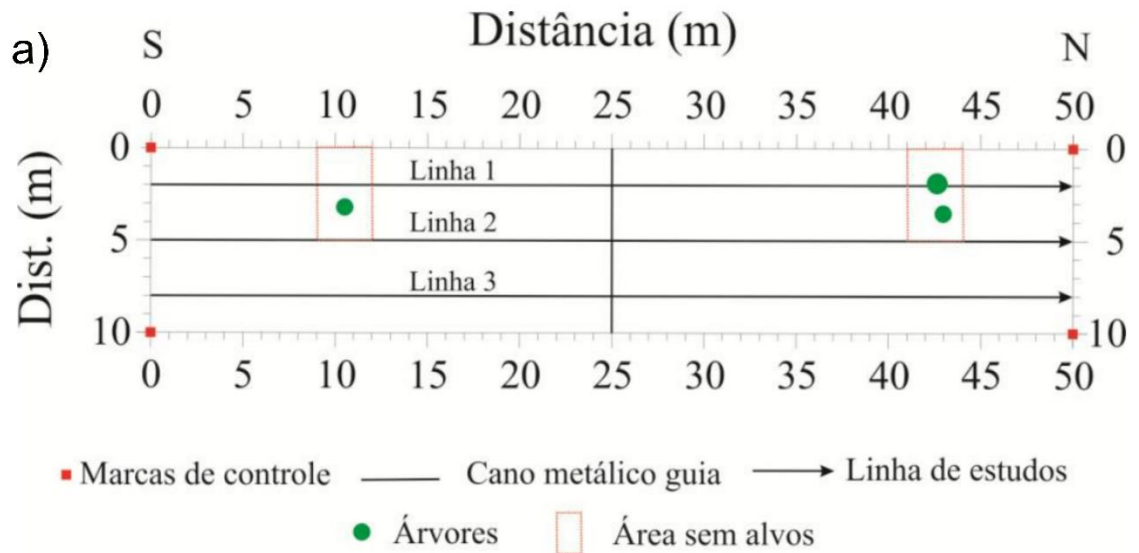
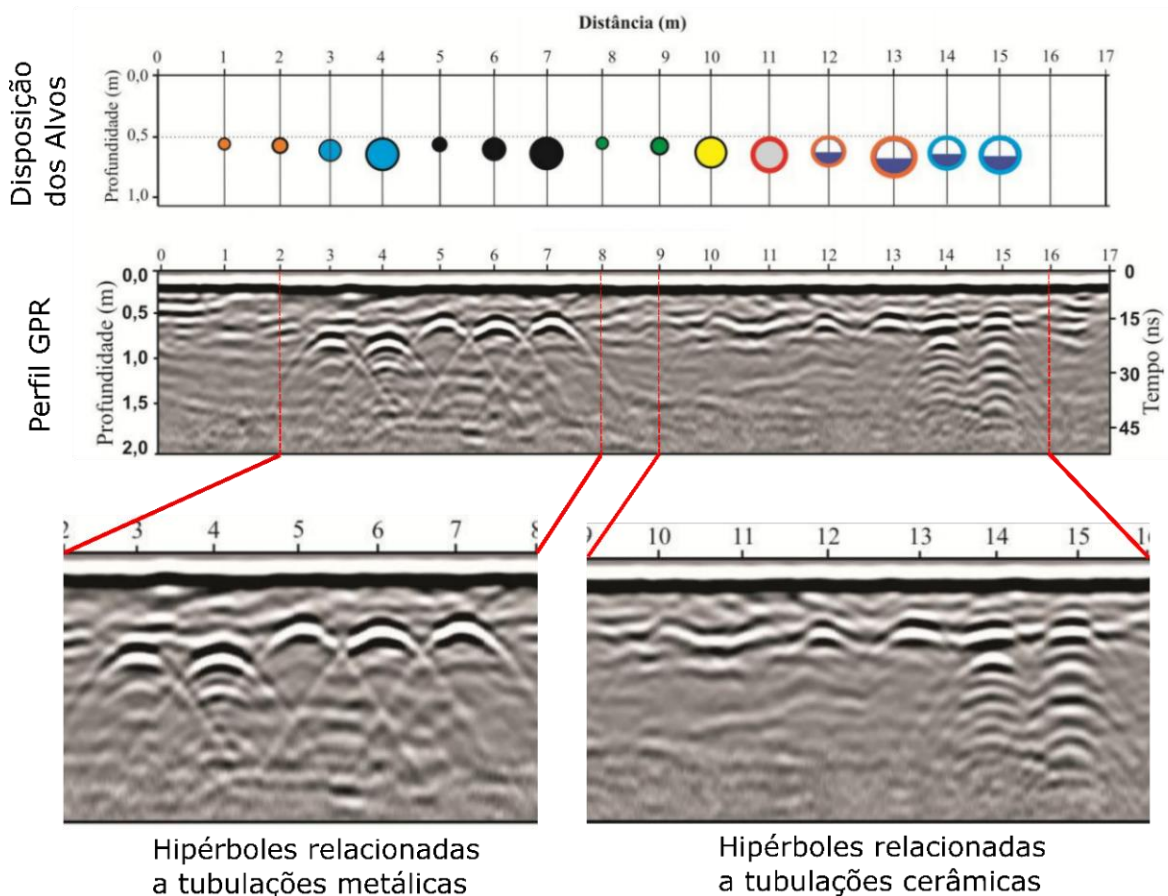


Figura 9 - Resultado da aquisição feita sobre o SCGR-II. Nota-se a maior amplitude das hipérboles relacionadas às tubulações metálicas com relação às hipérboles relacionadas a tubulações de cerâmica.

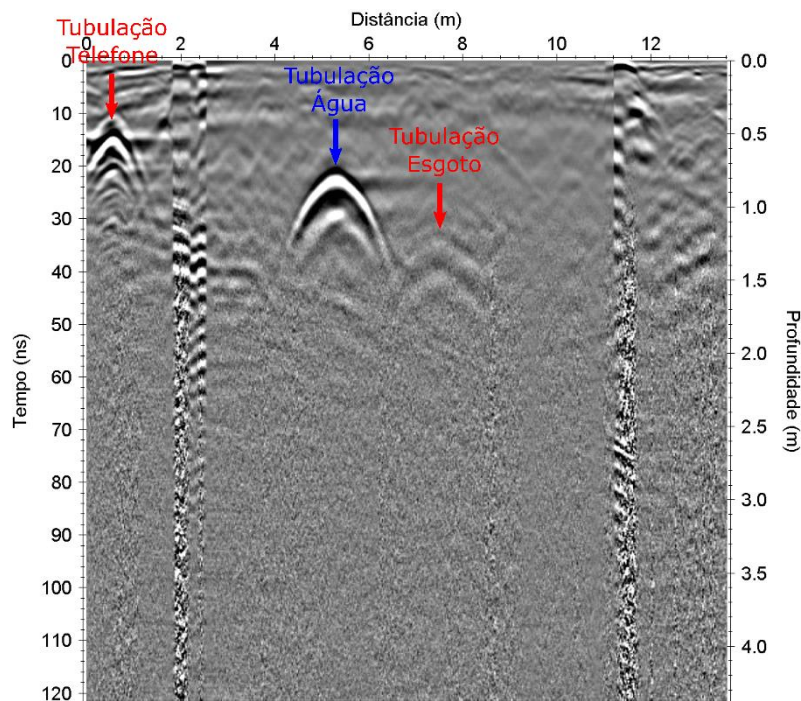
- Legenda de Alvos**
- Tubos de polietileno vazios (diâmetro - 4,0 cm e 6,3 cm)
 - Tubos de PVC preenchidos com água (diâmetro - 7,5 cm e 10 cm)
 - Tubos de ferro fundido (diâmetro - 5,0 cm, 7,5 cm e 10 cm)
 - Tubos de polietileno preenchidos com água (diâmetro - 3,0 cm e 3,2)
 - Tubos de PVC e cerâmica vazios (diâmetro - 10 cm e 10 cm)
 - Manilhas de cerâmica preenchidos parcialmente com água e ar (diâmetro - 15 cm, 20 cm e 30 cm)
 - Tubos de PVC preenchidos parcialmente com água e ar (diâmetro - 15 cm e 20 cm)
 - Tubo de PVC vazio (diâmetro - 30 cm)
 - Cano metálico guia (diâmetro - 3,8 cm)



A Figura 10 mostra a interpretação feita em um dos perfis GPR obtidos ao longo do percurso. Nota-se a presença de três hipérboles, onde a hipérbole mais à esquerda, localizada na calçada, foi interpretada como sendo uma tubulação de distribuição de linha telefônica. A hipérbole mais à direita, apresentando uma menor amplitude, foi interpretada como sendo a tubulação de esgoto (cerâmica). Já a hipérbole de mais alta amplitude, no centro do perfil, foi interpretada como sendo a tubulação metálica de distribuição de água.

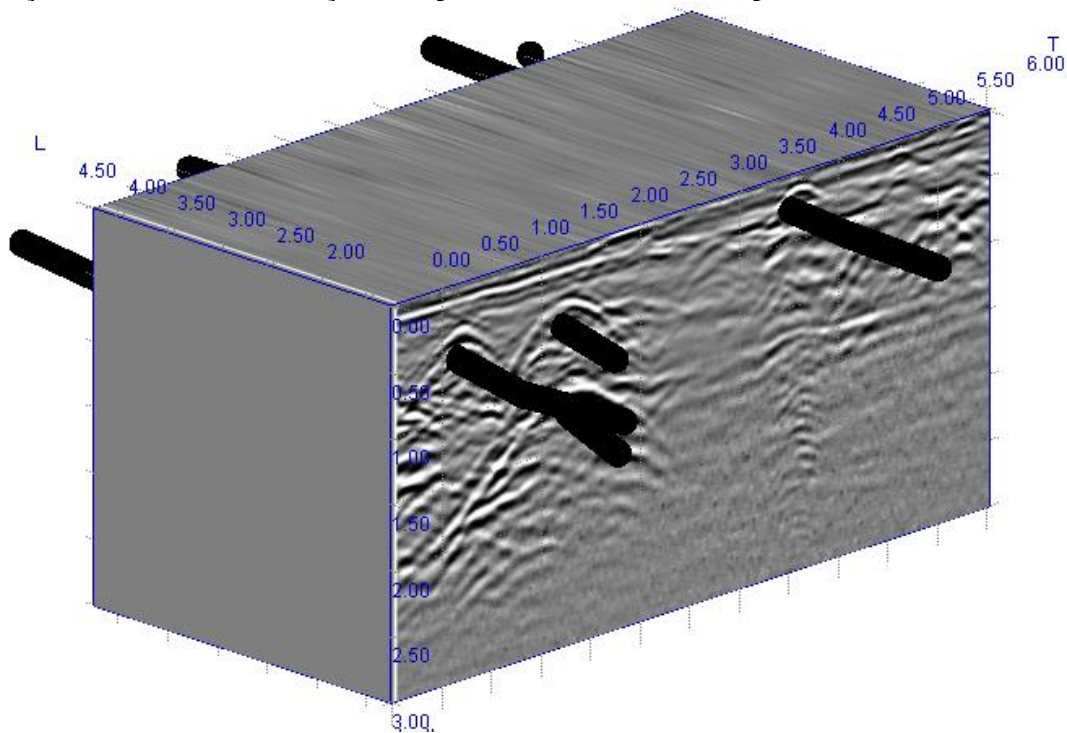
As interpretações com relação ao posicionamento de cabos elétricos e/ou fibra ótica foram, na grande maioria das vezes, confirmadas pela abertura de tampas e caixas. As tubulações de distribuição de água, onde não se observam pontos de acesso, foram interpretadas com (1) auxílio dos perfis da Figura 9, (2) observação direta de pontos estratégicos e (3) comparação com anomalias confirmadas de esgoto, telefone e fibra ótica. Posicionando os perfis paralelos lado a lado e construindo um volume de dados é possível se traçar as tubulações presentes no subsolo pela correspondência de hipérboles (Figura 11).

Figura 10 - Interpretação de um perfil GPR adquirido no local mapeado. As tubulações são marcadas em cada perfil e posteriormente adicionadas na planta final.



Após a interpretação individual de cada perfil GPR, pode-se posicioná-los lado a lado conforme foram adquiridos nas vias. Dessa forma, uma forma interpolada de bloco 3D gerado nos mostra o caminhamento detalhado de cada tubulação localizada. A posição de cada tubulação pode então ser projetada sobre a superfície do terreno gerando uma planta baixa a partir dos dados GPR.

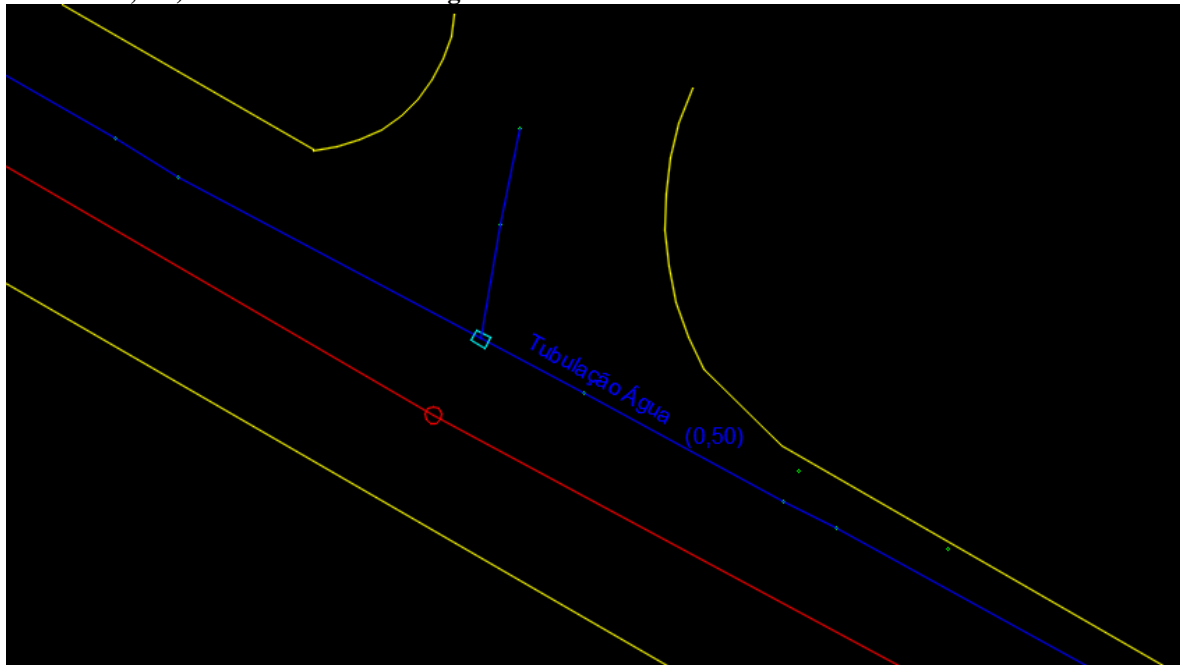
Figura 11 - Interpolação dos perfis GPR paralelos para a identificação e posicionamento das tubulações enterradas. As tubulações são apresentadas como cilindros pretos.



Por fim foram integrados os dados de georreferenciamento gerando a planta georreferenciada do percurso submetida ao mapeamento GPR. A planta apresenta todas as tubulações detectadas e mapeadas pelo GPR,

sendo marcada em azul a tubulação de água (principal interesse do projeto) e em vermelho as outras tubulações (Figura 12). No caso das tubulações de água (em azul) são também apresentadas as profundidades em alguns pontos estratégicos.

Figura 12 - Parte da planta baixa gerada a partir dos dados GPR. Linhas em azul representam as tubulações de distribuição de água. Linha em vermelho representam outras tubulações (esgoto, telefone, fibra ótica, etc). Linha amarela são as guias e outras estruturas da cidade.



DETECÇÃO E MAPEAMENTO DE VAZAMENTOS

Em pontos específicos da cidade existem problemas no fornecimento de água e, com base em um estudo destes locais, uma técnica apropriada de aquisição se fez necessária para a detecção de vazamentos. Um processamento específico e uma interpretação voltada a detecção do vazamento deve ser aplicada para este tipo de aplicação.

No perfil adquirido sobre a tubulação de interesse (Figura 10) é possível ver claramente a posição do topo da tubulação ao longo do perfil (seta azul). Para que algum tipo de vazamento seja localizado ao longo deste trecho, um perfil GPR longitudinal acompanhando a direção da tubulação deve ser adquirido. Para isso se deve percorrer com o equipamento em uma linha imediatamente sobre a posição da tubulação ao longo de toda extensão a ser verificada (Figura 13).

Inicialmente o processo de aquisição necessário exige que a tubulação seja encontrada e marcada no solo ao longo do trecho (Figura 13a). Uma vez marcado o posicionamento da tubulação a ser investigada (Figura 13b), o operador do GPR pode percorrer sobre a tubulação adquirindo os dados ao longo do seu eixo (Figura 13c).

Anomalias características de vazamentos podem ser identificadas quando o processamento adequado é aplicado aos dados (Figura 14). Pode-se identificar claramente a reflexão horizontal associada a presença da tubulação metálica de água (setas vermelhas) quando o perfil é adquirido ao longo do seu eixo.

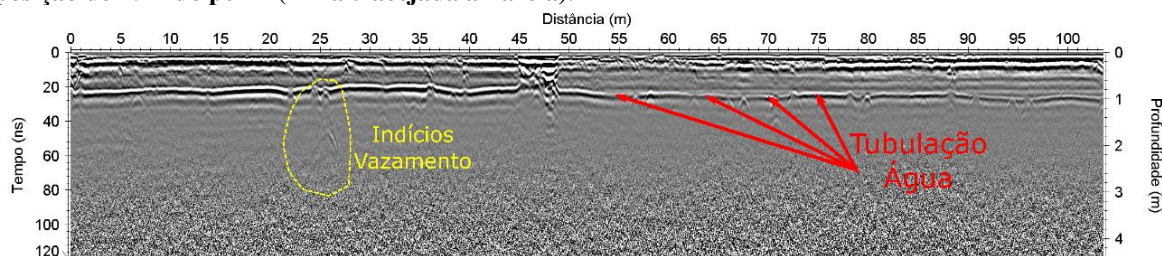
Neste trecho em específico um ponto da tubulação mostrou indícios de um possível vazamento (linha tracejada amarela). Trata-se de uma anomalia de reverberação associada diretamente a reflexão horizontalizada referente à presença da tubulação metálica. Este tipo de anomalia pode ser relacionado à vazamentos de acordo com estudos GPR realizados em solos argilosos como é o caso deste projeto.

Figura 13 - Perfil GPR adquirido ao longo da tubulação de água da Rua São Paulo. Nota-se claramente a posição do topo da tubulação (setas vermelhas). Uma zona com possível vazamento foi identificada na posição de 25m do perfil (linha tracejada amarela).



Aplicando esta metodologia a toda extensão da tubulação localizada nos pontos de interesse, a detecção de vazamentos e suas remediações se tornam possíveis. É importante destacar que a anomalia identificada e associada a um possível vazamento pode representar outras variações do subsolo, evidenciando de forma clara a ambiguidade que os métodos geofísicos indiretos apresentam.

Figura 14 - Perfil GPR adquirido ao longo da tubulação de água da Rua São Paulo. Nota-se claramente a posição do topo da tubulação (setas vermelhas). Uma zona com possível vazamento foi identificada na posição de 25m do perfil (linha tracejada amarela).



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste projeto foi feita a utilização do método GPR para a detecção e mapeamento de tubulações de água e também de possíveis vazamentos. Através de um processo de aquisição adequado e bem detalhado foi possível o mapeamento da rede de água de interesse considerando também a diferenciação, do ponto de vista geofísico, entre esta e outras redes presentes no local de estudo.

Para este processo de análise e da diferenciação e determinação do posicionamento dos materiais enterrados, dados adquiridos em ambiente controlado (SCGR-II) foram analisados em busca de parâmetros que puderam guiar a interpretação. Por fim, a grande quantidade de alvos disponíveis no SCGR-II fez com que fosse possível a diminuição na ambiguidade de interpretação dos dados do projeto.

Através da análise de mapas aéreos sobre informações acerca de problemas no fornecimento de água, foram determinados trechos de possíveis vazamentos. Com a utilização de uma metodologia de aquisição de dados específicas sobre estes trechos foi possível a geração de um perfil passível de ser interpretado em busca de vazamentos. Por fim, anomalias foram indicadas para a verificação direta e confirmação dos possíveis vazamentos indicados.

Com base nos desafios observados neste projeto, recomenda-se (1) o planejamento adequado de um processo de aquisição de dados GPR ponderando entre produtividade e resolução, (2) a utilização de dados de ambientes controlados para embasar a interpretação e (3) a integração de informações diretas disponíveis no local estudado (e.g. observações em pontos de visita e análise de mapa temático).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar – *Principles, procedures & applications. Technical Paper*, Sensors & Software, Inc.
2. BENEDETTO, A., TOSTI, F., CIAMPOLI, L. B., D'AMICO, F. *An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. Signal Processing. ELSEVIER. V132, p201-209, Mar. 2016.*
3. BERTOLLA, L., PORSANI, J.L., SOLDOVIERI, F., CATAPANO, I. *GPR-4D monitoring a controlled LNAPL spill in a masonry tank at USP. Journal of Applied Geophysics, v103, p237-244. 2014.*
4. BICUDO, T. C., SANTOS, V. R. N. Avaliação temporal-espectral de tambores metálicos utilizando o método GPR. 14th International Congress of Geophysics Brazilian Society. 2018.
5. BICUDO, T. C., SANTOS, V. R. N., PORSANI, J. L., TEIXEIRA, F. L. *3D GPR characterization of buried metallic and plastic tanks using time-reversal processing technique. 18th International Conference on Ground Penetrating Radar, Golden, Colorado. 2020.*
6. BICUDO, T. C. Caracterização de contaminação por hidrocarboneto creosoto utilizando os métodos GPR e Eletroresistividade. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo, 2021.
7. BICUDO, T. C. Diameter Estimation of Concrete Rebars Using a Practical GPR Data Processing: A Case Study. 28th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers. v2022, p1-5, Sep. 2022.
8. BORGES, W. R. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Tese de Doutorado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo, 2007.
9. DINH, K., GUCUNSKI, N., DUONG, T. H. Na algorithm for automatic localization and detection of rebars from GPR data of concrete bridge decks. Automation in Construction. ELSEVIER. v89, p292-298, Mar. 2018.
10. GIANNAKIS, I., GIANNOPOULOS, A., WARREN, C. *A machine learning scheme for estimating the diameter of reinforcing bars using ground penetrating radar. IEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v18, p461-465, Mar. 2021.*
11. POLUHA, B. Mapeamento GPR 2D/3D de interferências enterradas no SCGR-II do IAG: Aplicações no planejamento urbano. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo, 2017.
12. PORSANI, J.L., ALMEIDA, E. R., POLUHA, B., SANTOS, V. R. N. GPR tomographic Imaging of concrete tubes and steel/plastic tanks buried in IAG/USP geophysical test site. International Journal of Geosciences (online). v8, p647-658. 2017.
13. RASOL, M., PAIS, J. C., PÉREZ-GRACIA, V., SOLLA, M., FERNANDES, F. M., FONTUL, S., AYALA-CABRERA, D., SCHMIDT, F., ASSADOLLI, H. *GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights. Constructions and Building Materials. V.324, Mar. 2022.*

14. SANTOS, V. R. N. Detecção e classificação automática de interferências do subsolo com GPR utilizando Rede Neurais Artificiais: estudo no SCGR do IAG/USP. Tese de Doutorado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo, 2014.