

AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DOS MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS NAS INVESTIGAÇÕES SUB-SUPERFICIAIS

Maria Teresa Françoso (UNICAMP) E-mail: mteresaf@unicamp.br

Felipe Farina (UNICAMP) E-mail: felipe.fariana.90@gmail.com

Heloisa Moraes Treiber (UNICAMP) E-mail: h140435@dac.unicamp.br

Resumo: Uma extensa gama de utilitários públicos está enterrada sob a superfície das cidades fornecendo serviços essenciais para o dia a dia das pessoas, serviços como a distribuição de água potável, gás natural, eletricidade, telecomunicações, coleta de esgoto e etc... Em comparação com alvos visíveis de infraestrutura acima do solo, como pontes, estradas e edifícios que não necessitam de intervenções para o seu cadastramento, a existência e a localização das tubulações urbanas enterradas permanecem um mistério em praticamente todas as cidades, dada a dificuldade em cadastrá-las. A importância do seu cadastramento não seria óbvia, até que os perigos e problemas surjam, como uma explosão de gás devido a uma escavação sem o conhecimento prévio da rede ou o colapso de projetos concebidos sobre utilitários existentes que necessitam serem refeitos ou cancelados. De forma a localizar estes elementos sem a necessidade de escavações, estão sendo usados os métodos geofísicos, entre eles o georadar que se apresenta como uma ferramenta não invasiva e não destrutiva que tem sido bem-sucedida nessas aplicações. Neste cenário o objetivo deste artigo foi explorar as técnicas de obtenção de dados do subsolo utilizando um georadar com um dispositivo de navegação GNSS acoplado, comparando os resultados com um método tradicional de georreferenciamento por estação total.

Palavras-chave: Georadar, cadastro, Métodos de investigação.

EVALUATION OF THE ACCURACY OF NON-DESTRUCTIVE METHODS IN SUBSOIL INVESTIGATION

Abstract: A wide range of public services is buried under the surface of cities providing essential services for people's daily life, services such as the distribution of drinking water, natural gas, electricity, telecommunications, sewage collection... Visible targets of surface infrastructure, such as bridges, roads and buildings that do not require interventions for their registration, the existence and location of buried urban pipes remains a mystery in practically all cities, given the difficulty in registering them. The importance of registering it would not be obvious until dangers and problems arise, such as a gas explosion due to excavation without prior knowledge of the network or the collapse of projects conceived on existing services that need to be redone or cancelled. To locate these elements without the need for excavations, geophysical methods are being used, including georadar, which is presented as a non-invasive and non-destructive tool that has been successful in these applications. In this scenario, the objective of this article was to explore the techniques to obtain underground data using a georadar with an attached GNSS navigation device, comparing the results with a traditional total station georeferencing method.

Keywords: Georadar, cadastre, research methods.

1. Introdução

A rede subterrânea de serviços que abastecem as cidades apesar de complexa, é muitas vezes ignorada, passando-se despercebida diante a sua “invisibilidade” na superfície das cidades. São muitos, os casos de não terem sido cadastradas durante a sua execução e acabarem tendo sua localização esquecida, acarretando em lembranças somente quando ocorre algum acidente ou através do desabastecimento de algum serviço.

A complexidade das redes de utilidade subterrâneas deriva dos vários tipos de serviços públicos fornecidos, dos materiais a que foram entregues, das suas interconexões, suas diferentes idades e etc... As diferentes linhas de serviços incluem tubulações de água, esgoto e drenagem, cabos de eletricidade, cabos de telecomunicações e fibra ótica (que são particularmente caros e difíceis de consertar) além de cabos de iluminação pública.

Outra consideração importante é que cada concessionária possui a responsabilidade pela entrega e a manutenção do serviço, o que torna ainda mais difícil o cadastro completo em subsuperfície, pois não há operações bem definidas quanto a profundidade, o distanciamento entre as redes, o espaço para futuras manutenções, ocasionando em uma teia de elementos misturados.

Os Métodos tradicionais de cadastramento georreferenciado por estações totais, exigem o contato com as redes, sendo assim, o ideal é que as mesmas sejam cadastradas durante a realização do serviço, pois as valas ainda estão acessíveis. Quando o cadastramento precisa ser realizado com as redes prontas, exigirá escavações. Neste cenário, a tarefa de localizar infraestrutura enterrada na ausência de mapas abrangentes e precisos é altamente problemática por duas questões: A primeira é que durante as escavações podem ocorrer acidentes, rompimentos e danos aos utilitários existentes e a segunda é que demanda muito tempo de trabalho escavar valas às cegas afim de identificar a rede.

O georadar provou sua capacidade de atuar como uma poderosa ferramenta geofísica não destrutiva para investigações em subsuperfície, pois tem a capacidade de transmitir sinais de ondas de rádio para uma estrutura e identificar ecos de mudanças nas propriedades dos materiais dentro dela, gerando uma imagem interna da estrutura apenas por meio de varreduras em superfície.(PLATI; DÉROBERT, 2015)

Neste sentido, as imagens obtidas são como uma espécie de raio x ou ressonância magnética da estrutura afim de avaliar e identificar os elementos incluídos nela e assim, realizar intervenções mais certas.

Entretanto, para fins de cadastramentos multifacetado, visando um sistema de registros elementares que represente a subestrutura das cidades, é necessário que o georadar seja equipado com algum dispositivo de navegação.

Assim, com o objetivo prático de avaliar a precisão entre um método invasivo e outro não invasivo aplicados a um cadastramento de redes subterrâneas, realizou-se a locação georreferenciada de 2 redes de PVC recém construídas, por meio de Estação total, durante a execução das obras, comparando-as posteriormente com dados obtidos por uma varredura superficial por meio de um Georadar equipado com dispositivo de navegação GNSS, cujos dados apresentaram diferenças nas coordenadas x e y, mas uma grande precisão na cota z.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Rua Saturnino de Brito, em obra existente ao lado do Laboratório de Solos Luiz Eduardo Meyer, da Faculdade de Engenharia Civil – Unicamp. Optou-se por esta região, pois estavam sendo implantadas novas redes de água de consumo e fibra ótica, ambas de PVC mas com diâmetros de 100mm e 50mm respectivamente em duas profundidades distintas. Assim, foi possível realizar um levantamento planialtimétrico das redes antes do fechamento das valas. Na figura 1 é possível observar o mapa com a localização da área em estudo.



Figura 1 – Mapa de localização da área em estudo. Fonte: (AUTORES, 2022)

2.2 Aquisição dos dados pela estação total

Uma estação total combina 3 elementos básicos, um MED, um teodolito eletrônico e um microprocessador, formando um equipamento único. Elas são capazes de medir automaticamente ângulos horizontais e verticais, além de distâncias inclinadas, calculando instantaneamente também as correspondentes distâncias horizontais e verticais, apresentando-as no visor de cristal líquido do aparelho (SOUZA, 2001)

Os programas internos das estações possibilitaram uma alta produtividade nos trabalhos de campo e facilitam o manuseio dos dados, pois não necessitam mais de caderneta de campo com anotações manuais dos dados, o que se constituía uma fonte de erros grosseiros e fadiga do operador.

Existem alguns métodos de execuções práticos que permitem ao usuário realizar alguns tipos de cálculos diretamente em campo:

- Estação livre: as coordenadas planialtimétricas de um ponto ocupado podem ser calculadas em função de no mínimo 2 outros pontos com coordenadas conhecidas;
- Estação conhecida: a estação é inicializada em um determinado sistema de referência diretamente no campo através da medida de um ponto de ré ou pela orientação por azimute dado;
- Cálculo de áreas: calcula a área a partir dos pontos levantados no campo ou armazenados na memória do equipamento.

Há ainda outras funções disponíveis como: determinação de elevações remotas, medição de pontos deslocados, coordenadas, locação (SOUZA, 2001)

No trabalho específico, o método utilizado foi o de estação livre, implantando-se uma poligonal de apoio de três lados a partir de uma linha de base constituída por 2 marcos de concreto com coordenadas conhecidas que fazem parte da rede de referência cadastral da Unicamp.

A aquisição de dados por meio da estação total ocorreu em 3 etapas.

Na primeira etapa, georreferenciou-se a rede de água preliminarmente instalada e mais profunda, realizando-se 6 leituras na geratriz superior do tubo ao longo de seu

comprimento.

Na segunda etapa, georreferenciou-se a rede de fibra ótica, instalada após o reaterro da rede anterior. Nesta etapa, foram realizadas mais 8 leituras na geratriz superior do tubo ao longo de seu comprimento.

Na terceira e última etapa, realizou-se os levantamentos em superfície com a vala já totalmente aterrada para fins de identificação das profundidades.

Com os dados obtidos em campo, foi possível realizar o desenho do traçado da rede conferido na figura 2.



Figura 2 – Identificação dos pontos coletados (em “Cyan rede de água e em Rosa rede de fibra ótica).
Fonte: (AUTORES, 2022)

2.3 Georadar com dispositivo de navegação integrado

2.3.1 fundamentação teórica

O princípio de funcionamento do georadar é baseado na transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas com frequências entre (10 MHz – 2,6 GHz) essas ondas são emitidas na forma de pulsos por uma antena transmissora, se propagam em subsuperfície e sofrem reflexão ao entrarem em contato com algum contraste de propriedades elétricas (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética) em relação ao solo ou ao meio a que se encontram. (WAI-LOK LAI et al. 2018)

As ondas refletidas são recebidas por uma antena receptora (Figura 3a). Ambas as antenas são posicionadas sobre a superfície e caminham ao longo de perfis. Os sinais refletidos são armazenados em um computador e apresentados em tempo real na forma de radargramas, que consistem em uma série espacial de traços - scans (Figura 3b) com as informações de reflexão da onda refletida em subsuperfície.

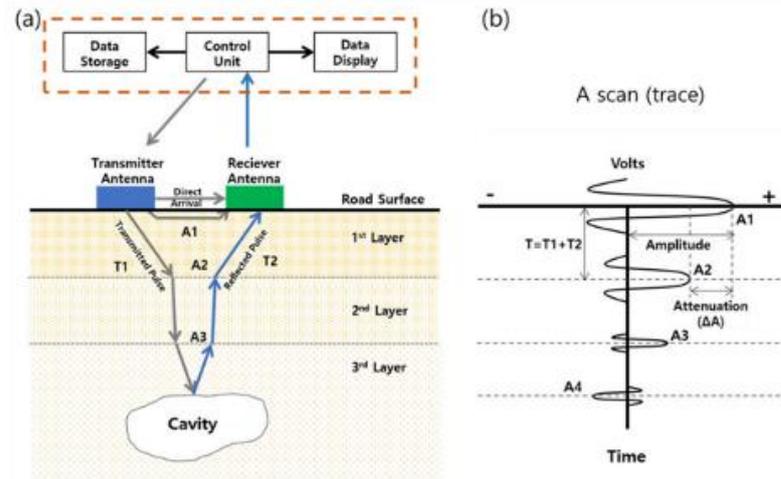


Figura 3 – Ilustração da varredura com o Georadar em uma superfície a) possível caminho das ondas, b) um traço de um radargrama. Fonte: (RHEE et al. 2021)

Embora parte da energia do pulso seja refletida de volta para a antena, o pulso continua a penetrar no meio até que se dissipe, atenua ou que a unidade de controle do GPR tenha fechado sua janela de tempo. A razão de atenuação do sinal varia muito e depende das propriedades do material sendo atravessado pelo pulso. Materiais de alta permissibilidade dielétrica freiam a onda de radar, que não consegue uma penetração profunda. Materiais de alta condutividade atenuam rapidamente o sinal. (AYALA–CABRERA et al. 2013).

Em rochas e sedimentos, as propriedades dielétricas são determinadas primeiramente em função da sua mineralogia, porosidade, saturação hidráulica, frequência e, dependendo da rocha, geometria e interações eletroquímicas.

No entanto, como acontece com todas as investigações não invasivas, o método possui limitações, por exemplo, a penetração das ondas depende do tipo de solo e o tipo de antena. A umidade também influencia na permissividade elétrica do solo devido ao momento dipolar da molécula de água, alterando a constante dielétrica do meio. Assim, o sinal emitido pela antena apresenta uma velocidade reduzida, diminuindo o desempenho do aparelho e falsificando o resultado obtido. (AYALA–CABRERA et al. 2013)

Antenas de alta frequência, na ordem de 1 a 2 GHz, produzem melhores resoluções (ou seja, pode-se encontrar pequenos objetos com maior facilidade), mas só pode alcançar uma pequena penetração, por volta de um metro. No entanto, antenas de baixa frequência, na ordem de 10 a 200 MHz, podem conseguir uma penetração de dezenas de metros, dependendo das condições do solo, porém podem não ser capazes de localizar objetos pequenos ou tubos de pequeno diâmetro. (LANE et al., 2000).

Utilitários subterrâneos cilíndricos como no caso de tubos, são tipicamente reconhecidos como hipérbolos em varreduras GPR por dois motivos. Primeiro, a pegada do GPR é um cone elíptico com seu ápice localizado no centro da antena permitindo que o GPR detecte um objeto em direções oblíquas. Em segundo lugar, o tempo bidirecional, isto é, o período de tempo para a onda eletromagnética (EM) viajar da antena transmissora para o objeto e de volta para a antena receptora, é registrado pelo GPR e plotado em varreduras de radar diretamente abaixo de onde a antena mede o sinal. Assim, à medida que a antena GPR se move em direção e, em seguida, afasta-se

do utilitário enterrado, as reflexões formam uma hipérbole na varredura do radar. O ápice da hipérbole denota a localização real do utilitário enterrado. Na figura 4 é possível verificar uma ilustração para melhor entendimento.

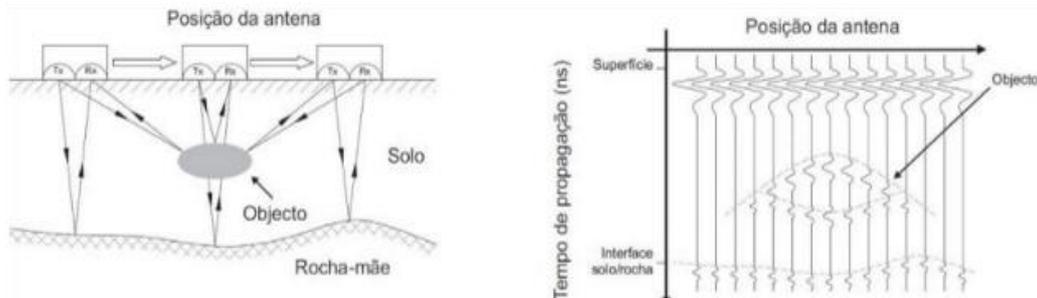


Figura 4 – Hipérbole característica obtida em varredura de utilitários subterrâneos.
 Fonte: (SINERGEO, 2018)

Para levantamentos que necessitem de informações quanto a posicionamento geográfico, o georadar exige que seja equipado com algum dispositivo de navegação.

2.3.2 Aquisição dos dados

Antes de iniciar a varredura com o equipamento é necessário definir alguns parâmetros iniciais de configuração do aparelho para aquisição de dados mais precisos, entre eles estão a permissividade dielétrica do meio (k), o raio da pegada do equipamento (A) e a resolução horizontal ΔX . (ANNAN, 1992)

A permissividade dielétrica refere-se a uma propriedade física do solo e das condições ambientais no momento em que a pesquisa é realizada. Ela deve ser adequadamente configurada durante a coleta de dados para obter resultados precisos.

Na literatura encontra-se 2 formas de obter o k, uma é por meio de tabelas e a outra é por meio de cálculo. Na tabela 1, pode-se verificar valores aproximados para diferentes meios.

Tabela 1 – Propriedade elétricas de alguns materiais

Material	Permissividade dielétrica	Condutividade elétrica
Ar	1	0
Água doce	81	0,5
Água salgada	81	3000
Solo argiloso saturado	10 - 30	0,001 – 1
Solo arenoso saturado	10 - 30	0,01 – 0,1
Granito	4 - 6	0,01 – 1
Basalto	8	0,01
Ferro	1	10^9
PVC	3 - 4	0
Concreto seco	4 - 10	0,001 – 0,01
Cerâmica	8	0

Fonte: (BORGES, 2007)

Este método acaba não sendo tão preciso, pois depende de algumas variações no grau de saturação do meio, assim, o ideal é que o valor da permissividade dielétrica seja encontrado em campo.

O método utilizado para determinar a permissividade dielétrica descrito por Cezar et al. (2012) consiste em enterrar um alvo com dimensões e características conhecidas a uma determinada profundidade e deslocar a antena de radar diretamente sobre a área do alvo. Utilizando o tempo como medida na varredura é possível realizar o cálculo da constante dielétrica pelas equações:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

$$v = \frac{2h}{t} \quad (2)$$

Com a profundidade (h) conhecida e o tempo (t) obtido em campo é possível determinar a velocidade da onda no local (v), este valor dividido pela velocidade da onda no vácuo (c) obtém-se a constante dielétrica do meio em questão. Neste trabalho, foi utilizada a própria rede enterrada como alvo a partir das profundidades obtidas nos levantamentos topográficos com a Estação Total, obtendo-se ao final dos processos matemáticos:

$k = 10,84$. Valor compatível com o encontrado na literatura para solos argilosos.

O próximo parâmetro a ser definido é a raio da “pegada” da antena, este parâmetro define a área de incidência da superfície refletora, ou seja, se o tamanho dos alvos em subsuperfície são suficientes para serem identificados pelos pulsos das antenas transmitidos em superfície. Ele é obtido pelas seguintes equações:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{(k+1)}} \quad (4)$$

$$B = 2 \times A \quad (5)$$

A velocidade da onda no meio (v) é dividida pela frequência da antena a ser utilizada no levantamento (f), esta divisão fornecerá o comprimento da onda (λ). Este valor inserido na Eq. (4) obtém-se e o raio da pegada conforme ilustrado na figura 5.

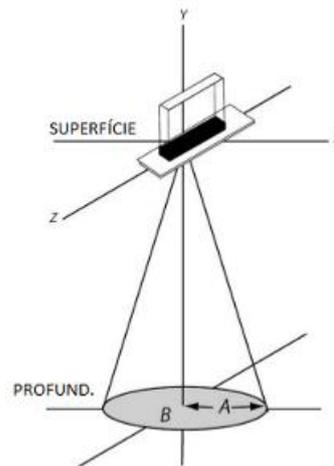


Figura 5 – Raio da “pegada” da antena em subsuperfície. Fonte: (YALCINER et al. 2007)

Neste trabalho utilizou-se uma antena blindada GSSI de 900 MHz, valor que quando aplicado as equações anteriores obtém-se: $A = 0,26$ m (sentido do diâmetro dos tubos) e $B = 0,52$ m (sentido do comprimento do tubo). Como os tubos possuem diâmetros de 0,10 e 0,050 m respectivamente e comprimento maiores que 10 metros, são alvos possíveis de serem captados e identificados pelo georadar. (AGUIAR, 2005)

Por fim, é necessário configurar a resolução horizontal do equipamento, este parâmetro se refere a capacidade do equipamento em diferir sinais que têm origem em alvos situados um ao lado do outro. Se esta configuração estiver errada, o equipamento poderá entender que as 2 redes existentes serão apenas 1, com diâmetro maior. Este parâmetro é obtido pela seguinte equação:

$$\Delta X = \frac{c}{4 \times f \sqrt{k}} \quad (6)$$

Todos os dados já possuímos, aplicando-os a Eq. (6), obtém-se: $\Delta X = 0,02$ m. Como os valores reais de campo são maiores do que os obtidos nos cálculos (distância entre as redes 0,50 m e comprimento do tubo maior que 10 metros, o Georadar será capaz de fornecer informações válidas.

Com os parâmetros já definidos, iniciaram-se as varreduras no sentido transversal ao caminhamento dos tubos, foram realizadas 5 seções ao longo do trecho afim de obter a localização e as profundidades das respectivas redes, pelo método da perfilagem contínua, com arranjo monoestático, ou seja, a mesma antena, de 900 MHz, possui a finalidade de transmissão e recepção das ondas eletromagnéticas. (SANTOS, 2017)

Na figura 6 é possível verificar 1 radargrama do local já com as velocidades da onda migradas para profundidade através do software Reflexw, utilizado para processamento dos radargramas.

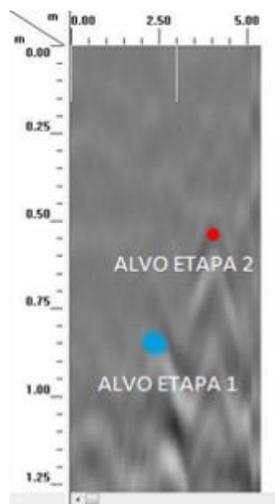


Figura 6 – Radargrama obtido no local de estudo. Fonte: (AUTORES, 2022)

Buscando-se identificar a posição geográfica das redes, equipou-se o georadar com um receptor de sinal GPS Garmim com capacidade de se conectar a uma antena GNSS, com esta capacidade a precisão do equipamento sobe de 5 metros para menos de 1 metro. Para fins de um cadastro georreferenciamento é uma precisão ruim, porém, dadas as condições climáticas favoráveis na data do levantamento e da posição geográfica do local, livre de árvores próximas entendíamos que os valores apresentados poderiam atingir poucas diferenças em comparação aos da estação total. Dada a precisão do equipamento de navegação utilizado (submétrica), bem como a limitação de espaço, optou-se por relacionar as coordenadas (norte e leste) a um ponto médio entre as redes da 1ª e 2ª etapa em. Os valores adquiridos foram comparados com os encontrados pelo GNSS-Georadar nas mesmas condições, os quais foram convertidos de latitude e longitude para UTM pelo programa progrid disponibilizado pelo IBGE.

3. Resultados e discussões

Na tabela 2 é possível verificar uma comparação entre as coordenadas Leste obtidas pela estação total e pelas antenas GNSS. Desconsideramos as coordenadas Norte pois referem-se ao eixo longitudinal da rede.

Tabela 2 – Coordenadas UTM Estação total e GNSS

Pontos	Leste (estação total) mts	Leste (GNSS) mts	Diferença em metros (E)
01	288306,20	288307,43	1,23
02	288306,04	288307,62	1,58
03	288305,90	288307,18	1,28
04	288305,30	288307,18	1,88
05	288304,81	288306,85	2,04
06	288304,66	288306,20	1,54
07	288303,69	288304,97	1,28
08	288303,47	288303,72	0,25
09	288302,60	288302,91	0,31

Fonte: Autores (2022)

Os valores apresentados foram bem variáveis, mas em média apresentaram-se compatíveis com a precisão do equipamento, entretanto para um cadastro georreferenciado não podem ser aceitos pois possuem diferenças muito altas. Na figura 7 é possível verificar o caminhamento realizado pelo equipamento e o caminhamento traçado com os valores das coordenadas obtidas pelo GNSS.

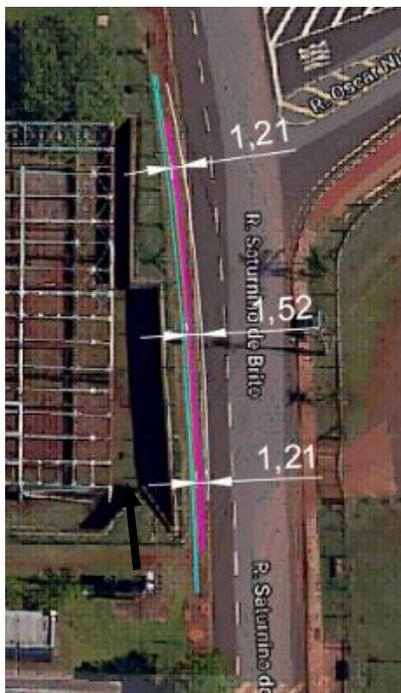


Figura 7 – Diferença de distancias do caminhamento do equipamento e das coordenadas obtidas pela antena GNSS. Fonte: (AUTORES, 2022)

Quanto a obtenção das profundidades o Georadar mostrou-se um excelente aliado, apresentando resultados muito próximos aos obtidos com a estação total.

Tabela 3 – Profundidades obtidas por meio da Estação total e o Georadar

Material	Altimetria – Estação total	Altimetria - Superfície	Profundidade (metros)	Altimetria (mts) (Georadar)	Diferença (mts)
Etapa 01 - A	612,23	613,21	0,98	1,00	0,02
Etapa 01 – B	612,29	613,27	0,98	0,9	0,08
Etapa 01 – C	612,62	613,36	0,74	0,9	0,16
Etapa 01 - D	612,61	613,43	0,82	0,9	0,08
Etapa 01 - E	612,61	613,46	0,85	0,8	0,05
Etapa 02 - A	612,72	613,21	0,49	0,5	0,01
Etapa 02 - B	612,73	613,57	0,84	0,7	0,14
Etapa 02 - C	612,70	613,46	0,76	0,5	0,26
Etapa 02 - D	612,87	613,43	0,56	0,5	0,06
Etapa 02 – E	613,03	613,46	0,43	0,5	0,07

Fonte: Autores (2022)

4. Conclusão

Este trabalho analisou a capacidade de investigação e georreferenciamento de um georadar equipado com um dispositivo de navegação acoplado para a identificação de 2 redes de PVC subterrâneas recém construídas. Por meio de comparações práticas, os dados obtidos pelo Georadar foram comparados com outros obtidos por meio de estação total conseguidos durante a realização da obra. As respostas obtidas nos levantamentos com o Georadar, demonstraram diferentes situações, enquanto as profundidades obtidas pelo georadar se mostraram fiéis a execução de campo, as coordenadas Norte e leste obtidas pelo dispositivo de navegação obtiveram diferenças consideráveis, o que já era esperado devido ao nível de precisão do equipamento de navegação utilizado.

Portanto, como contribuição do artigo, verifica-se que o georadar pode e deve ser utilizado em situações práticas de campo, dada sua versatilidade e rapidez, como a verificação de interferências em subsuperfície ou localização de alvos existentes, porém, para utilizá-lo com fins de cadastramento georreferenciado, seria necessário outros estudos como a utilização de antenas GNSS com precisões milimétricas, que atualmente são comercializadas com elevados valores.

Referências

- AGUIAR, J. C. M. RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análise em pavimento flexível.** , p. 146, 2005.
- ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications.** , p. 286, 1992.
- AYALA-CABRERA, D.; HERRERA, M.; IZQUIERDO, J.; OCAÑA-LEVARIO, S. J.; PÉREZ-GARCÍA, R. GPR-Based Water Leak Models in Water Distribution Systems.** Sensors, v. 13, n. 12, p. 15912–15936, 2013. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- BORGES, W. R. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP,** 29. jun. 2007. Doutorado em Geofísica, São Paulo: Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14132/tde-28102007-133400/>>. Acesso em: 16/1/2022.
- CEZAR, E.; NANNI, M. R.; CHICATI, M. L.; OLIVEIRA, R. B. Emprego de GPR no estudo de solos e sua correlação com métodos laboratoriais.** Semina: Ciências Agrárias, v. 33, n. 3, p. 979–988, 2012.
- GRUBER, T.; WILLBERG, M. Signal and error assessment of GOCE-based high resolution gravity field models.** Journal of Geodetic Science, v. 9, n. 1, p. 71–86, 2019.
- PLATI, C.; DÉROBERT, X. Inspection Procedures for Effective GPR Sensing and Mapping of Underground Utilities and Voids, with a Focus to Urban Areas.** In: A. Benedetto; L. Pajewski (Orgs.); Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. p.125–145, 2015. Cham: Springer International Publishing. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0_5>. Acesso em: 16/1/2022.
- RHEE, J.-Y.; PARK, K.-T.; CHO, J.-W.; LEE, S.-Y. A Study of the Application and the Limitations of GPR Investigation on Underground Survey of the Korean Expressways.** Remote Sensing, v. 13, n. 9, p. 1805, 2021. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- SANTOS, M. Uso do georadar (gpr) na detecção das redes subterrâneas de abastecimento de água para cadastro georreferenciado resumo abstract - PDF Free Download.** Disponível em: <<https://docplayer.com.br/79023412-Uso-do-georadar-gpr-na-deteccao-das-redes-subterraneas-de-abastecimento-de-agua-para-cadastro-georreferenciado-resumo-abstract.html>>. Acesso em: 16/1/2022.
- SINERGEO. O uso do georadar como ferramenta geofísica não destrutiva.** Sinergéo Geologia, Hidrogeologia e Ambiente Lda, 17. ago. 2018. Disponível em: <<http://www.sinergéo.pt/o-uso-do-georadar-como-ferramenta-geofisica-nao-destrutiva/>>. Acesso em: 16/1/2022.

SOUZA, G. C. DE. *Análise de metodologias no levantamento de dados espaciais para cadastro urbano.*, 16. mar. 2001. Mestrado em Transportes, São Carlos: Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-11022003-164819/>>. Acesso em: 16/1/2022.

WAI-LOK LAI, W.; DÉROBERT, X.; ANNAN, P. *A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis.* NDT & E International, v. 96, p. 58–78, 2018.

YALCINER, C. C.; BANO, M.; ALTUNEL, E.; KADIOGLU, M. *Ground-Penetrating Radar Investigation of the Nysa (W Turkey) Archaeological Site – Preliminary Results.* , 2007.