UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UTILIZAÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES NO PARQUE CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO DA UNB (PCTEC)

CLEBER BORGES ALVES

ORIENTADORA: CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO
COORIENTADOR: LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA

PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UTILIZAÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES NO PARQUE CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO DA UNB (PCTEC)

CLEBER BORGES ALVES

TRABALHO DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADO POR:

_____
CLÁUDIA MARCIA C. GURJÃO, Dra (UnB)
ORIENTADORA

_____
LEONARDO DA S. P. INOJOSA, Dr (UnB)
COORIENTADOR

_____
CLÁUDIO HENRIQUE DE A. F. PEREIRA, Dr (UnB)
EXAMINADOR INTERNO

_____
ERICA MITIE UMAKOSKI KUNIOCHIE, Dra (UnB)
EXAMINADOR EXTERNO

BRASÍLIA/DF, 25 de JULHO de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

ALVES, CLEBER

UTILIZAÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES NO PARQUE CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO DA UNB (PCTEC). Distrito Federal, 2023.

vii, 61 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2023).
Trabalho de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.GPR	2. Perfis
3. Encamamento	4. Retrofit
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, CBA. (2023). UTILIZAÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES NO PARQUE CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO DA UNB (PCTEC). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 55 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cleber Borges Alves
TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL: UTILIZAÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) PARA LOCALIZAÇÃO DE TUBULAÇÕES NO PARQUE CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO DA UNB (PCTEC)
GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2023.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Cleber Borges Alves
CCSW 04, Bloco B, Sudoeste/DF
CEP: 71000-000 – Brasília/DF – Brasil.

RESUMO

O *retrofit* é uma abordagem que visa a remodelação ou atualização do edifício através da incorporação de novas tecnologias, levando em conta as necessidades atuais dos usuários. Um problema recorrente na aplicação desta técnica é a ausência das plantas referentes aos projetos de instalações hidrossanitárias, assim como ocorre no prédio do Parque Científico e Tecnológico da UnB – PCTec. Nesse sentido, esse estudo tem como objetivo a utilização do método geofísico conhecido como Radar de Penetração do Solo (GPR) para obter informações referentes às tubulações presentes na área externa do edifício. Para isso, foi elaborado um programa experimental que consistiu na realização de perfis GPR e inspeções visuais, onde foram realizados 6 perfis com o equipamento, sendo quatro deles no espaço gramado do prédio, um no piso e outra na parede de um banheiro. Foram identificadas várias hipérboles nos perfis realizados na área verde, porém em ambos feitos no banheiro não foi possível identificar assinaturas que pudessem ser causadas por tubulações. Em seguida, foi realizado um mapeamento visual das instalações prediais onde foram aferidos, com o auxílio de uma bússola, os azimutes dos canos que estavam aparentes nas caixas de inspeção. Por fim, foram realizados 19 perfis paralelos no solo, sendo possível estimar a localização de algumas tubulações, de forma que a continuidade dessas assinaturas em diferentes perfis, juntamente com as direções aproximadas obtidas por meio da inspeção visual, sugere que os condutos estão localizados nos pontos marcados no croqui gerado no software *Qgis*. Não foi possível a aferição dos diâmetros dos elementos devido à limitação da detecção apenas das reflexões superiores dos elementos. Isso pode ser atribuído ao fato de as tubulações estarem vazias ou preenchidas por fios, o que limitou a obtenção de informações detalhadas sobre a parte inferior dos tubos. Interferências causadas em decorrência da presença de vergalhões em áreas pavimentadas impossibilitaram a identificação de tubulações nessas áreas. Condutos que apresentam direção paralela aos perfis não forma identificados, sendo interessante a realização de perfis em outras direções afim de identificar todos os elementos de interesse.

Palavras-chave: GPR, hipérboles, perfis, *retrofit*, tubulações.

ABSTRACT

Retrofit is an approach aimed at remodeling or updating the building through the incorporation of new technologies, taking into account the current needs of users. A recurrent problem in the application of this technique is the absence of blueprints referring to the hydrosanitary installations projects, as it happens in the building of the Scientific and Technological Park of UnB – PCTec. In this sense, this study aims to use the geophysical method known as Ground Penetration Radar (GPR) to obtain information regarding the pipes present in the external area of the building. For this, an experimental program was elaborated that consisted of carrying out GPR profiles and visual inspections, where 6 profiles were carried out with the equipment, four of them in the grassy space of the building, one on the floor and another on the wall of a bathroom. Several hyperbolas were identified in the profiles made in the green area, but in both made in the bathroom it was not possible to identify signatures that could be caused by pipes. Then, a visual mapping of the building installations was carried out where the azimuths of the pipes that were apparent in the inspection boxes were measured with the aid of a compass. Finally, 19 parallel profiles were made on the ground, making it possible to estimate the location of some pipes, so that the continuity of these signatures in different profiles, together with the approximate directions obtained through visual inspection, suggests that the conduits are located in the points marked on the sketch generated in the Qgis software. It was not possible to measure the diameters of the elements due to the limitation of detecting only the superior reflections of the elements. This can be attributed to the fact that the pipes were empty or filled with wires, which limited obtaining detailed information about the bottom of the pipes. Interferences caused due to the presence of rebars in paved areas made it impossible to identify pipelines in these areas. Conduits running parallel to the profiles were not identified, it being interesting to carry out profiles in other directions in order to identify all the elements of interest.

Keywords: GPR, hyperbolas, profiles, *retrofit*, pipes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....10

1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....11

1.2. OBJETIVO GERAL.....11

1.3. OBJETIVO ESPECÍFICO.....11

1.4. JUSTIFICATIVA.....11

2. PROPOSTA METODOLÓGICA.....11

3. RESULTADOS.....29

4. CONCLUSÕES.....59

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização do PCTec.....10

Figura 2 (a) Esquema de aquisição de dados no modo common offset (S = espaçamento entre as antenas, e nx = espaçamento entre os traços). (b) três traços de GPR mostrando a chegada da onda aérea, da groundwave e da onda refletida no nível d'água. Fonte: Borges, 2007.....14

Figura 3 Esquema da sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b) WARR. (c) Exemplo de dado resultante de levantamento CMP. (d) Principais frentes de onda identificadas na CMP. Fonte: Borges,2009.....15

Figura 4 Perfil de GPR com assinaturas hiperbólicas típicas de tubulações.....16

Figura 5 (a) Perfil GPR; (b) Seção transversal real dos tubos enterrados. Fonte: Hayakawa, 1998.....16

Figura 6 Ortofoto da zona experimental obtida com scanner a laser. Fonte: Prego, 2017.....17

Figura 7 Perfil com a presença de reflexões referentes as partes superior e inferior de um tubo. 17

Figura 8 Dados GPR produzidos e identificação dos encanamentos. Fonte: Prego, 2017.....18

Figura 9 Croqui dos levantamentos dos perfis L1, L2, L3 e L4. 21

Figura 10 Perfil L1..... 21

Figura 11 Perfil L2..... 22

Figura 12 Perfil L3..... 22

Figura 13 Perfil L4..... 22

Figura 14 Perfil L5..... 22

Figura 15 Perfil L6..... 23

Figura 16 Caixa de inspeção com encanamentos aparentes 23

Figura 17 Croqui com as direções aproximadas das tubulações.....24

Figura 18 Croqui representando os perfis GPR realizados.....25

Figura 19 Barbante esticado e equipamento GPR.....25

Figura 20 Indicação das áreas A1 e A2 pavimentadas com concreto armado.....28

Figura 21 Assinaturas de possíveis vergalhões que compõem o concreto armado da área A1 (destaque em vermelho). Destaque feito do Perfil 8.....29

Figura 22 Assinaturas de possíveis vergalhões que compõem o concreto armado da área A2 (destaque em vermelho). Destaque feito do Perfil 8.....29

Figura 23 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 1 (acima) e 2 (abaixo). Os números coloridos representam as famílias de hipérboles.....30

Figura 24 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 2 (acima) e 3 (abaixo).....31

Figura 25 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 3 (acima) e 4 (abaixo). 32

Figura 26 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 4 (acima) e 5 (abaixo).....33

Figura 27 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 5 (acima) e 6 (abaixo).....34

Figura 28 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 6 (acima) e 7 (abaixo).....35

Figura 29 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 7 (acima) e 8 (abaixo).....36

Figura 30 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 8 (acima) e 9 (abaixo).....37

Figura 31 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 9 (acima) e 10 (abaixo).....38

Figura 32 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 10 (acima) e 11 (abaixo).....39

Figura 33 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 11 (acima) e 12 (abaixo).....40

Figura 34 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 12 (acima) e 13 (abaixo).....41

Figura 35 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 13 (acima) e 14

(abaixo).....42

Figura 36 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 14 (acima) e 15 (abaixo).....43

Figura 37 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 15 (acima) e 16 (abaixo).....44

Figura 38 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 16 (acima) e 17 (abaixo).....45

Figura 39 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 17 (acima) e 18 (abaixo).....46

Figura 40 Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 17 (acima) e 18 (abaixo).....47

Figura 41 Possível localização de tubulações.....48

Figura 42 Direções dos tubos 9 e 11 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).....51

Figura 43 Direção do tubo 19 aferida por radargramas (a) e inspeção visual(b).....51

Figura 44 Direções dos tubos 9 e 14 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).....52

Figura 45 Direção do tubo 14 aferida por radargramas (a) e inspeção visual(b).....52

Figura 46 Direções dos tubos 3 e 4 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).....53

Figura 47 Direções dos tubos 6 e 7 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).....53

1. INTRODUÇÃO

1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O PCTec/UnB foi criado pela Resolução n° 14/2007 do Conselho Diretor e alçado à órgão complementar da universidade em 2018, pela Resolução nº 11/2018 do Conselho Universitário. A Política de Inovação da UnB define o órgão como ente voltado para formação de parcerias com instituições externas à universidade. Atualmente, possui 486.000 m², situando-se no extremo sul do Campus Darcy Ribeiro (figura 1).

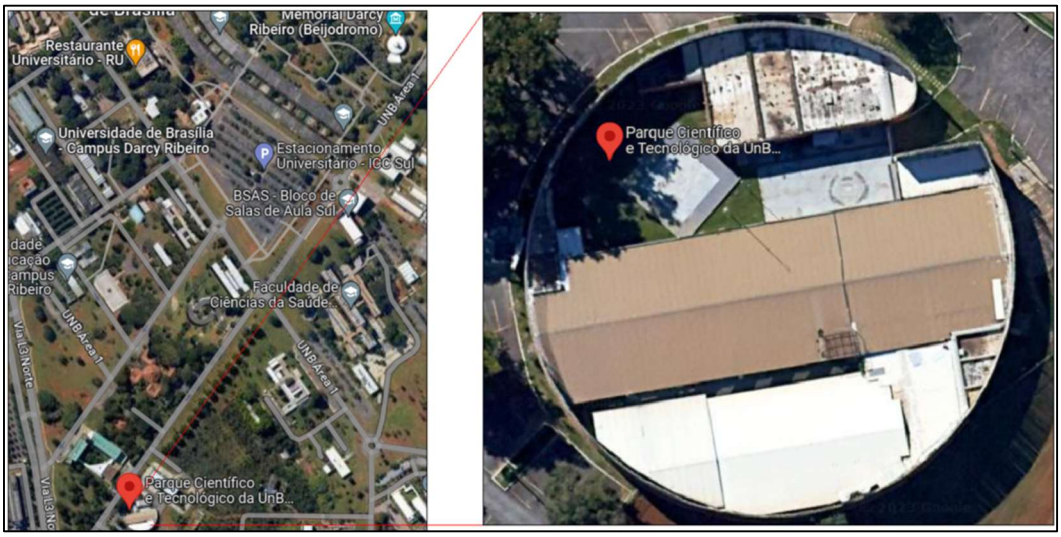


Figura 1 – localização do PCTec.

O ProBIM-PISAC é um espaço dentro da Plataforma de Inovação e Sustentabilidade do Ambiente Construído (PISAC), sendo parte integrante do PCTec/UnB e tendo como como objetivo principal a difusão da metodologia BIM. No âmbito da Célula BIM UNB, o ProBIM-PISAC se propõe a elaborar um Projeto Piloto que será desenvolvido de forma a atender uma demanda já definida para a nova sede do PCTec, por meio de um projeto de *retrofit* inteiramente desenvolvido em BIM.

A consolidação do projeto de *retrofit* se dará em quatro fases, sendo o *As built* uma fase anterior a elas que servirá como base para todo esse processo, compreendendo as etapas de:

- ***AS BUILT*** - Modelagem do edifício como ele se configura;
- **FASE 1** - Execução das ações de baixa complexidade na Sede do PCTec (divisórias, mobiliário, luminotécnico, forro, piso).
- **FASE 2** - Execução de obras de alta complexidade alta complexidade também na Sede (atualização nas instalações - elétrica, lógica, hidrossanitária e de incêndio, inclusão do sistema de automação predial, Instalação dos banheiros PCD, aberturas em alvenarias de tijolo, instalação de placas fotovoltaicas na cobertura existente)
- **FASE 3** - Execução de obras no entorno do edifício e paisagismo. Ações realizadas no pátio interno do PCTec, envolvendo a execução da rampa, do anfiteatro, do átriode ligação entre o bloco Sede e o Bistrô e todo o paisagismo associado a esse setor.
- **FASE 4** - Execução de obras com ações realizadas no antigo Data Center com a adequação do mesmo ao uso do Bistrô/Restaurante, Espaço Família, DML, Vestiários e banheiros, juntamente com toda ação de intervenção de fachada aplicada ao entorno

do edifício.

O projeto piloto tem como um de seus objetivos a criação de um manual de RETROFIT para o PCTec, que também poderá ser utilizado eventualmente para aplicação da técnica em outras edificações. Um problema evidente é a falta dos projetos de instalações prediais, pois tratando-se de edificação relativamente antiga, não foram localizados tais documentos. Essa ausência mostra-se um grande problema, pois como as tubulações são em sua grande maioria não aparentes, estando no interior do solo ou das paredes, torna-se difícil a elaboração do *AS BUILT* desses elementos.

1.2. OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal empregar a tecnologia de Radar de Penetração do Solo (GPR) com uma frequência de 400 MHz para identificar a existência de tubulações no edifício presentes no edifício do PCTec, situado na Universidade de Brasília. O GPR é uma ferramenta não invasiva e de alta resolução que se mostra promissora na detecção e caracterização de estruturas subterrâneas, e neste estudo, busca-se explorar seu potencial na identificação e análise de sistemas de tubulações.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Busca-se realizar ensaios externamente e internamente no edifício em estudo, utilizando o método GPR, testando as limitações e potencialidades de tal método em ambos os ambientes, além da realização de inspeções visuais que auxiliem na localização dos elementos em estudo. Por meio da realização de perfis GPR paralelos, pretende-se identificar a continuidade de parábolas que indiquem a presença das tubulações. Além das aquisições de dados brutos, serão exploradas técnicas de processamento de dados por meio do *software* ReflexW para melhorar a qualidade das imagens obtidas pelo GPR, aumentando a clareza das informações e a capacidade de identificação das tubulações.

1.4. JUSTIFICATIVA

A infraestrutura subterrânea desempenha um papel fundamental na funcionalidade e sustentabilidade de edifícios e instalações. No entanto, a detecção e manutenção dessas estruturas frequentemente se mostram desafiadoras devido à natureza oculta e complexa do subsolo. Nesse contexto, o Radar de Penetração do Solo (GPR) surge como uma tecnologia promissora para enfrentar esses desafios. Essa metodologia reduz significativamente os riscos associados a intervenções destrutivas, como escavações indiscriminadas, e preserva a integridade das estruturas existentes no edifício. A abordagem não intrusiva também é essencial para a conservação do patrimônio arquitetônico e histórico.

2. PROPOSTA MEDOTOLÓGICA

Para atingir os objetivos, a metodologia consistiu em: pesquisa bibliográfica sobre o tema; execução de seis perfis GPR, (quatro perfis foram conduzidos nas áreas gramadas do

edifício, um perfil no piso e outro na parede de um banheiro), tendo como objetivo testar a capacidade do equipamento de identificar tubulações; inspeção visual das caixas de inspeção utilizando uma bússola; execução de 19 perfis GPR na área externa do edifício.

Etapa 0 – Levantamento das Referências Bibliográficas relevantes para a pesquisa

RETROFIT

Segundo Marques de Jesus, C.R. (2008), *retrofit* é a troca ou substituição de componentes ou subsistemas específicos de um edifício que se tornaram inadequados ou obsoletos, seja pelo passar do tempo, ou em função da evolução tecnológica ou de novas necessidades dos usuários.

Segundo a Norma de Desempenho NBR–15.575, retrofit é a *"(...) remodelação ou atualização do edifício ou de sistemas, através da incorporação de novas tecnologias e conceitos, normalmente visando à valorização do imóvel, mudança de uso, aumento da vida útil e eficiência operacional e energética."*

Qualharini (2004) descreve *retrofit* como sendo o processo de interferir em uma benfeitoria, que foi executada em padrões inadequados às necessidades atuais. Assim, *retrofit*, é qualquer tipo de reforma, a renovação completa de uma edificação, uma intervenção a um patrimônio, ou seja, colocar o velho em forma de novo preservando seus valores estéticos e históricos originais, além de trabalhar com o conceito de sustentabilidade, na medida em que busca preservar os elementos que caracterizam a edificação ao invés de simplesmente descartá-los.

Segundo Moraes (2011), dentre as diversas etapas de um empreendimento de reabilitação, o diagnóstico e estudo de viabilidade se destacam pela importância e por estar diretamente relacionados ao sucesso do empreendimento. Assim, alguns conceitos devem ser observados nos edifícios antes de sua revitalização:

- Realizar um minucioso levantamento e estudo dos sistemas e equipamentos já instalados;
- Observar o caminho físico percorrido na época da construção e propor as soluções dos possíveis novos caminhos;
- Definição dos subsistemas a serem implantados obedecendo aos padrões nacionais usados nos empreendimentos do mesmo porte;
- Aproveitamento de equipamentos e funções antigas, bastando apenas interligá-los ao novo sistema;
- Documentar em um memorial descritivo todos os procedimentos de modificações ocorridas. Através de uma listagem, descrever a interligação dos sistemas antigos aos novos tais como os sistemas de segurança e incêndio;
- Nas plantas de arquitetura, desenho técnico e instalações, mostrar as modificações e acréscimos, evidenciando o posicionamento da distribuição dos possíveis novos caminhos, fornecendo dados complementares que auxiliem na melhor solução possível de ser executada.

Erik (2021) destaca que o *retrofit* nas construções é bem mais abrangente que uma simples reforma, pois envolve uma série de ações executivas de readequação/atualização de

instalações prediais, buscando melhorar seu desempenho com incorporação de soluções tecnológicas disponíveis (materiais e procedimentos), tornando-as adequadas a determinados parâmetros, sobretudo de acordo com as normas técnicas vigentes e outros aspectos característicos das áreas de intervenções (segurança, funcionalidade, estética, conforto, etc.).

Apolônio *et al*. (2010), propuseram estratégias sustentáveis para recuperar e reabilitar a Gráfica Pepe, tombada pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, localizada no centro histórico da cidade de Cuiabá, no Brasil. As propostas lançadas reforçam a integração entre o meio construído e o meio natural, possibilitando a renovação do edifício de maneira a preservar o valor estético e histórico da edificação. Primeiramente um novo uso foi proposto, baseando-se na localização da edificação, na adequação do uso com o entorno existente e na capacidade de fluxo da Gráfica, que não pode ter seu espaço físico alterado. A partir da definição do novo uso, elaborou-se um programa de necessidades e novos usos foram atribuídos aos ambientes da construção existente. As propostas de intervenção na edificação foram baseadas nos princípios de sustentabilidade e menor impacto ao meio ambiente, em conformidade com as orientações do IPHAN. Alternativas visando ao conforto térmico foram propostas, fundamentando-se em estudos que recomendam parâmetros bioclimáticos para a cidade de Cuiabá. As propostas para o conforto luminoso tiveram como referência o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ) lançado pelo Ministério das Minas e Energia (2009).

Okubara (2017) realizou um estudo sobre premissas de sustentabilidade para desenvolver projetos de instalações elétricas e hidrossanitárias, visando eficiência energética e uso racional em um galpão de triagem de recicláveis já construído. Para o desenvolvimento do projeto de instalações hidrossanitárias baseado nas premissas de sustentabilidade foram necessárias as seguintes etapas:

• cálculo da demanda de água do galpão para um projeto convencional de instalações hidrossanitárias;

• cálculo da demanda de água do galpão contemplando a utilização de dispositivos economizadores de água: metais e louças sanitárias de fluxo reduzido;

• determinação das parcelas de uso de água, separando demanda de água potável e água não potável;

• desenvolvimento de projeto para aproveitamento de água de chuva para finalidades não potáveis, a partir da avaliação do potencial de aproveitamento de água de chuva para suprir a demanda de usos não potáveis, de acordo com a recomendação da norma brasileira ABNT 15527:2007 (ABNT, 2007);

• desenvolvimento de projeto de instalações de água fria, de acordo com as recomendações da norma brasileira ABNT NBR 5626:1998 e 55626:2020, e contemplando uso racional de água; e

• desenvolvimento de projeto de esgotamento sanitário, de acordo com as recomendações da norma brasileira ABNT NBR 8160:1999.

RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR)

O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio em altas frequências (normalmente entre 10 MHz a 2500 MHz) para identificar estruturas e feições geológicas rasas de subsuperfície ou localizar objetos enterrados pelo homem (PORSANI, 1999).

A teoria de propagação de ondas eletromagnéticas é a base para o entendimento do método GPR, essencialmente as equações de Maxwell e as relações constitutivas de propriedades eletromagnéticas dos materiais (DANIELS, 1996; ANNAN, 2001; JOL, 2009).

Nos levantamentos de GPR para obtenção de perfis de reflexão, uma ou mais antenas de radar são movidas simultaneamente na superfície do solo, e os traços são adquiridos em intervalos de distância ou tempo contínuos. O resultado é uma seção *common offset* ou *constant offset* sendo que o tempo de trânsito duplo está no eixo vertical e no eixo horizontal o número de traços, i.e., distância (Figura 2).

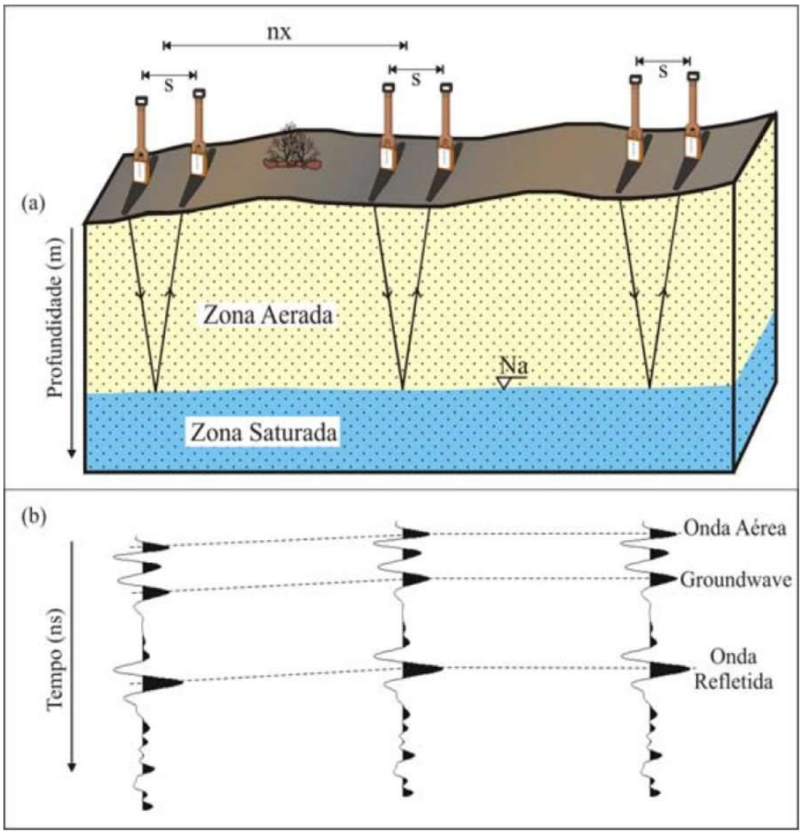


Figura 2 - (a) Esquema de aquisição de dados no modo common offset (S = espaçamento entre as antenas, e nx = espaçamento entre os traços). (b) três traços de GPR mostrando a chegada da onda aérea, da groundwave e da onda refletida no nível d'água. Fonte: Borges, 2007.

As estimativas de um modelo de velocidades da onda eletromagnética para o meio são essenciais para a estimativa de profundidade, correção topográfica e migração (Jacob, 2015). A estimativa dessa velocidade pode ser feita, dentre outros métodos, através desondagens de velocidade (*common mid point* – CMP, ou *wide angle reflection and refraction* – WARR).

Nas sondagens de velocidade, um mesmo ponto ou área é registrado, redundantemente, com diferentes distâncias, transmissor – receptor (*multiple coverage*) (Duarte, 2003). Segundo Borges (2007), na técnica CMP a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo (Figura 3a), enquanto na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira (Figura 3b). Em termos simples, um gráfico do tempo de viagem ao quadrado versus a separação da antena ao quadrado produz uma relação de linha reta cuja inclinação fornece uma estimativa de velocidade e cuja interceptação no tempo produz uma estimativa de profundidade (Annan, 2004).

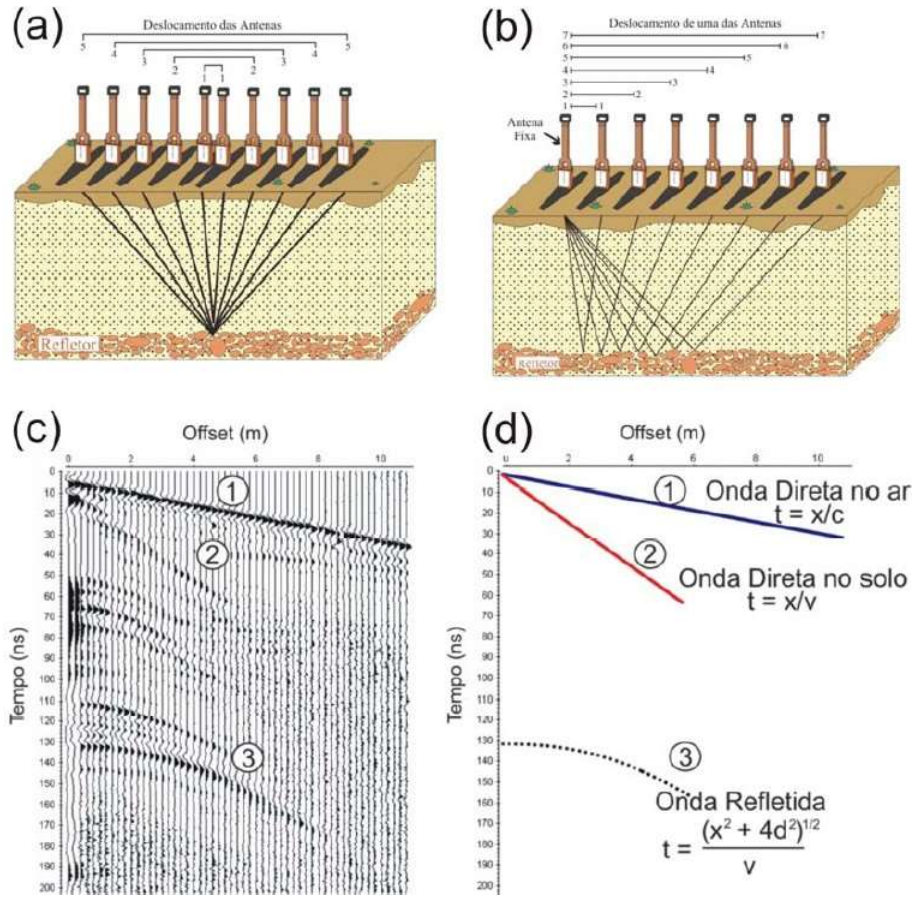


Figura 3 - Esquema da sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b) WARR. (c) Exemplo de dado resultante de levantamento CMP. (d) Principais frentes de onda identificadas na CMP. Fonte: Borges, 2007.

A profundidade de investigação e a resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação, e vice-versa. (Borges, 2007).

Ghozzi (2018) realizou uma pesquisa que teve como objetivo mapear linhas de esgoto em uma região urbana da cidade de Tunis, Tunísia, utilizando GPR. Neste estudo, um sistema GPR acoplado ao solo com frequência de 400MHz foi usado para detectar e localizar as linhas de esgoto. A fim de reduzir a quantidade de dados coletados na grande área de estudo, algumas subáreas foram selecionadas onde o teste GPR foi realizado e os dados foram analisados. Em seguida, as linhas de esgoto foram interpoladas em toda a área usando os resultados do GPR e as localizações de bueiros visíveis da superfície. Foi demonstrado que com esta técnica é

possível mapear as tubulações. A análise de dados consistiu em identificar em cada perfil as formas hiperbólicas que são as assinaturas dos cilindros, conforme é apresentado na Figura 4.

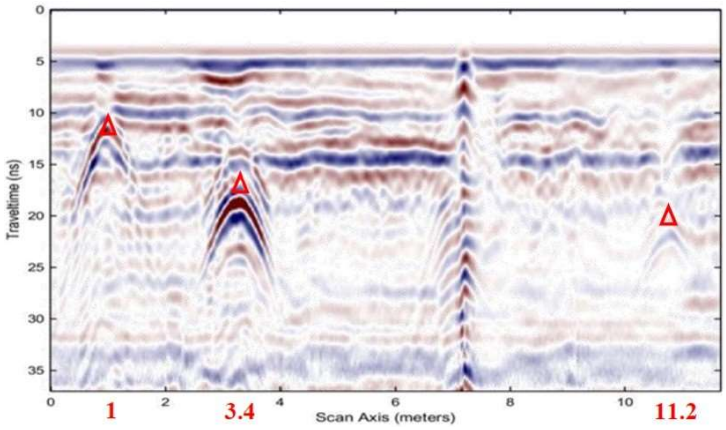


Figura 4 – perfil de GPR com assinaturas hiperbólicas típicas de tubulações. Fonte: Ghozzi, 2018.

Hayakawa (1998) realizou um perfil do solo utilizando uma antena GPR com uma frequência central de 420 MHz. Na área de estudo estavam presentes cinco tubos de ferro e três tubos de plástico, sendo que todos eles apresentaram assinaturas hiperbólicas, conforme é apresentado na Figura 5.

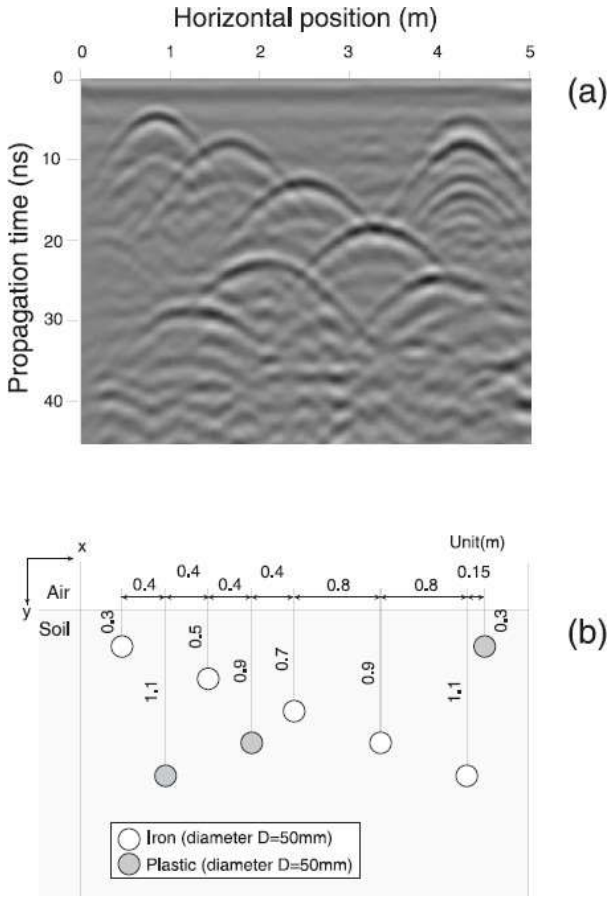


Figura 5 – (a) Perfil GPR; (b) Seção transversal real dos tubos enterrados. Fonte: Hayakawa, 1998.

Prego (2017) realizou levantamentos GPR em uma zona experimental (Figura 6) onde havia doze tubos enterrados de diversos materiais: poliuretano, polipropileno, nylon, PVC, ferro dúctil e concreto. Diferentes frequências de antenas foram testadas a fim de fornecer uma aquisição de dados eficiente que garanta resultados precisos na detecção. Para tubos mais rasos, a antena de 2,3 GHz forneceu os melhores resultados. No entanto, os dados de 1 GHz e 800 MHz revelaram informações complementares relacionadas a tubos mais profundos. Na figura 8 são ilustrados os perfis GPR gerados com cada frequência de antena, mostrando as reflexões hiperbólicas geradas pelos diversos tubos enterrados. Uma reflexão hiperbólica bem definida é fundamental para obter o diâmetro do tubo. Entretanto, é importante destacar que essa medição é eficaz apenas quando é possível detectar as reflexões tanto na parte superior quanto na inferior do tubo, conforme é apresentado na Figura 7. Em tal pesquisa, todas as tubulações consideradas foram preenchidas com ar, representando o cenário mais desafiador. Nesse contexto, os tubos preenchidos com água oferecem vantagens em relação aos tubos cheios de ar. Isso se deve ao fato de que a velocidade de propagação da onda de radar em água doce é significativamente mais lenta (3 cm/ns) do que no espaço livre (30 cm/ns). Essa diferença de velocidade possibilita uma melhor diferenciação de reflexões independentes, evitando o problema de *aliasing* vertical. É relevante mencionar que a inspeção de tubulações cheias de água requer uma janela de tempo total maior para mitigar o atraso do sinal. No entanto, os benefícios obtidos ao evitar o *aliasing* vertical justificam essa abordagem mais cuidadosa.

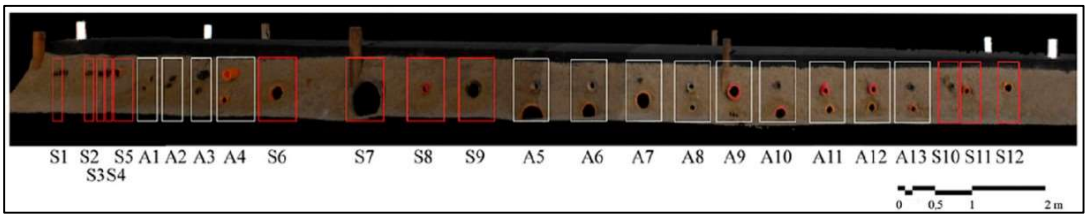


Figura 6 - Ortofoto da zona experimental obtida com scanner a laser. Fonte: Prego, 2017.

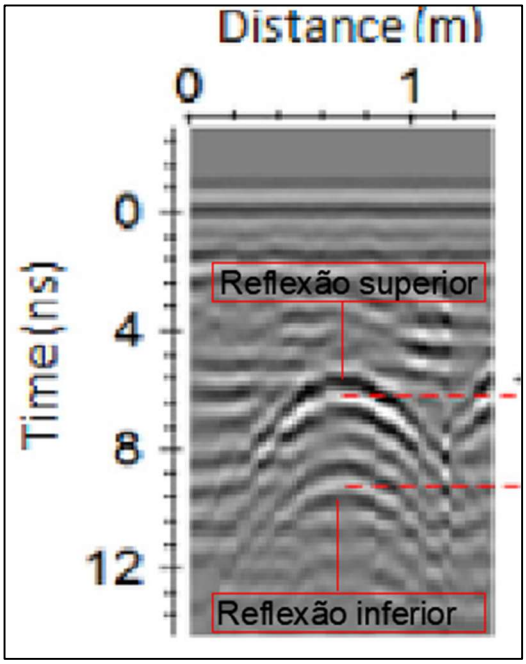


Figura 7 – perfil com a presença de reflexões referentes as partes superior e inferior de um tubo. Fonte: modificado de Prego (2017).

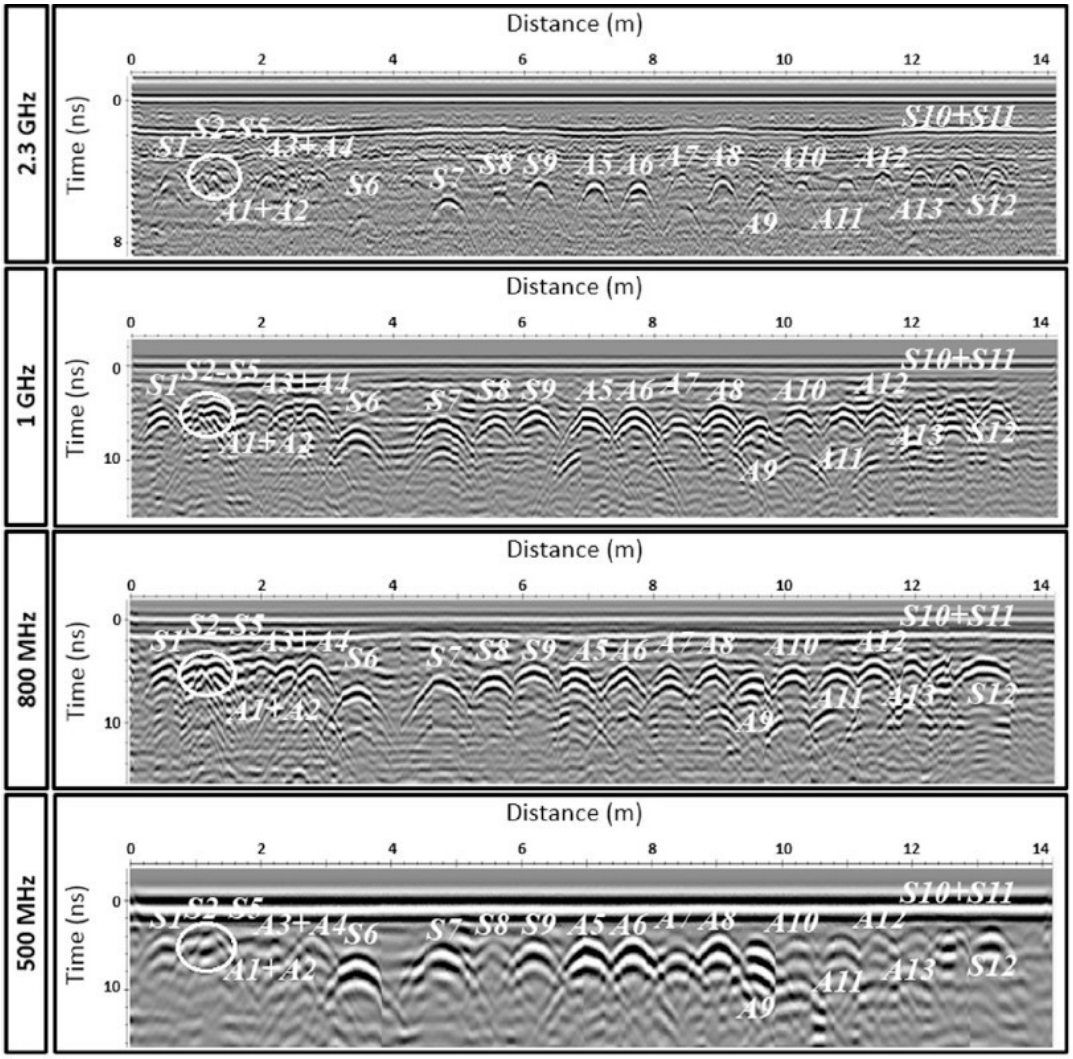


Figura 8 – Dados GPR produzidos e identificação dos encanamentos. Fonte: Prego, 2017

Segundo Yelf (2007), o GPR é um método não invasivo que utiliza ondas eletromagnéticas com frequências entre 10 MHz e 4 GHz. As ondas eletromagnéticas são emitidas por meio de uma antena transmissora para o interior do terreno, interagindo com os materiais em profundidade e refletindo parte de sua energia que é recebida por uma antena receptora.

Esse método se baseia na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas descrita pelas equações de Maxwell. Essas equações não trazem informações sobre as propriedades elétricas dos materiais com que os campos magnéticos e elétricos induzidos interagem, sendo necessária a utilização de relações constitutivas do meio, sendo elas:

1. Condutividade elétrica (σ): é descrita pela lei de Ohm, que iguala a densidade de corrente (J) ao produto entre a condutividade elétrica (σ) e o campo elétrico $(\vec{E})$, como é representado na Equação 1. A condutividade elétrica de um material depende de fatorescomo a quantidade de água, a porosidade, a quantidade de sais em solução e apresença de minerais condutivos.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{(Equação 1)}$$

2. Permissividade dielétrica ($\boldsymbol{\varepsilon}$): Consiste em uma constante física que quantifica a capacidade que um meio tem de se polarizar quando é colocado na presença de um campo elétrico. É definida como a razão entre a polarização do meio ($\vec{D}$) e o campo elétrico induzido ($\vec{E}$), como é mostrado na Equação 2. Normalmente se utiliza a (ε_r), que é a razão entre permissividade dielétrica do material (ε) e a permissividade dielétricado vácuo (ε_0), como é representado na Equação 3. Segundo Annan (1996), tanto acondutividade quanto a permissividade interferem na atenuação e na propagação das ondas eletromagnéticas.

$$\varepsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad \text{(Equação 3)}$$

3. Permeabilidade magnética $(\boldsymbol{\mu})$: é uma constante de proporcionalidade que relaciona o campo magnético induzido em um material ($\vec{B}$) quando ele é exposto a um campo magnético $(\vec{H})$, como mostra a Equação 4. Segundo Power (1997), a permeabilidade magnética é normalmente desprezada, pois se assume que os materiais geológicos próximos da superfície da terra têm uma resposta magnética muito baixa. No entanto, foram encontrados tipos de areias e solos que apresentaram respostas magnéticas significativas em testes laboratoriais.

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad \text{(Equação 4)}$$

Fazendo uso das equações de Maxwell e das relações constitutivas do meio, obtém-se a equação da propagação das ondas eletromagnéticas em um determinado meio (Eq. 5), onde k é uma constante que guarda as informações do meio em que a onda EM viajou.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad \text{(Equação 5)}$$

Segundo Borges (2007), os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM em determinado meio são a velocidade e a atenuação, sendo que para materiais geológicos com baixa perda a propagação ocorre com uma velocidade que depende, essencialmente, da constante dielétrica dos materiais, como mostra a Equação 6, onde c é a

velocidade da luz.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad \text{(Equação 6)}$$

A frequência central da antena utilizada interfere diretamente na resolução obtida e na profundidade de investigação alcançada. Quanto maior a frequência, mais a onda EM vai interagir com o meio, logo, maior será a resolução e menor será a profundidade alcançada. O oposto ocorre em casos de baixas frequências, pois as ondas com um comprimento de onda maior interagem menos com o meio, fazendo com que a resolução obtida seja baixa e a profundidade alcançada seja alta.

TUBULAÇÕES

Segundo Creder (2006), o uso do material plástico como condutor de fluidos já está generalizado mundialmente pelas inúmeras vantagens oferecidas, sendo elas: baixo peso; baixo custo relativo; boa resistência química; baixo coeficiente de atrito (pequenas perdas de carga); baixa tendência de entupimento; baixa condutividade elétrica; baixa condutividade térmica; baixo custo de fretes; facilidade para instalação e manutenção; segurança, quando protegido externamente.

As tubulações plásticas podem ser classificadas em duas categorias distintas: os tubos flexíveis e os tubos rígidos. De acordo com Moreira (2010), os tubos flexíveis são confeccionados principalmente com polietileno (PEX), enquanto os tubos rígidos encontrados no Brasil são produzidos a partir de materiais como polipropileno (PPR) ou policloreto de vinila clorado (CPVC).

Segundo Cavalcante (2019), o sistema PEX é constituído por tubulações flexíveis, eliminando assim a necessidade de múltiplas conexões, o que o torna adequado para uma variedade de aplicações, incluindo instalações hidráulicas para água fria e quente, bem como sistemas como aquecimento solar, ar-condicionado e refrigeração, entre outros. Devido à sua flexibilidade, que permite a criação de curvas, este produto reduz a quantidade de conexões necessárias em instalações contínuas, resultando em um desempenho hidráulico notável.

Etapa 1 – Realização de levantamento teste utilizando GPR na edificação do PCTec

Nessa etapa foram utilizadas duas antenas da fabricante GSSI, sendo uma de frequência central de 2,6 GHz (Figura 10) e a outra de 400 MHz (Figura 11). Apesar de suas vantagens significativas, as antenas também apresentam limitações importantes no contexto da localização de tubulações subterrâneas, sendo elas:

1. **Profundidade de Penetração Limitada:** A frequência mais alta da antena (2,6

GHz) contribui para uma resolução excepcional, mas também resulta em uma profundidade de penetração mais limitada em comparação com antenas de frequências mais baixas. Isso significa que a detecção confiável de tubulações profundamente enterradas pode ser desafiadora.

2. **Variação da Composição do Solo:** O desempenho da Antena GPR pode ser afetado pela variação na composição do solo, uma vez que diferentes materiais possuem propriedades e características de reflexão distintas. Solos altamente condutivos ou com elevado teor de água, por exemplo, podem atenuar os sinais GPR, dificultando a detecção precisa das tubulações.
3. **Tubulações de Diâmetro Reduzido:** Tubulações de diâmetro muito pequeno podem não gerar um sinal de retorno forte o suficiente para serem detectadas com confiabilidade pela antena de 400 MHz. A resolução da imagem também pode não ser suficiente para distinguir tubulações de pequeno diâmetro de outros objetos ou anomalias.

Na data de 13/01/2023, foram realizados seis perfis de GPR na edificação em estudo, tendo como objetivo a identificação de assinaturas hiperbólicas que podem estar associadas a encanações. Os quatro primeiros perfis (L1, L2, L3 e L4) foram realizados em uma área verde do terreno, utilizando uma antena com frequência central de 400 MHz, da fabricante GSSI, onde encontram-se várias caixas de inspeção, conforme é apresentado na Figura 9.

Os outros perfis foram obtidos no chão de um dos banheiros (perfis L5) e na parede (perfis L6), utilizando uma antena com frequência de 2,6 GHz (Figura10). Após o levantamento, foi utilizado o software REFLEXW na etapa de processamento dos dados para eliminar ruídos e ressaltar estruturas de interesse. Os perfis realizados no solo (L1,L2, L3, L4), Figuras 12 a 15, apresentaram várias hipérboles, sendo provavelmente decorrentes da presença de encanações. Já o levantamento realizado na parede do banheiro (L7 e L8), Figuras 16 e 17, não apresentaram hipérboles que possam estar associadas a tubulação.



Figura 9 – Croqui dos levantamentos dos perfis L1, L2, L3 e L4.



Figura 10 – Antena GPR GSSI com frequência central de 2,6 GHz.

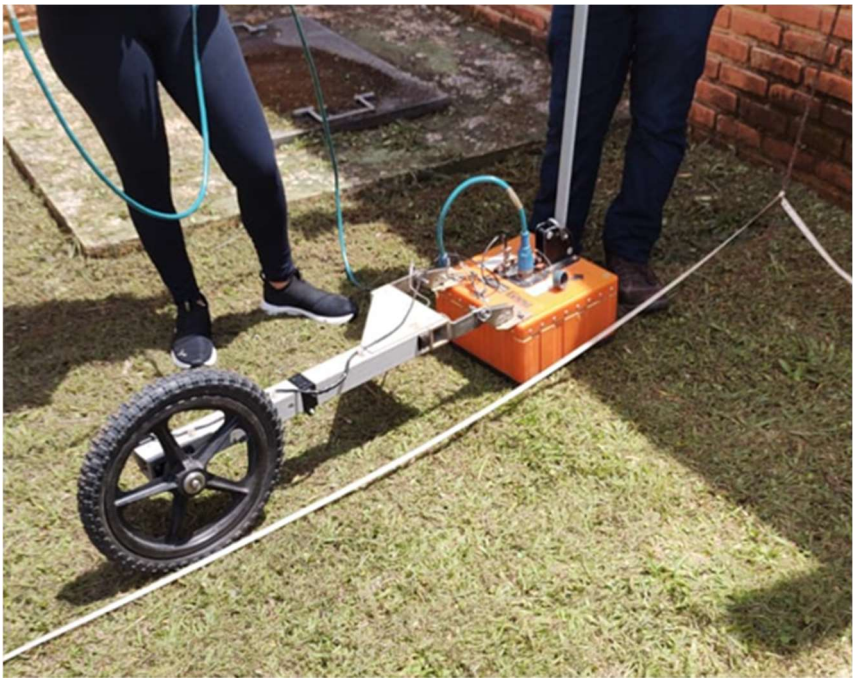


Figura 11 – Antena GPR GSSI com frequência central de 400 MHz.

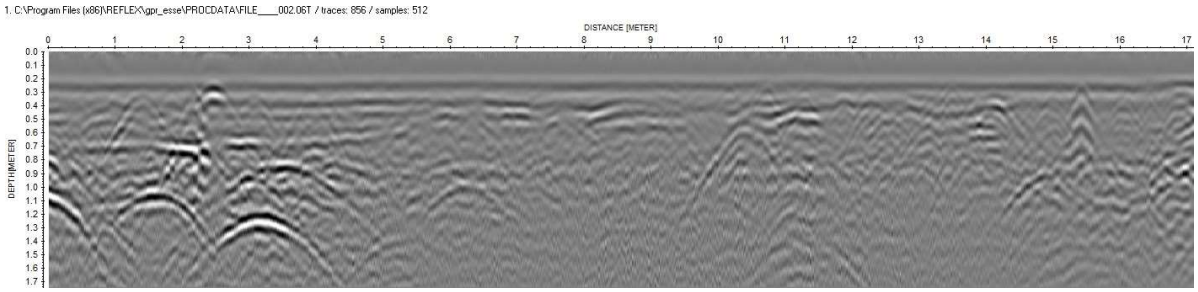


Figura 12 – Perfil L1.

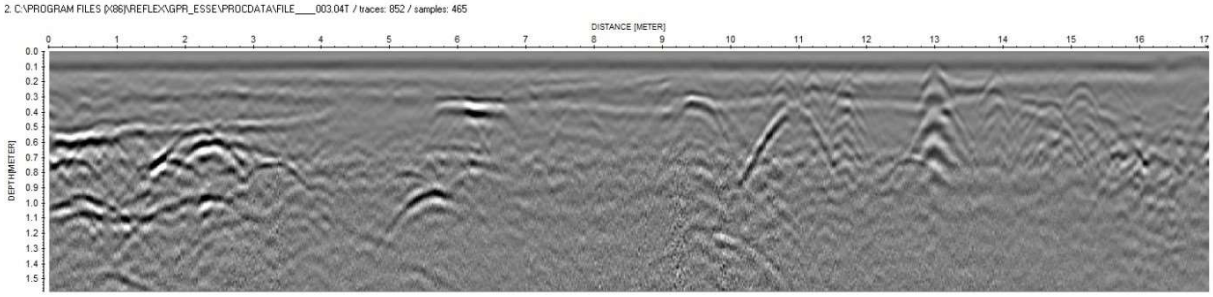


Figura 13 – Perfil L2.

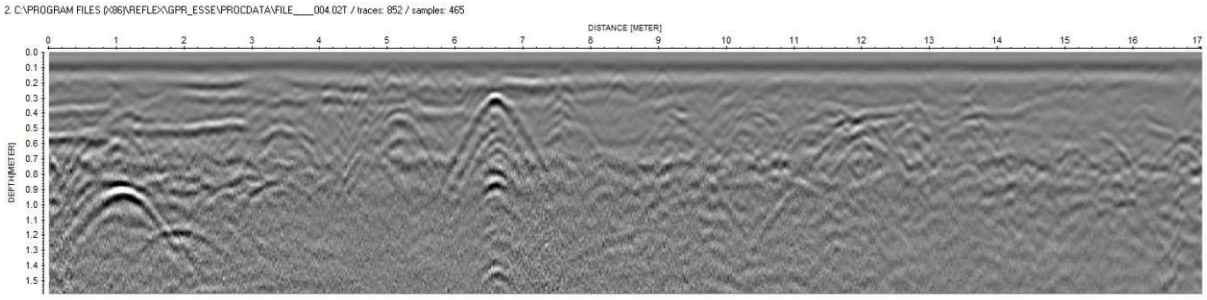


Figura 14 – Perfil L3.

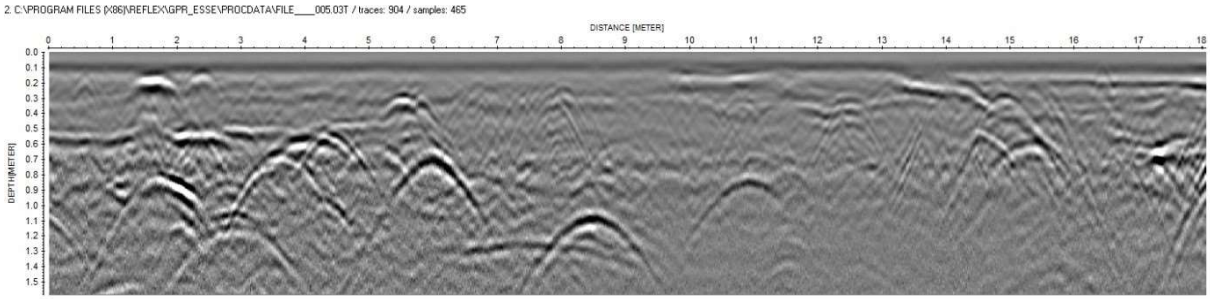


Figura 15 – Perfil L4.

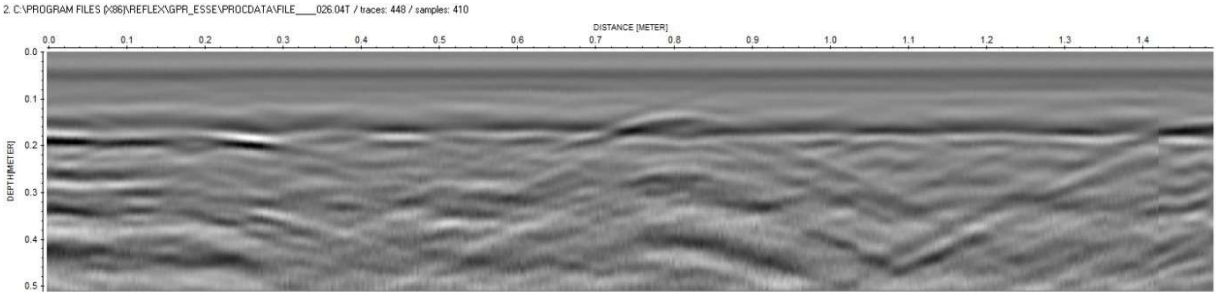


Figura 16 – Perfil L5.

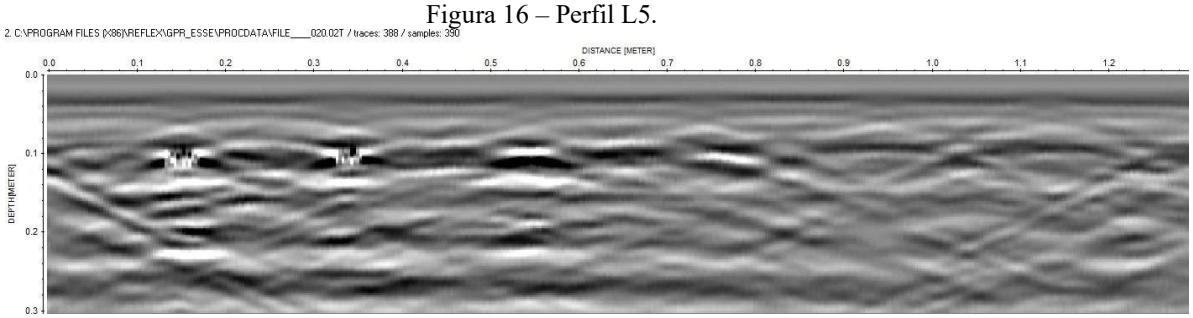


Figura 17 – Perfil L6.

Etapa 2 – Mapeamento visual das tubulações

Foi realizado um levantamento a partir dos elementos visíveis, medindo com uma bússola a direção (azimute) dos canos que estão aparentes dentro das caixas de inspeções, buscando ter uma ideia inicial dos locais onde possam estar passando tais elementos. A Figura 18 mostra uma caixa de inspeção presente na edificação, onde é possível ter uma ideia do direcionamento das tubulações. O croqui com as direções aproximadas das tubulações é mostrado na Figura 19. Foram analisadas 13 caixas de inspeção, sendo identificadas de C1 a C17.



Figura 18 – Caixa de inspeção com encanamentos aparentes.



Figura 19 – croqui com as direções aproximadas das tubulações.

Etapa 4 – Realização de levantamento utilizando o GPR em áreas estratégicas

Foram realizados 19 perfis GPR na área de estudo, conforme é mostrado na Figura 20. As linhas têm espaçamento constante de 1 metro umas das outras. Foi esticado um barbante na direção das linhas com o objetivo de que elas ficassem paralelas entre si (Figura 21).

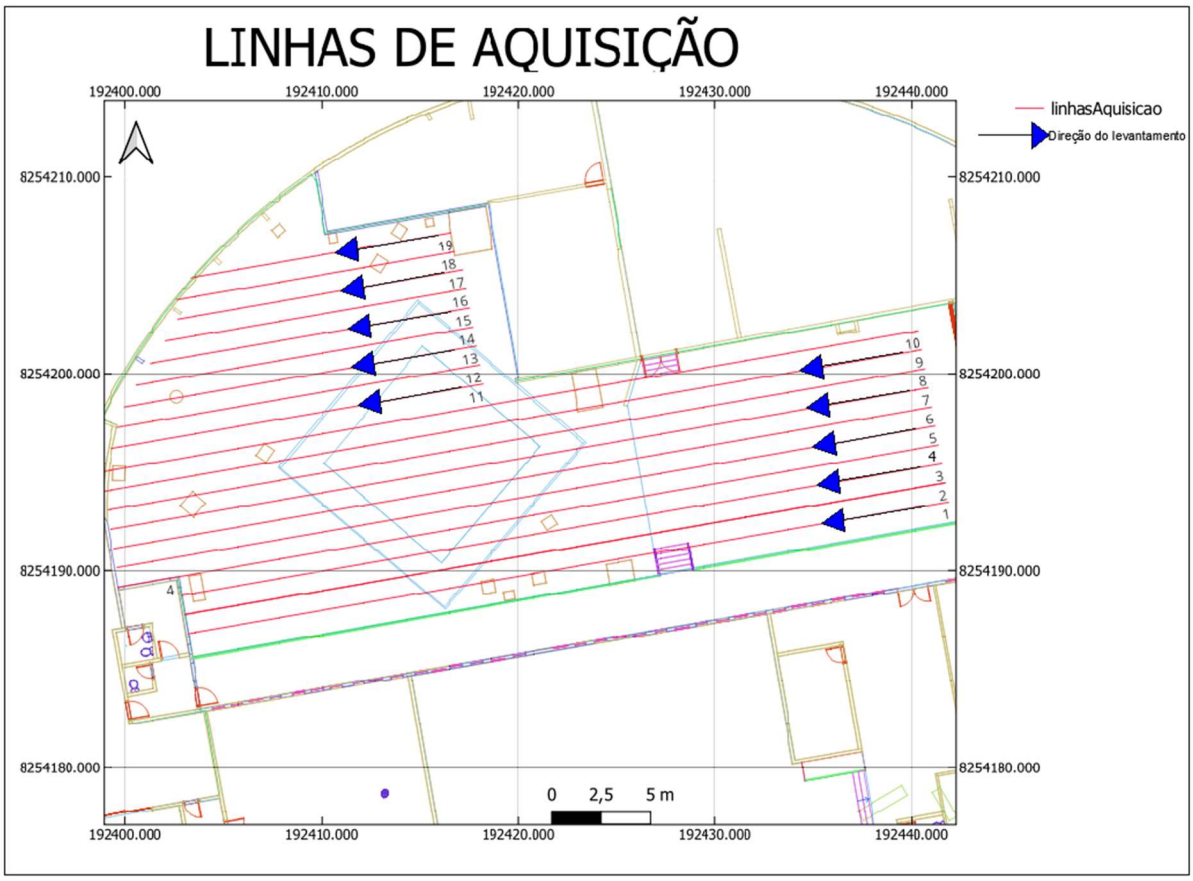


Figura 20 – croqui representando os perfis GPR realizados.



Figura 21 – barbante esticado e equipamento GPR.

Etapa 5 – Processamento dos dados por meio do software ReflexW:

O software ReflexW é uma ferramenta de processamento, interpretação e visualização de dados GPR desenvolvido pela *Sandmeier Scientific Software*. O tratamento dos dados proporciona várias melhorias aos perfis adquiridos, como, por exemplo:

- Melhoria da resolução espacial: pode aumentar a resolução espacial das imagens geradas, permitindo identificar com maior precisão as interfaces e as camadas do subsolo. Isso é alcançado através de técnicas como interpolação, remoção de ruídos e aplicação de filtros para melhorar a clareza e a definição das características geofísicas.

- Redução de ruídos: Durante a aquisição dos dados, podem ocorrer ruídos que afetam a qualidade das imagens. O processamento permite identificar e remover esses ruídos, melhorando a qualidade dos perfis.

- Aumento da profundidade de investigação: permitir um melhor alcance de penetração do sinal, aumentando a profundidade de investigação. Isso pode ser feito por meio de técnicas como a correção de atenuação, que compensa a perda de sinal ao longo da profundidade.

- Visualização e interpretação aprimoradas: O processamento adequado gera imagens mais claras e detalhadas, facilitando a visualização e interpretação dos resultados.

O fluxo de processamento que foi aplicado nos dados brutos é descrito abaixo:

1- **Ajuste do tempo zero (*move startime*):** O objetivo principal do ajuste do tempo zero é garantir o correto alinhamento dos dados recebidos pelo receptor do GPR com o instante de emissão do sinal pelo transmissor. Durante a aquisição dos dados, é comum ocorrerem atrasos devido a diversos fatores, tais como a velocidade de propagação do sinal no meio, a distância entre o transmissor e o receptor, imperfeições nos componentes eletrônicos ou problemas de sincronização do equipamento.

2- **Filtragem do ruído instrumental de baixa frequência (*DEWOW*)**: O objetivo principal é remover ou reduzir o ruído de baixa frequência proveniente de vibrações e instabilidades do sistema de aquisição, aprimorando a qualidade dos dados e eliminando ou atenuando o ruído indesejado que pode prejudicar a interpretação dos resultados.

3- ***Background removal*:** O objetivo principal do filtro de remoção de fundo é realçar as reflexões provenientes das interfaces e estruturas de interesse no subsolo, eliminando o sinal de fundo indesejado. Tal sinal pode incluir ruídos ambientais, reflexões de camadas não relevantes ou eventos de baixa amplitude que podem ocultar os alvos de interesse. O filtro de remoção de fundo visa melhorar a clareza das reflexões alvo, reduzindo a interferência do sinal de fundo e facilitando a identificação precisa dos artefatos de interesse.

4- ***Bandpass butterworth***: O objetivo principal é selecionar uma faixa específica de frequências do sinal e atenuar as frequências fora dessa faixa. Esse tipo de filtro é amplamente empregado no processamento de dados para realçar as reflexões de interesse, minimizando a influência de frequências indesejadas.

5- ***AGC gain***: O objetivo principal do ganho AGC é corrigir a variação de amplitude do sinal devido à atenuação progressiva que ocorre com a profundidade. À medida

que as ondas eletromagnéticas se propagam no subsolo, elas perdem energia, resultando em reflexões de camadas mais profundas com amplitudes geralmente menores em comparação com as camadas mais próximas da superfície. O ganho AGC visa equalizar essas amplitudes, amplificando as reflexões mais fracas das camadas mais profundas e compensando as diferenças de atenuação, o que resulta em uma representação mais equilibrada das características subsuperficiais nos dados de GPR.

6- ***Time-depth conversion*:** O objetivo da conversão tempo-profundidade é estabelecer uma relação entre as informações de tempo e de distâncias percorridas pelas ondas eletromagnéticas no subsolo. Para alcançar isso, é necessário considerar a velocidade média de propagação das ondas no meio em que o GPR está operando GPR.

Etapa 6 – Verificação de continuidade das hipérboles e comparação dos radargramas com as inspeções visuais e geração de um croqui georreferenciado

Consiste na medição da distância horizontal em que cada hipérbole estava em relação ao início de cada perfil e ligação desses pontos, buscando gerar um croqui georreferenciamento no software *Qgis*.

3. RESULTADOS

Após o processamento dos dados, foram gerados 19 radargramas, mostrados nas Figuras de 23 a 40. Os perfis foram analisados em pares para identificar as hipérboles características associadas às tubulações. Através de critérios como intensidade de reflexão e forma semelhantes, foram identificadas 19 famílias de hipérboles. A análise conjunta dos perfis revelou a repetição das assinaturas em cada perfil. As regiões A1 e A2 nos radargramas correspondem a áreas pavimentadas com concreto (Figura 22) que apresentaram respostas características de vergalhões (figuras 23 e 24), provavelmente causando interferências que impediram a identificação das tubulações nessas áreas. Abaixo descreve-se a ocorrência das hipérboles características:

1) Hipérbole 1: foi identificada nos perfis 1,2,3,4 e 5, mantendo as características em relação à distância horizontal, profundidade e intensidade;
2) Hipérbole 3: foi identificada nos perfis 1,2,3,4,5,6,7,8. Nos perfis 1 e 2 a assinatura aparece mais atenuada que nos outros radargramas, podendo indicar a presença de materiais atenuadores das ondas eletromagnéticas, provavelmente um solo mais argiloso. A partir do perfil 4 as hipérboles apareceram em distâncias horizontais distintas, indicando que essa tubulação encontra inclinada em planta, quando comparado com a direção dos levantamentos;
3) Hipérbole 4: mostrou-se presente nos perfis 1,2,3,4,5,6,7 e 8, mantendo as características em relação à distância horizontal, profundidade e intensidade;
4) Hipérbole 6: foi identificada nos perfis 2 e 4, mantendo as características em relação à distância horizontal, profundidade e intensidade;
5) Hipérbole 7: foi identificada nos perfis 2,3 e 4, mantendo as características em relação à distância horizontal, profundidade e intensidade;
6) Hipérbole 8: foi identificada nos perfis 1,2,3 e 4, variando em relação à distância horizontal, mas mantendo a profundidade e intensidade;
7) Hipérbole 9: foi identificada nos perfis 1,2,4,5,6,7,8. A ausência da hipérbole no perfil 3 pode indicar uma mudança na direção da encanação ou a presença de material que atenuou o sinal. Nos perfis 6 e 8 o sinal mostrou-se bastante fraco, quando comparado com a ocorrência em outros perfis, indicando a presença de material atenuante;
8) Hipérbole 10: foi identificada nos perfis 10,11,12,13,14,16 e 17, mantendo as características em relação à distância horizontal, profundidade e intensidade. A ausência da hipérbole no perfil 15 pode indicar uma mudança na direção da encanação ou a presença de material que atenuou o sinal;
9) Hipérbole 11: foi identificada nos perfis 5,6, 8 e 9, apresentado sinal mais fraco nos perfis 6,8 e 9;
10) Hipérbole 12: apareceu nos perfis 5,6,7 (sinal fraco),8,9,10;
11) Hipérbole 13: perfis 5, 6 e 7. As hipérboles 11, 12 e 13 apareceram bem próximas umas das outras nos primeiros perfis mas foram se distanciando ao longo dos outros perfis, indicando que as tubulações vão se distanciando;
12) Hipérbole 14: apresentou sinais fracos nos perfis 10 e 11, e com sinal forte nos perfis 12,13,13,16 e 17;
13) Hipérbole 15: perfis 9, 10, 11, 12 e 13;

14) Hipérbole 16: sinal forte nos perfis 11 e 12 e fraco no 13;
15) Hipérbole 17: sinal forte nos perfis 13, 14, 15, 16, 17 e fraco no 18;
16) Hipérbole 18: sinal forte nos perfis 12, 13, 14, 16 e fraco no 17;
17) Hipérbole 19: sinal fraco no perfil 12 e forte nos 13, 14, 15, 17, 18 e 19.a

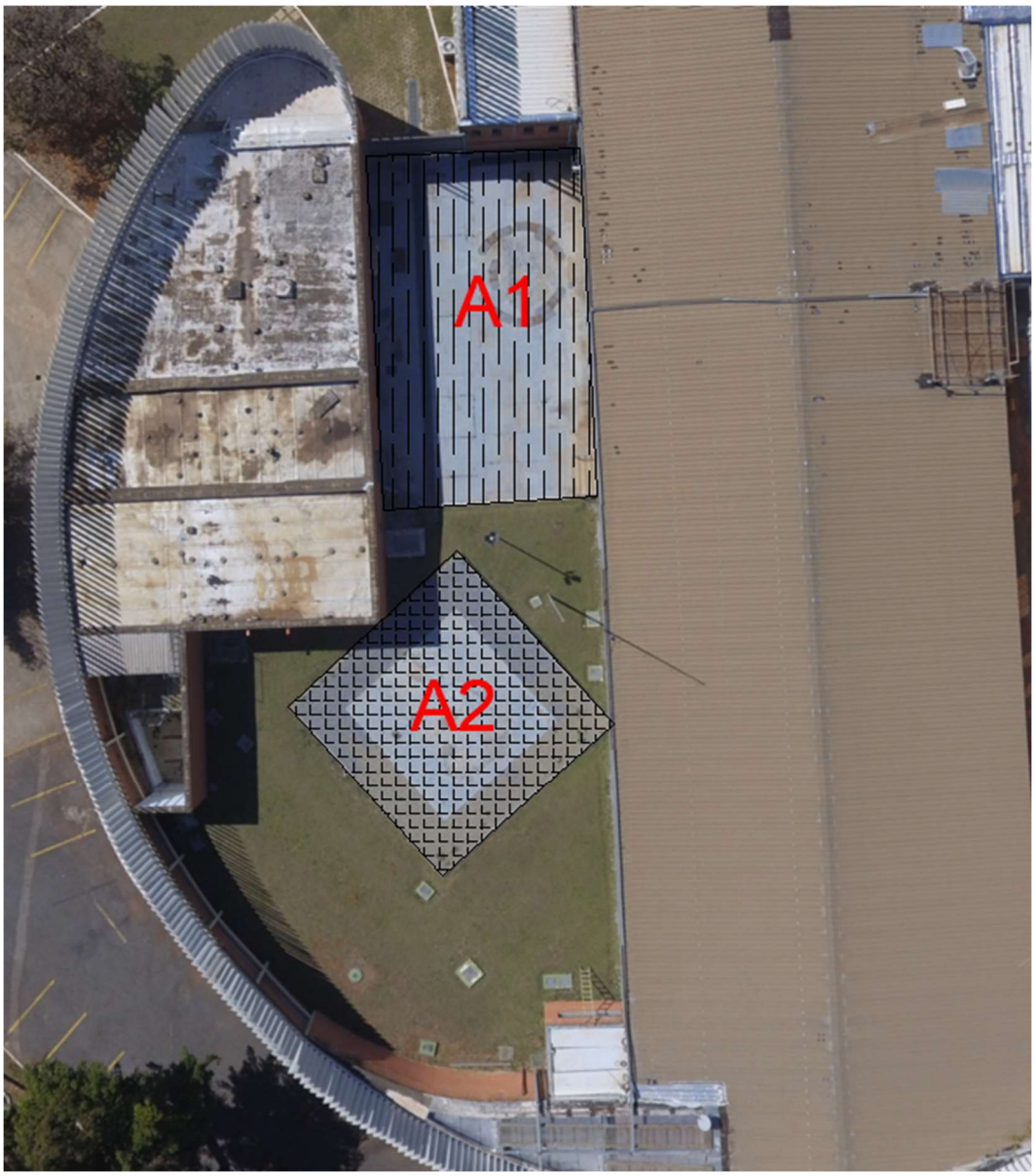


Figura 22 – indicação das áreas A1 e A2 pavimentadas com concreto armado.

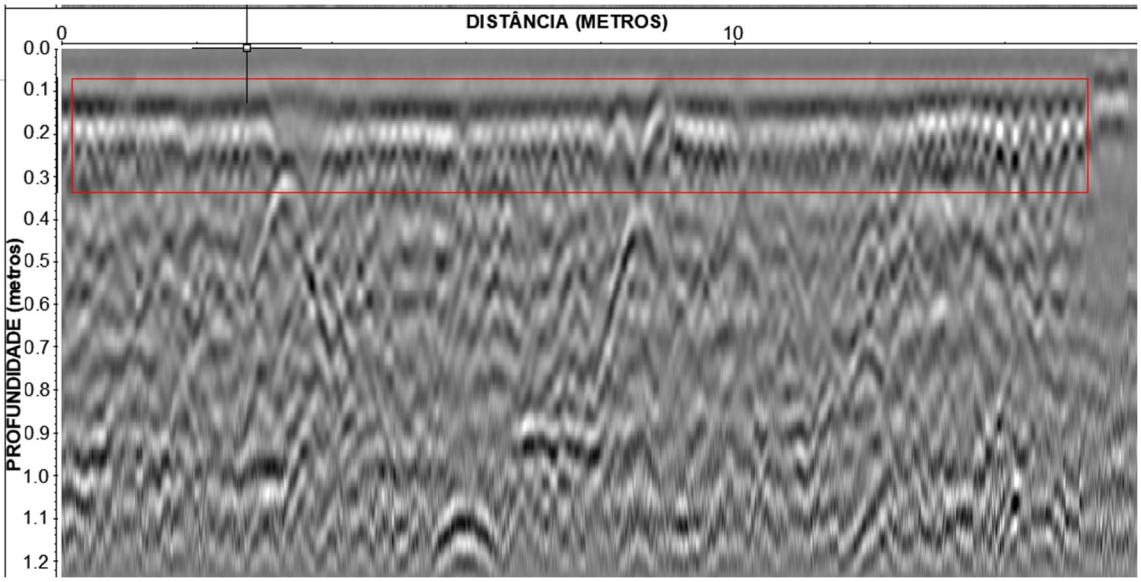


Figura 23 – assinaturas de possíveis vergalhões que compõem o concreto armado da área A1 (destaque em vermelho). Destaque feito do Perfil 8.

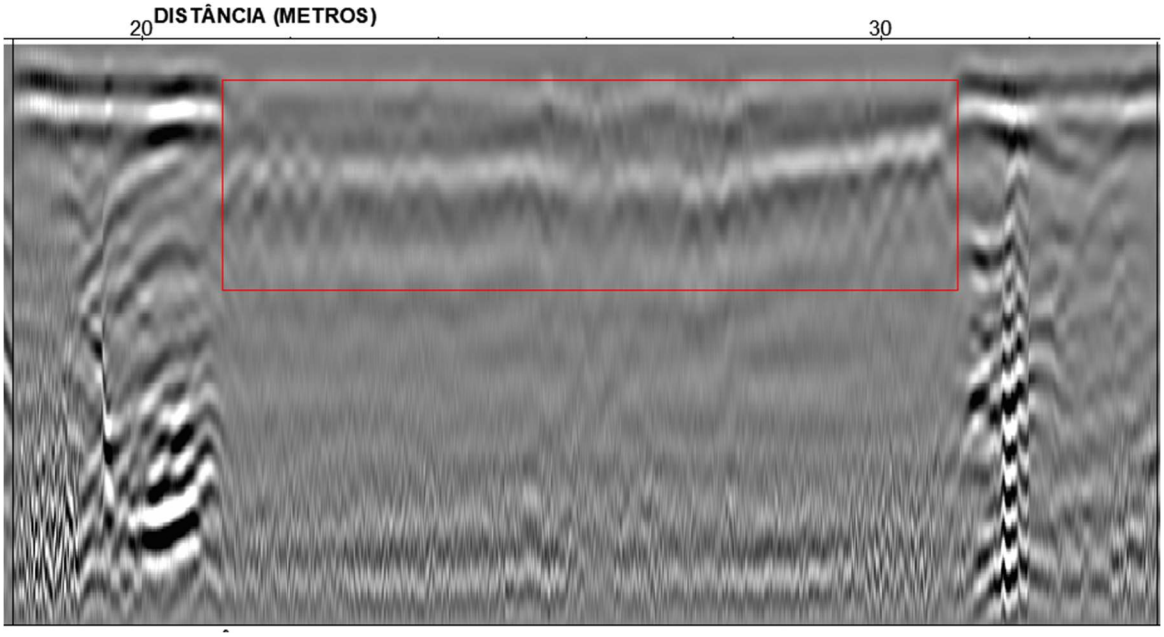


Figura 24 – assinaturas de possíveis vergalhões que compõem o concreto armado da área A2 (destaque em vermelho). Destaque feito do Perfil 8

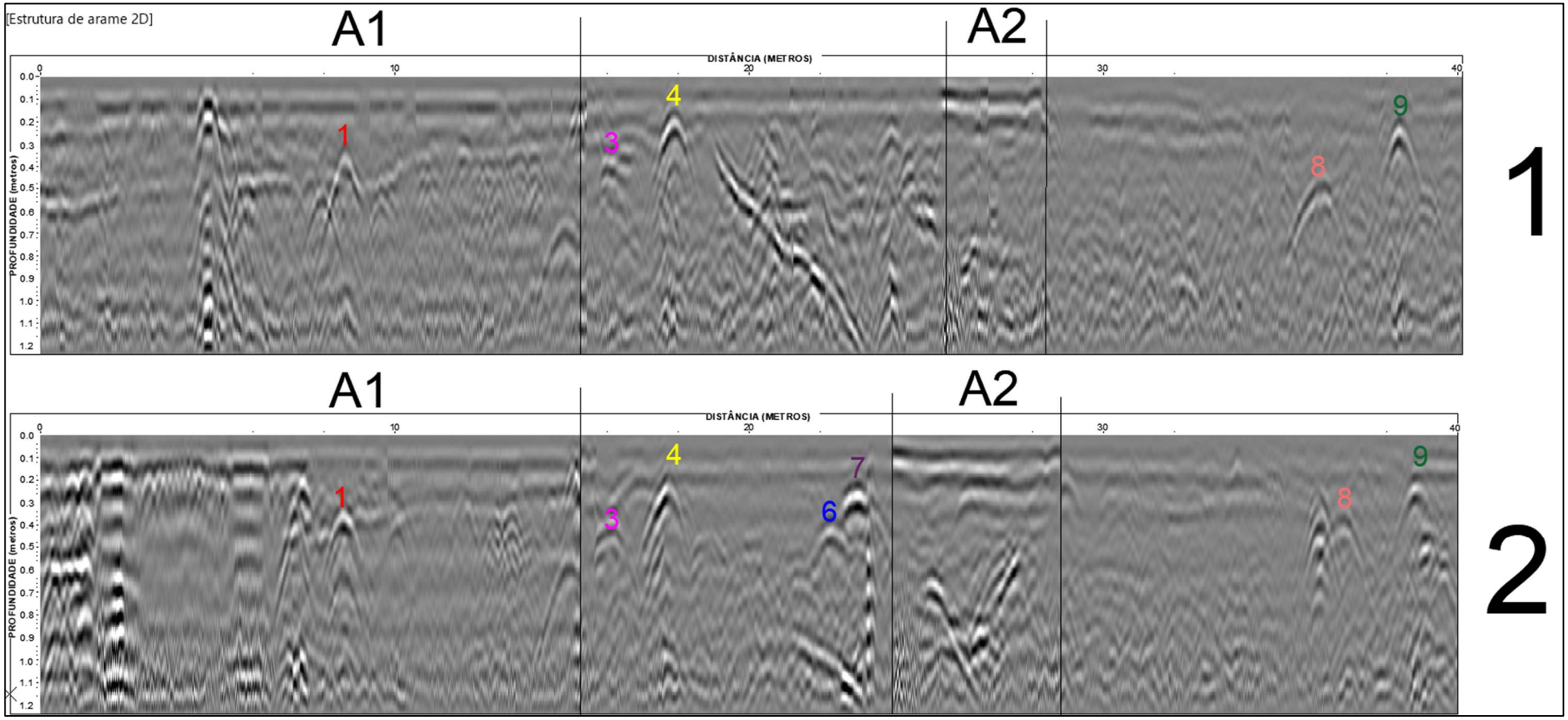


Figura 25 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 1 (acima) e 2 (abaixo). Os números coloridos representam as famílias de hipérboles.

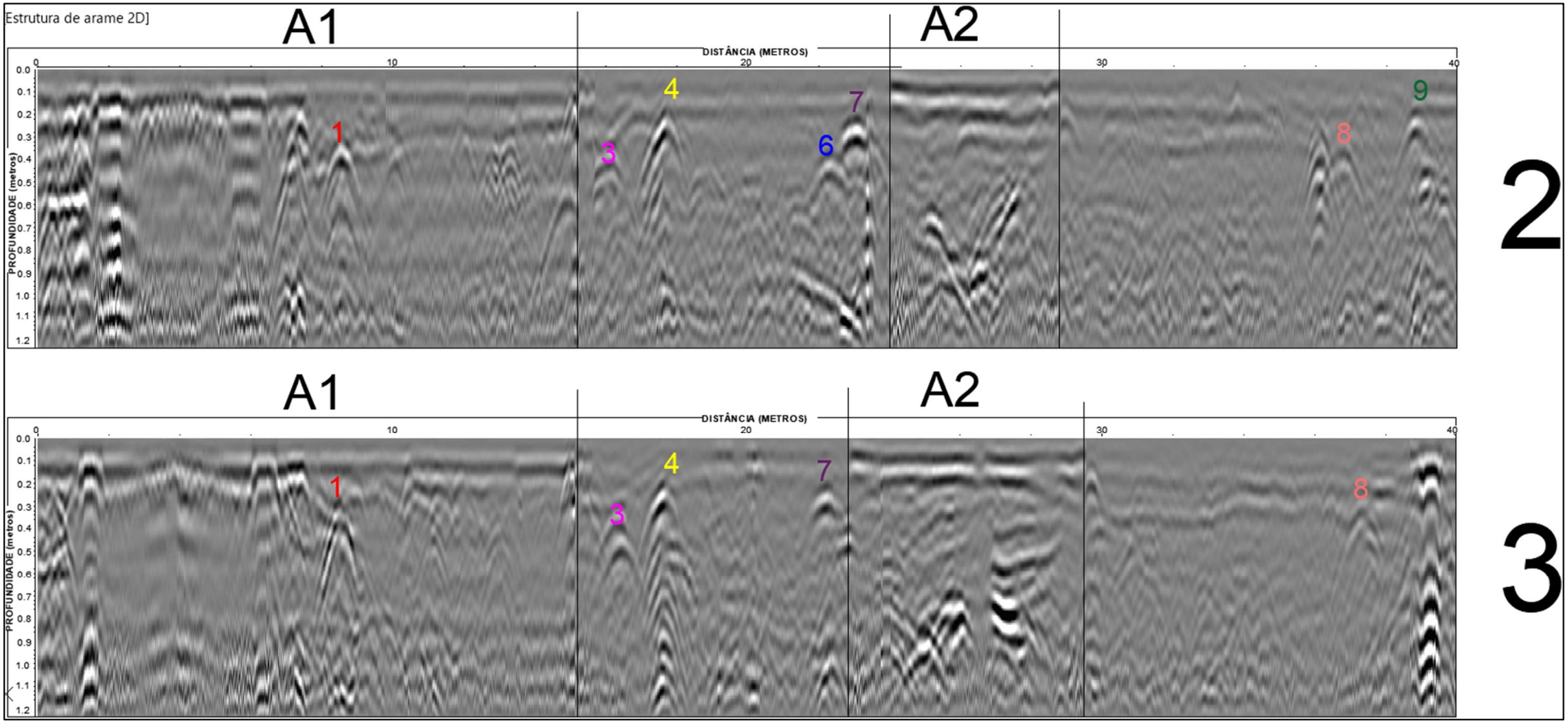


Figura 26 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 2 (acima) e 3 (abaixo).

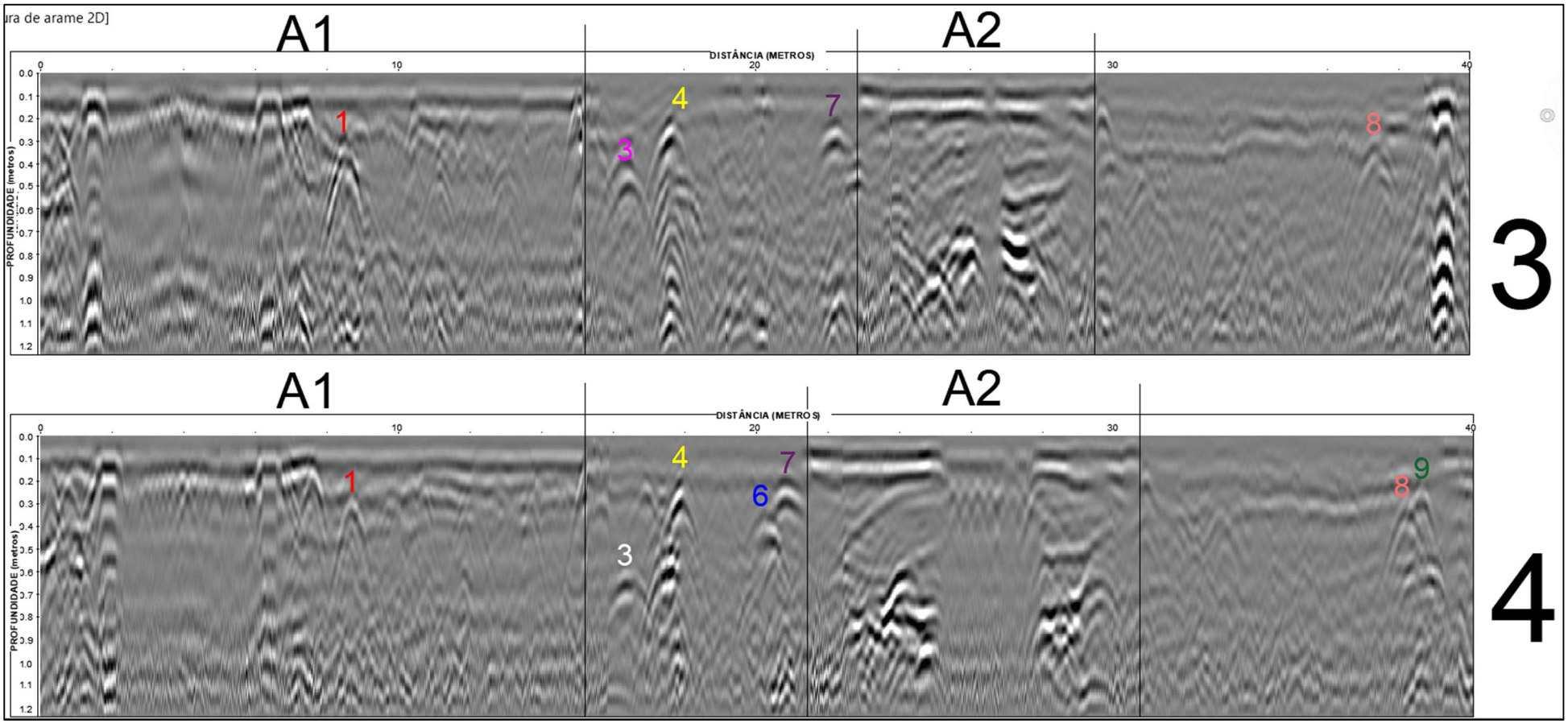


Figura 27 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 3 (acima) e 4 (abaixo).

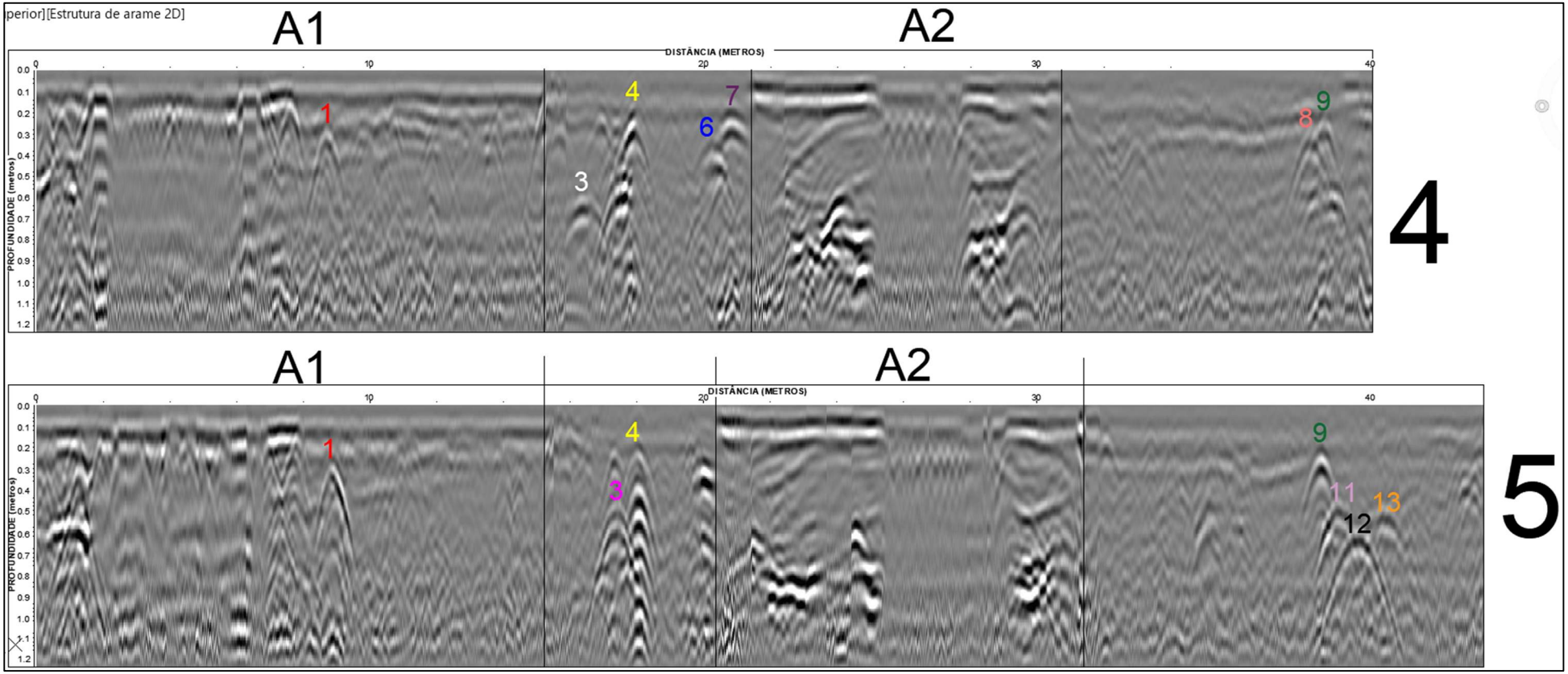


Figura 28 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 4 (acima) e 5 (abaixo).

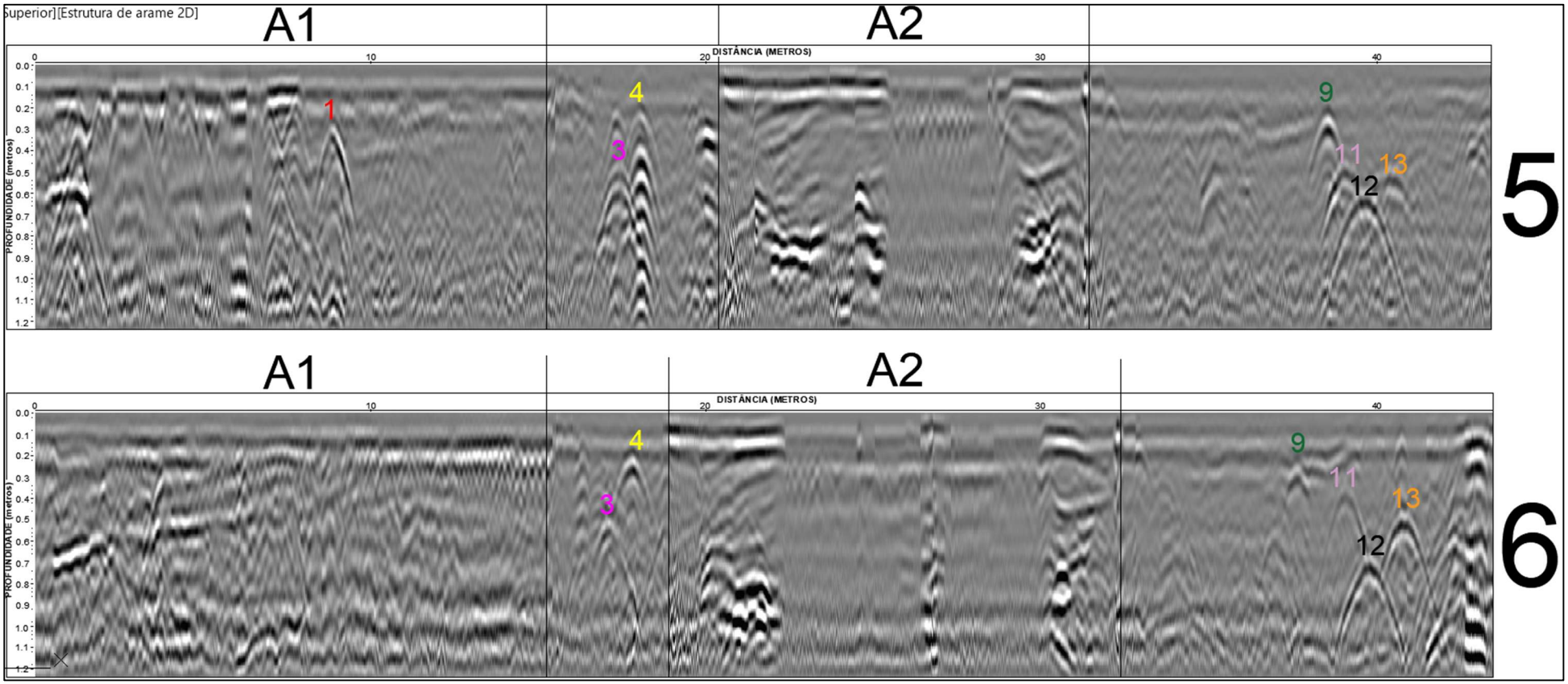


Figura 29 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 5 (acima) e 6 (abaixo).

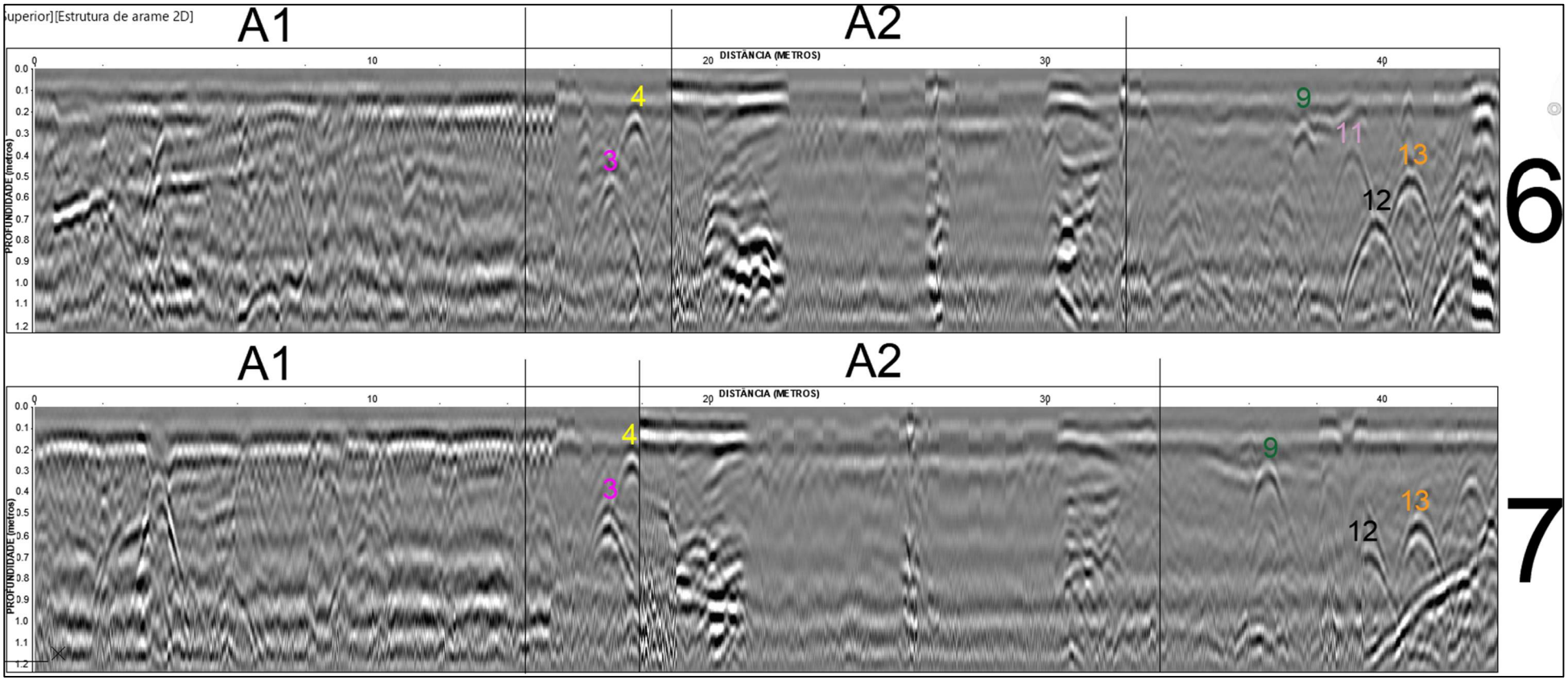


Figura 30 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 6 (acima) e 7 (abaixo).

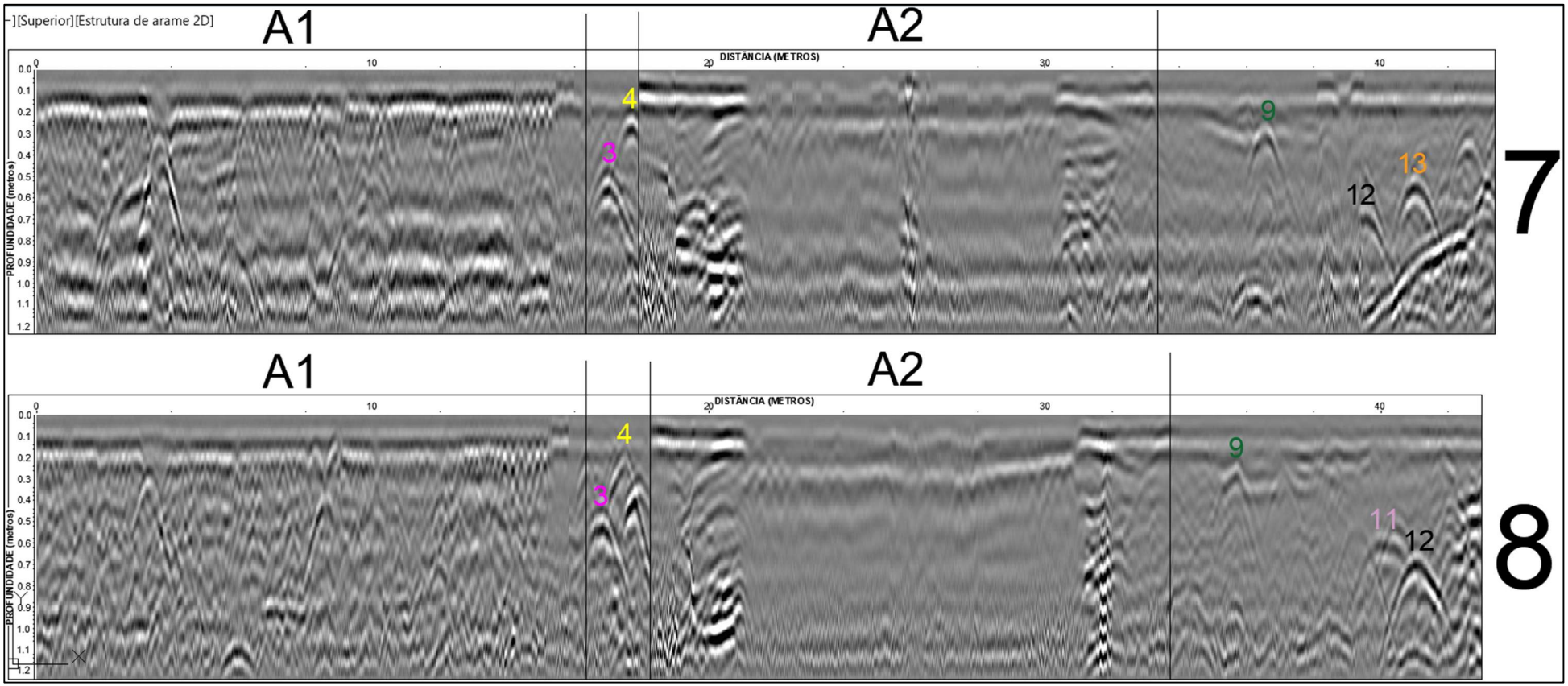


Figura 31 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 7 (acima) e 8 (abaixo).

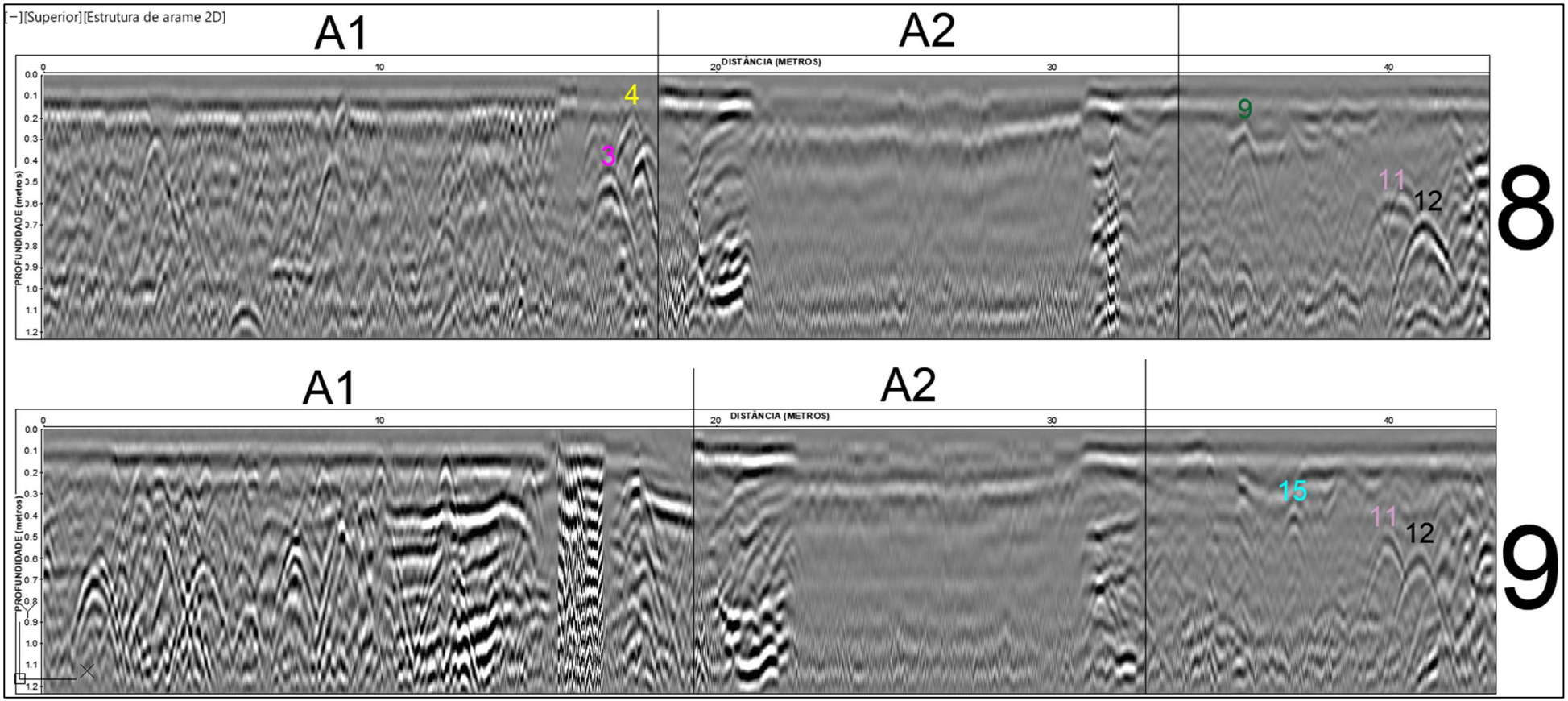


Figura 32 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 8 (acima) e 9 (abaixo).

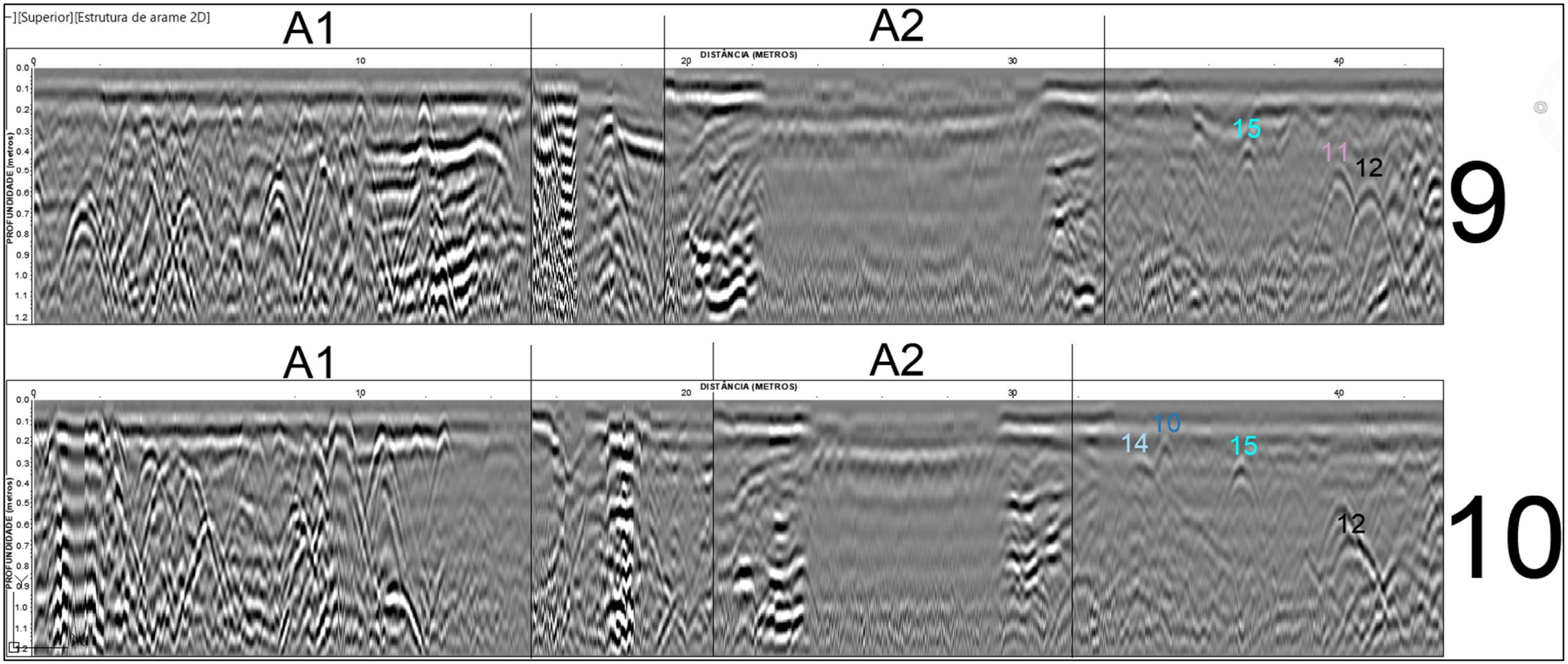


Figura 33 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 9 (acima) e 10 (abaixo).

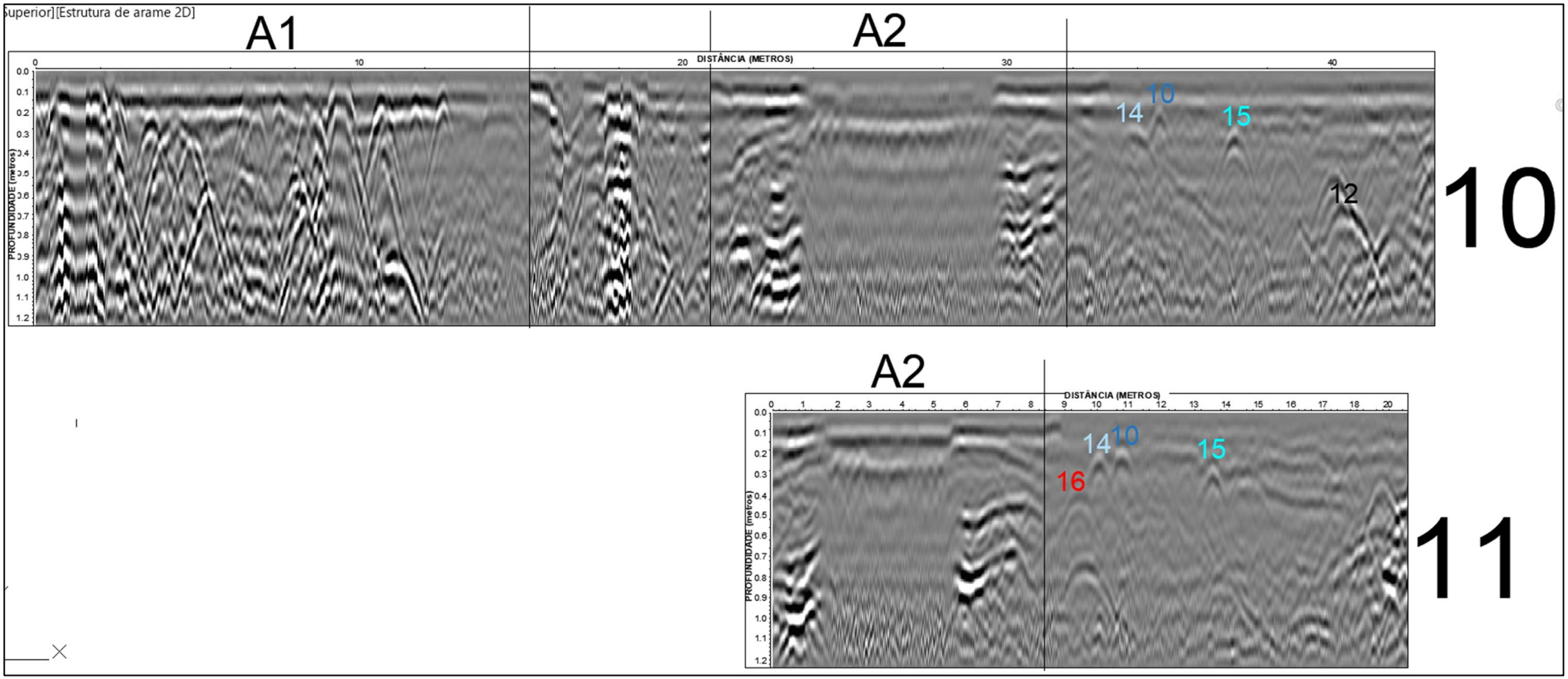


Figura 34 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 10 (acima) e 11 (abaixo).

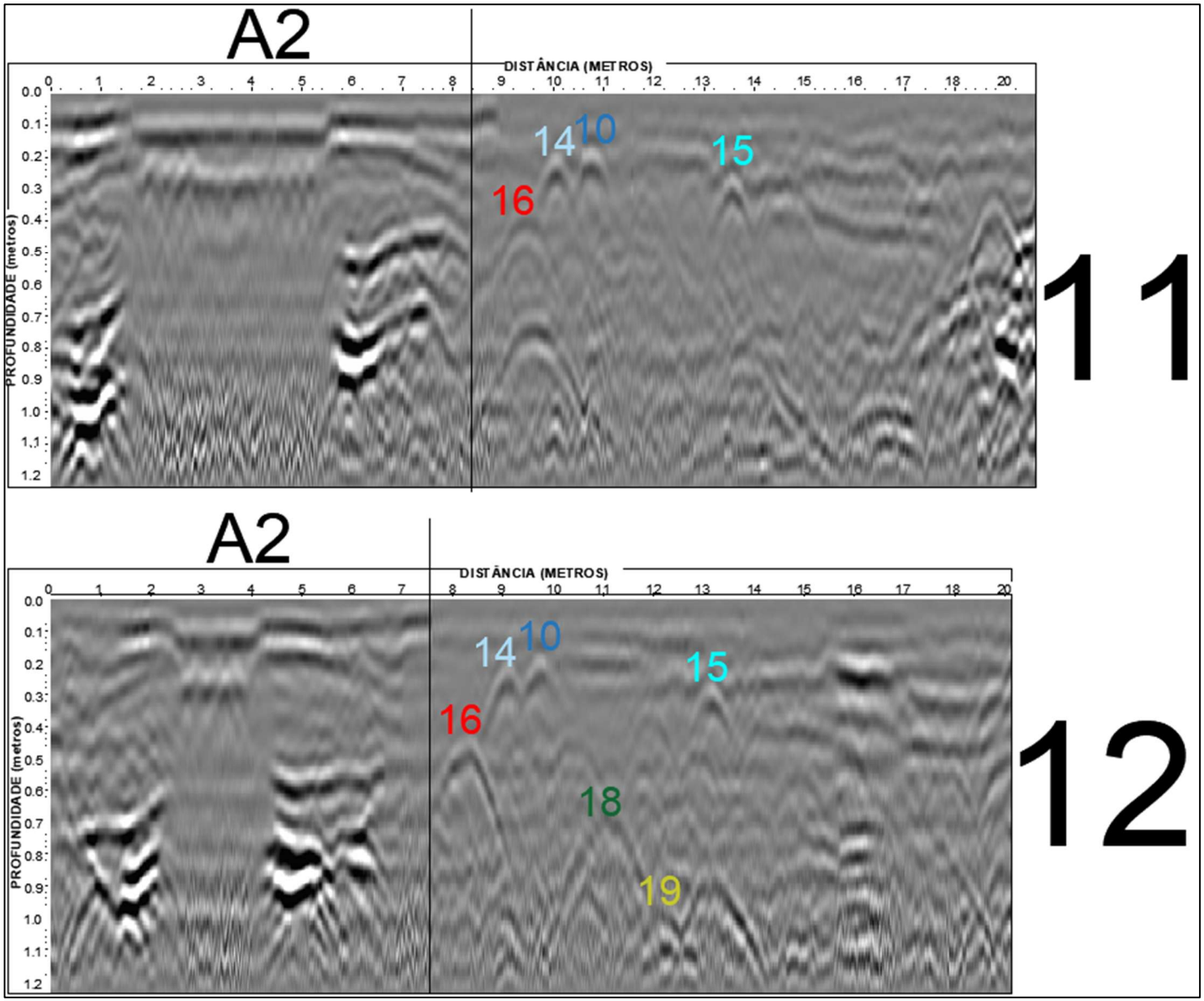


Figura 35 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 11 (acima) e 12 (abaixo).

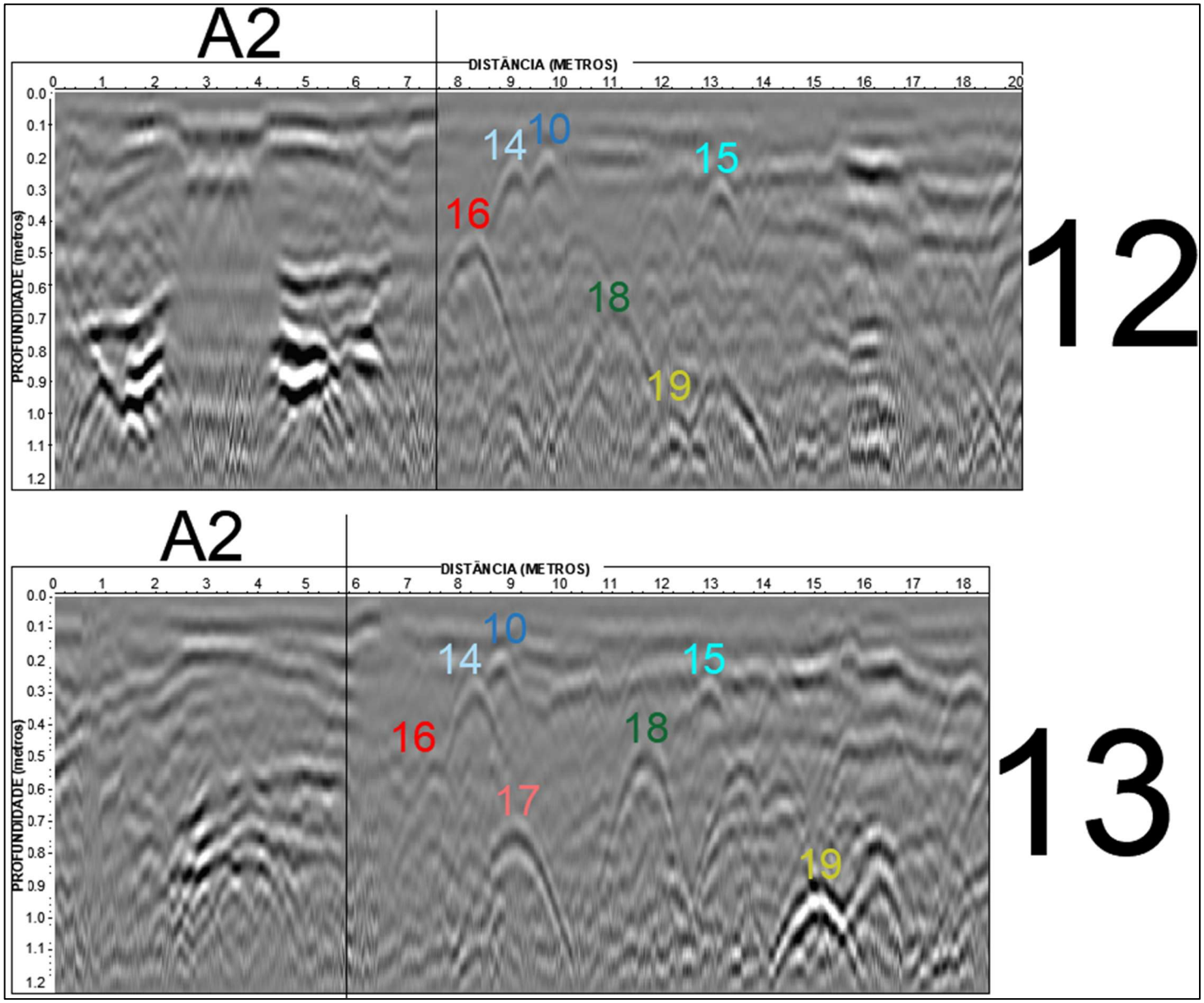


Figura 36 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 12 (acima) e 13 (abaixo).

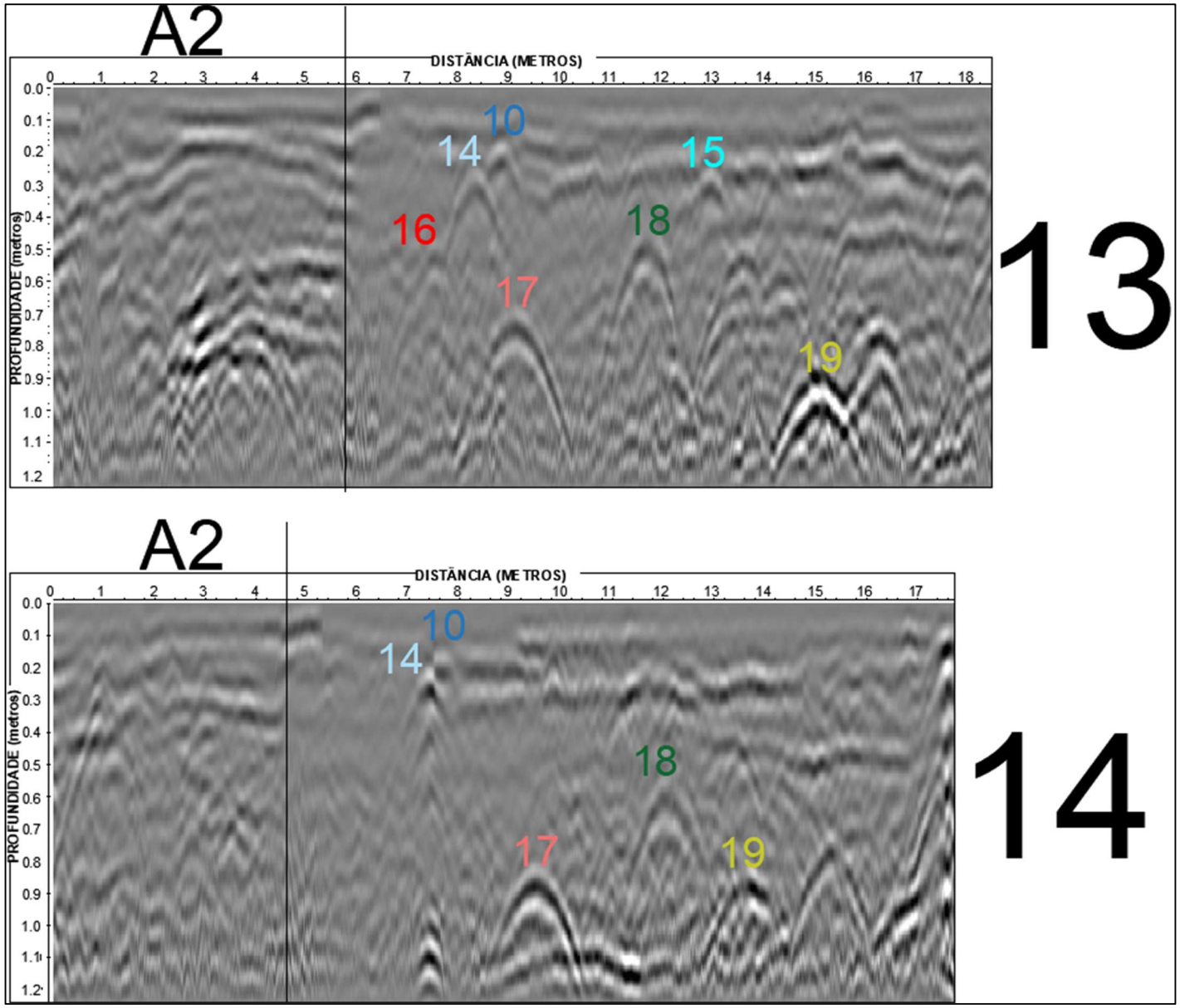


Figura 37 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 13 (acima) e 14 (abaixo).

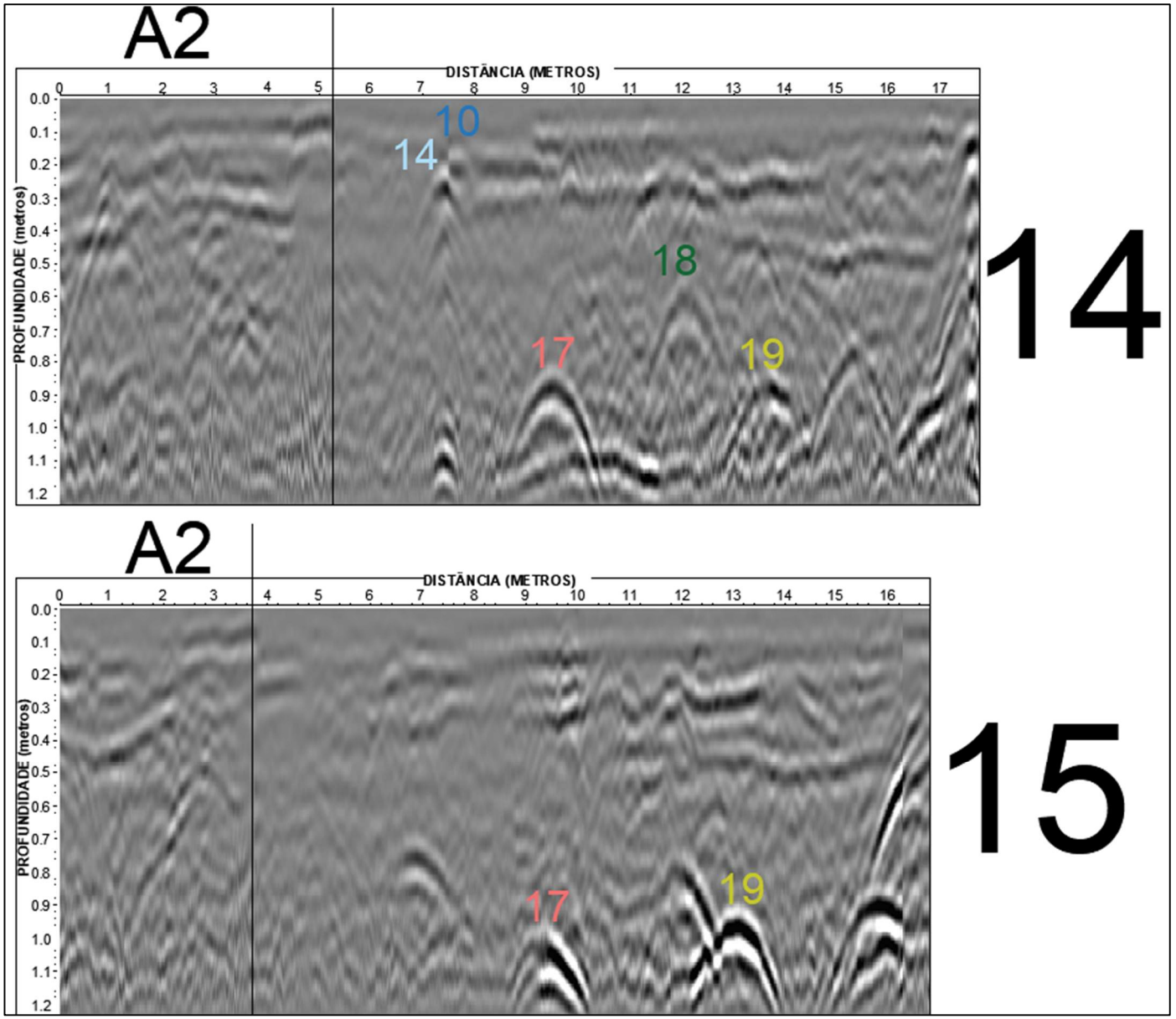


Figura 38 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 14 (acima) e 15 (abaixo).

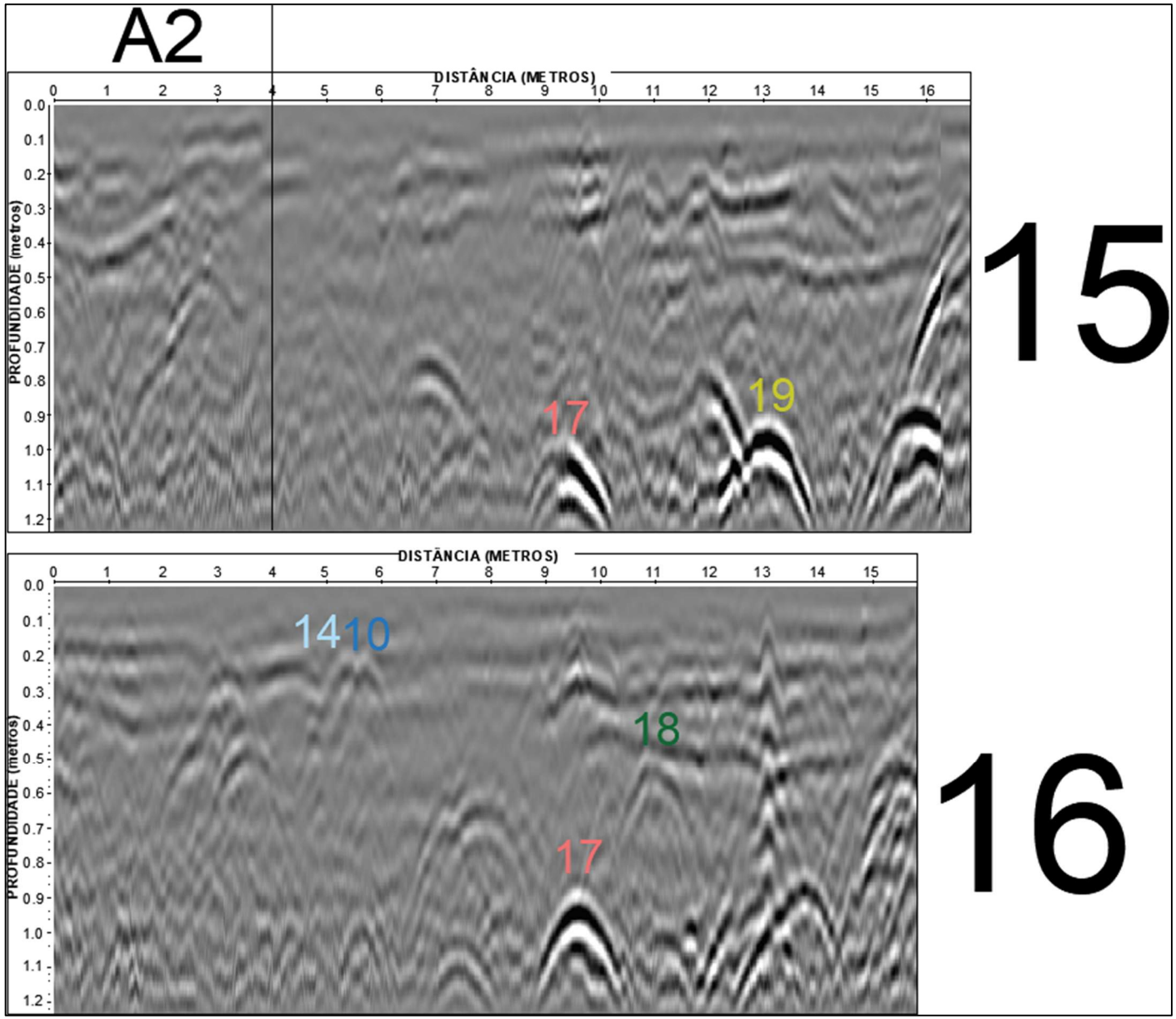


Figura 39 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 15 (acima) e 16 (abaixo).

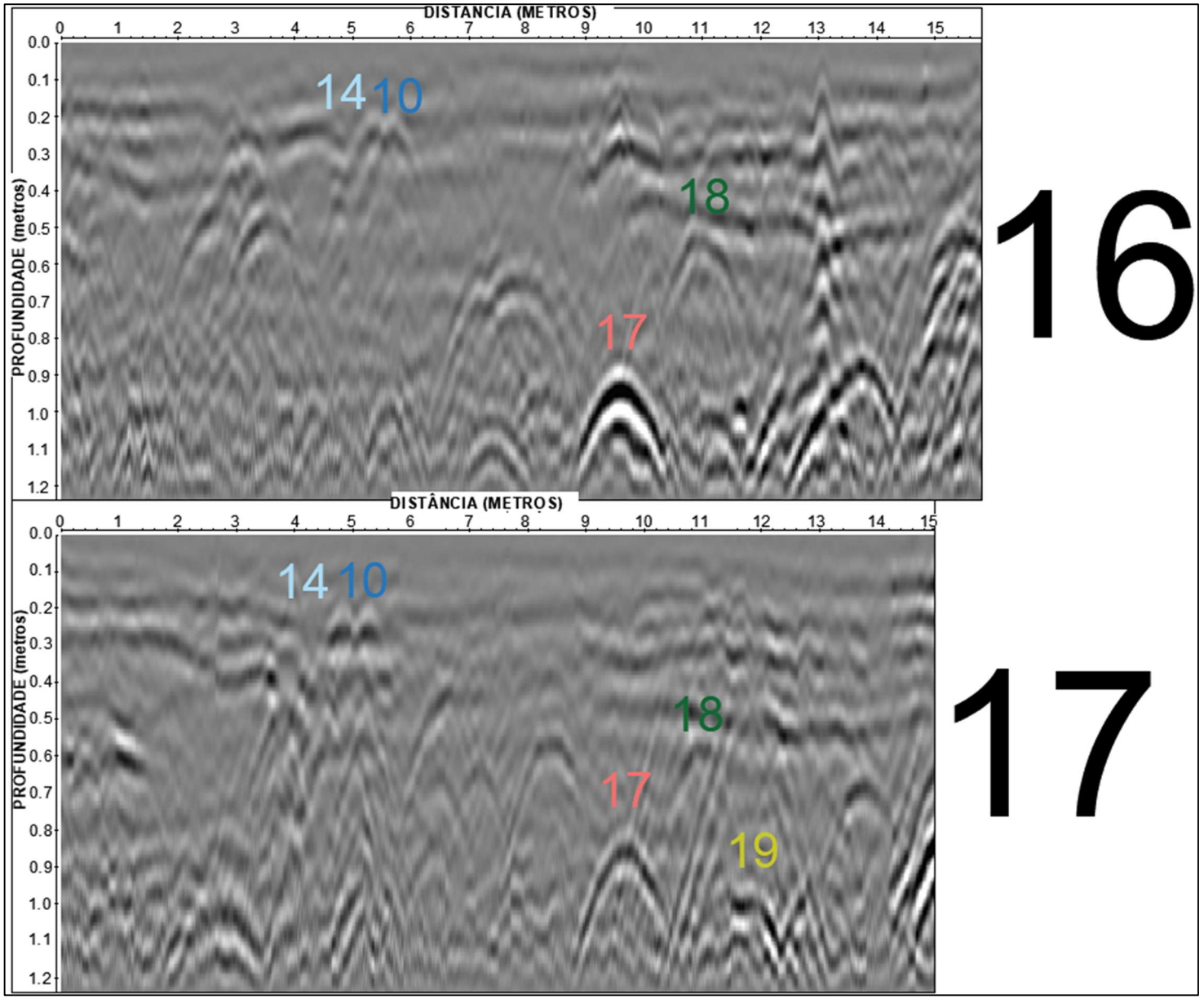


Figura 40 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 16 (acima) e 17 (abaixo).

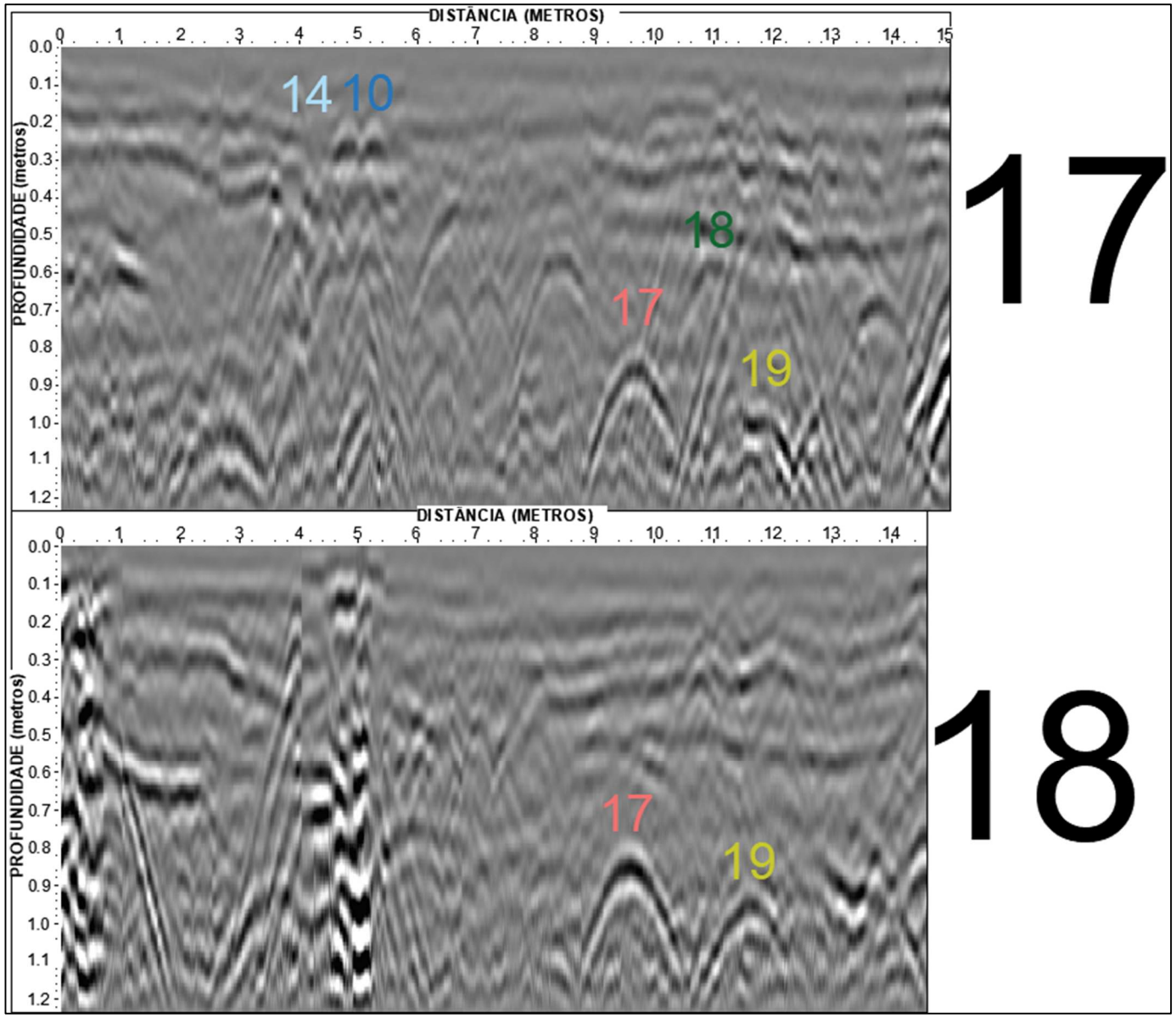


Figura 41 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 17 (acima) e 18 (abaixo).

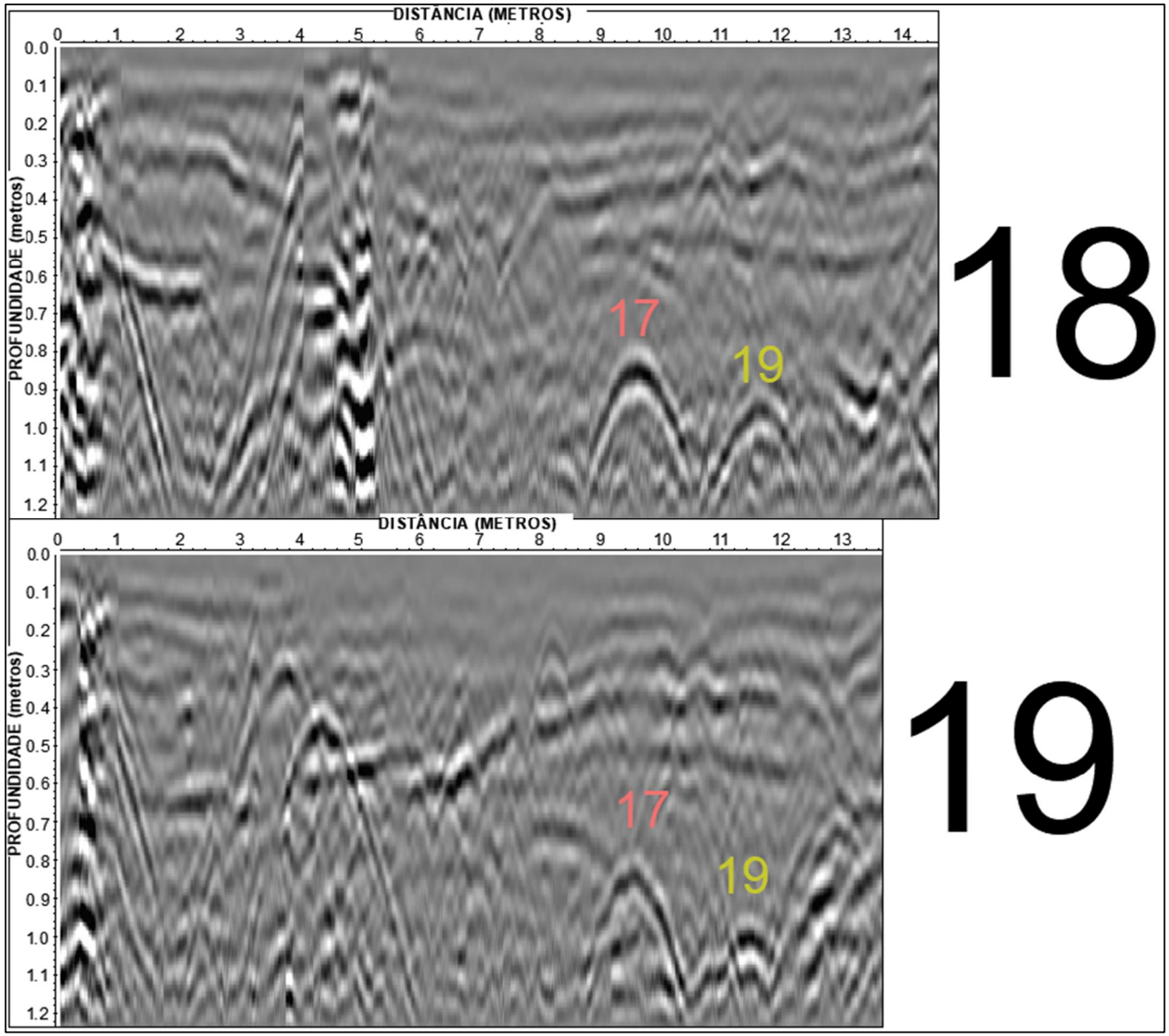


Figura 42 – Comparação entre os radargramas correspondente aos perfis 17 (acima) e 18 (abaixo).

Após a análise dos radargramas, foi medida a distância horizontal em que cada hipérbole estava em relação ao início de cada perfil, sendo que em seguida os pontos de mesmo número de hipérbole foram ligados, resultando no croqui da Figura 43, onde são estimadas a localização de algumas tubulações. O georreferenciamento dos croquis foi realizado no software *Qgis*, sendo possível gerar uma tabela das coordenadas UTM de cada posição que as hipérboles aparecerem nos perfis (Tabela 1). Outra informação importante para a aplicação do retrofit é a determinação dos diâmetros das tubulações, entretanto, conforme destacado por Prego (2017), essa medição é eficaz apenas quando é possível detectar as reflexões tanto na parte superior quanto na inferior do tubo, o que não foi o caso desse trabalho, sendo que todas as tubulações apresentaram apenas a hipérbole referente à parte superior. A ausência de tal reflexão provavelmente é explicada pelo fato de todas as tubulações identificadas nas caixas de inspeção estarem vazias ou preenchidas por fios.

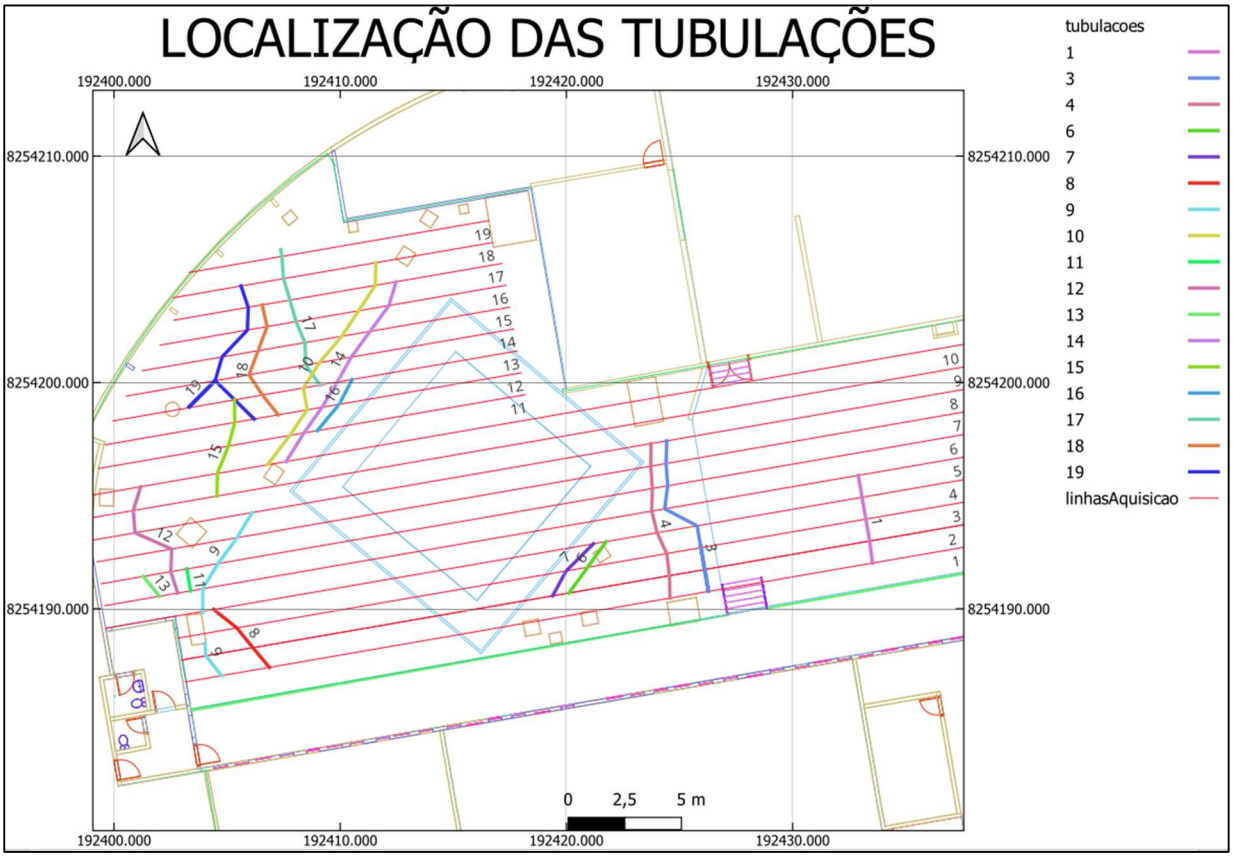


Figura 43 – possível localização de tubulações.

TUBULAÇÃO	COORDENADAS UTM	Coluna1
	x	y
1	192432,906	8254195,915
	192433,073	8254194,948
	192433,240	8254193,981
	192433,407	8254193,014
	192433,536	8254192,041
3	192426,285	8254190,788
	192426,117	8254191,754
	192425,950	8254192,721
	192425,783	8254193,688
	192424,349	8254194,436
	192424,482	8254195,455

	192424,412	8254196,438
	192424,438	8254197,438
4	192423,752	8254197,319
	192423,735	8254196,321
	192423,805	8254195,338
	192423,779	8254194,337
	192424,014	8254193,382
	192424,442	8254192,460
	192424,561	8254191,485
	192424,583	8254190,493
6	192420,123	8254190,718
	192421,763	8254192,990
7	192419,398	8254190,593
	192419,995	8254191,692
	192421,200	8254192,896
8	192404,416	8254189,995
	192405,444	8254189,177
	192406,152	8254188,303
	192406,880	8254187,434
9	192404,772	8254187,069
	192404,073	8254187,944
	192403,936	8254189,861
	192403,930	8254190,907
	192404,614	8254192,020
	192405,452	8254193,161
	192406,116	8254194,272
10	192411,585	8254205,306
	192411,562	8254204,307
	192410,079	8254202,059
	192409,095	8254200,893
	192408,383	8254199,774
	192408,550	8254198,807
	192407,779	8254197,678
	192406,797	8254196,381
11	192403,231	8254191,781
	192403,398	8254190,815
12	192401,190	8254195,412
	192400,864	8254194,359
	192400,944	8254193,378
	192402,561	8254192,661
	192402,525	8254191,659
	192402,828	8254190,716
13	192401,307	8254191,449
	192402,025	8254190,577
14	192407,619	8254196,523
	192408,407	8254197,787
	192409,207	8254198,921
	192409,881	8254200,033
	192410,497	8254201,135
	192412,164	8254203,415
	192412,481	8254204,465
15	192405,337	8254199,248

	192405,349	8254198,254
	192405,072	8254197,210
	192404,583	8254195,998
	192404,567	8254194,999
16	192408,997	8254197,889
	192409,961	8254199,051
	192410,539	8254200,147
17	192407,434	8254205,585
	192407,505	8254204,601
	192407,791	8254203,655
	192408,055	8254202,705
	192408,454	8254201,778
	192408,486	8254200,788
	192409,117	8254199,901
18	192406,564	8254203,443
	192406,779	8254202,484
	192405,982	8254200,355
	192406,575	8254199,462
	192407,273	8254198,587
19	192405,629	8254204,277
	192405,945	8254203,336
	192405,909	8254202,334
	192404,790	8254201,145
	192403,287	8254198,893
	192404,483	8254200,096
	192406,210	8254198,403

Tabela 1 – coordenadas em que as encanações foram identificadas nos radargramas.

O próximo passo foi comparar as localizações das tubulações aferidas por meio do GPR com as direções dos canos estimadas com uma bússola, conforme foi descrito na Etapa 2 (Mapeamento visual das tubulações). Foram identificadas as seguintes semelhanças:

1- **Caixa de inspeção C1 (figura 44):** as tubulações 9 e 11 apresentaram direções bastante semelhantes nos dados de GPR e da aferição com a bússola. Era de se esperar que as encanações que saem pelos lados maiores da caixa não fossem identificadas pois estão na direção paralela aos perfis levantados. Conforme é apresentado nas figuras 45 e 46, trata-se de tubos flexíveis, o que explica as curvas que são apresentadas no croqui.;
2- **Caixa de inspeção C5 (figura 47):** a direção da encanação 19 também foi bastante semelhante nas duas aferições. Conforme consta na figura 48, trata-se de tubo rígido, motivo pelo qual ele aparece retilíneo no croqui;
3- **Caixa de inspeção C6 (figura 49):** ambas as aferições apresentaram semelhança, sugerindo que tanto a encanação 9 quanto a 14 são ligadas na caixa C6. Conforme consta na figura 50, trata-se de tubo rígido, motivo pelo qual ele aparece retilíneo no croqui;
4- **Caixa de inspeção C10 (figura 51):** as duas medições indicam que a encanação 19 passam pela caixa C10. Os dois outros tubos presentes nesta caixa não se mostraram presentes nos radargramas. Trata-se de tubo flexível (figura 52), apresentando mudanças de direção no croqui;
5- **Caixa de inspeção C14 (figura 53):** a inspeção visual identificou a presença de vários tubos nesta caixa, porém nos radargramas foram identificadas apenas duas assinaturas, sendo os tubos 3 e 4. Isso pode ter acontecido em decorrência da junção das várias

hipérboles, resultando em apenas duas assinaturas. Trata-se de tubulações flexíveis (figura 54), apresentando mudanças de direção no croqui;

6-

7- **Caixas de inspeção C15 e C17 (figura 55):** as aferições indicaram que o tubo 6 liga-se aos dois lados menores da caixa C15 e o 9 liga-se à caixa C17.

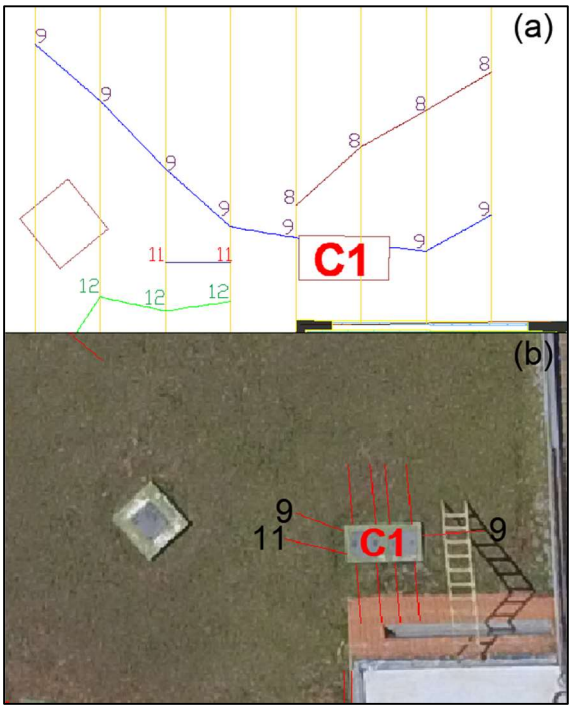


Figura 44 – direções dos tubos 9 e 11 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).



Figura 45 – Tubulações 9 (lado esquerdo) e 11 da caixa de inspeção C1.



Figura 46 – Tubulação 9 (lado direito) da caixa de inspeção C1.

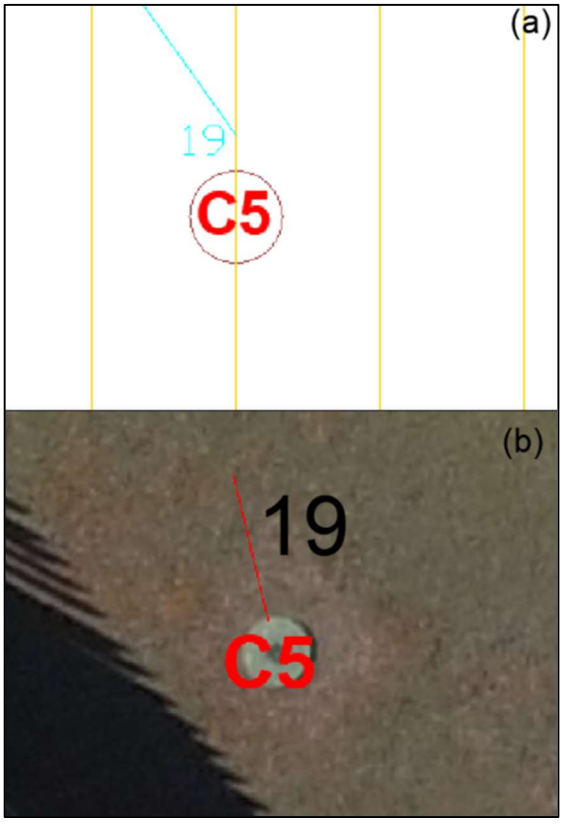


Figura 47 – direção do tubo 19 aferida por radargramas (a) e inspeção visual(b).



Figura 48 – Tubulação 19 da caixa de inspeção C5.

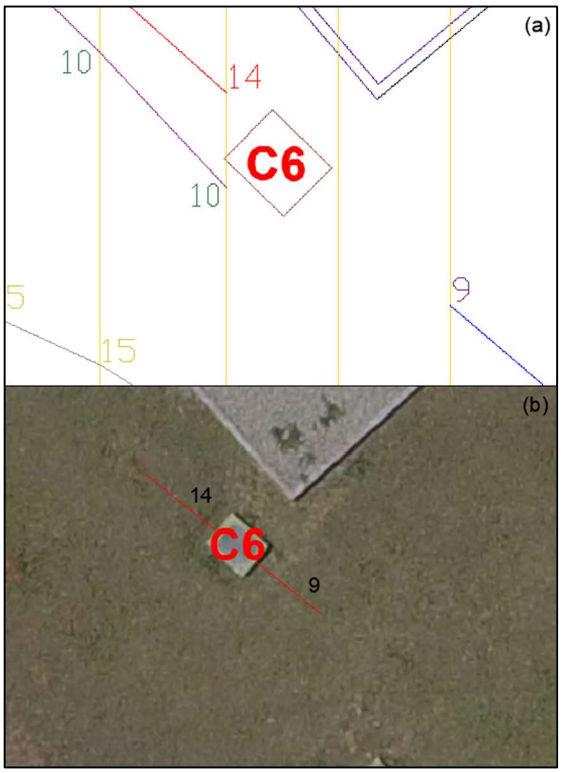


Figura 49 – direções dos tubos 9 e 14 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).


Figura 50 – Tubulações 9 e 14 da caixa de inspeção C6.

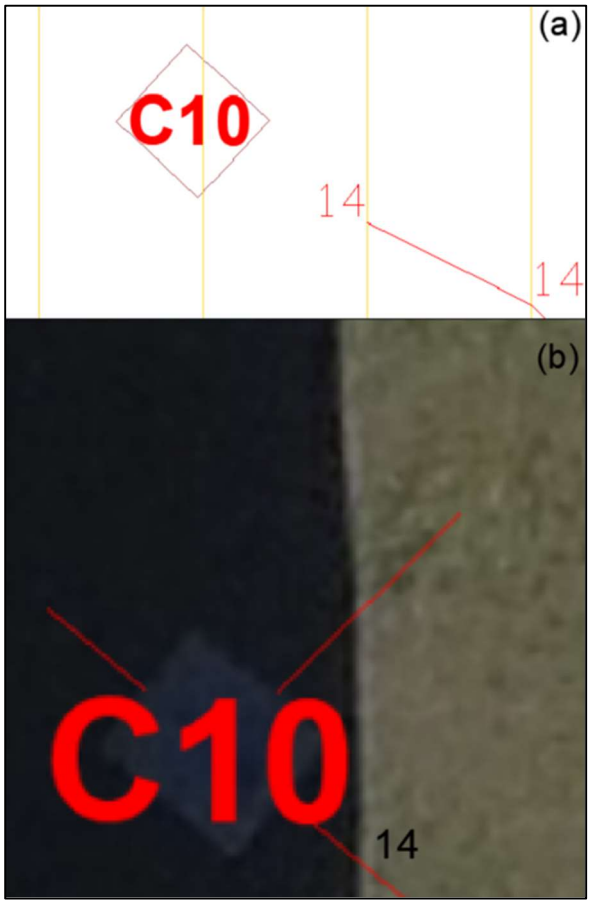


Figura 51 – direção do tubo 14 aferida por radargramas (a) e inspeção visual(b).


Figura 52 – Tubulação 14 da caixa de inspeção C10.

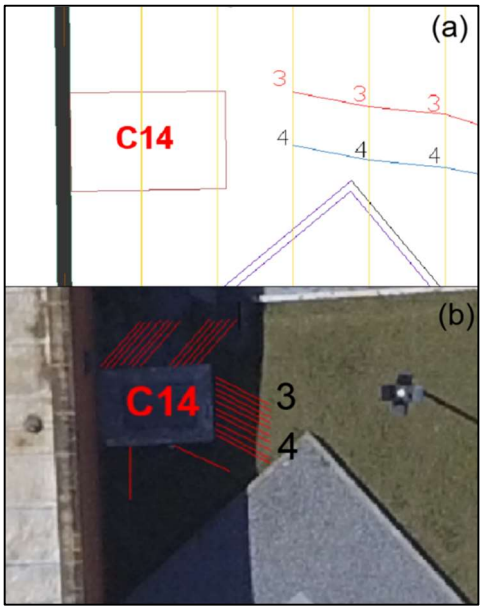


Figura 53 – direções dos tubos 3 e 4 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).


Figura 54 – Tubulações da caixa de inspeção C14.

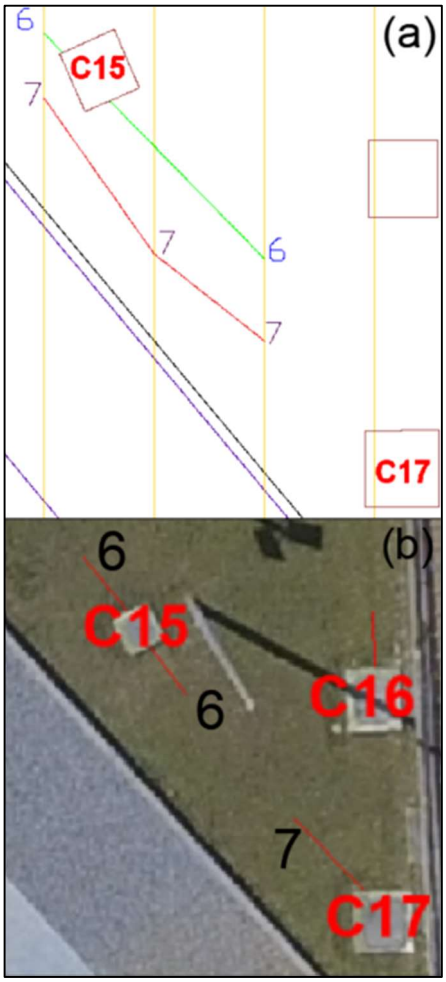


Figura 55 – direções dos tubos 6 e 7 aferidas por radargramas (a) e inspeção visual(b).

4. Conclusões

Por meio dos perfis gerados neste estudo, foi possível identificar a presença de hipérboles características de tubulações, de forma que a continuidade dessas assinaturas em diferentes perfis, juntamente com as direções aproximadas obtidas por meio da inspeção visual, sugere que os condutos estão localizados nos pontos marcados no croqui. Uma informação importante para obter o *As Built* das instalações, visando auxiliar no processo de *retrofit*, é a aferição dos diâmetros dos elementos. No entanto, essa medida tornou-se inviável devido à limitação da detecção apenas das reflexões superiores dos elementos. Isso pode ser atribuído ao fato de as tubulações estarem vazias ou preenchidas por fios, o que limitou a obtenção de informações detalhadas sobre a parte inferior dos tubos.

Também é possível que tubos de diâmetros pequenos não tenham sido identificados em decorrência da resolução oferecida pela antena de 400 Mhz, de forma que se sugere para pesquisas futuras a utilização de antenas com frequências diferentes, incluindo frequências mais altas (por exemplo, 1 GHz ou superior) que podem fornecer uma melhor resolução, embora alcance uma profundidade menor do que antenas de menores frequências, como a de 400 Mhz.

É importante destacar que interferências, como a presença de vergalhões em áreas pavimentadas, podem representar desafios na identificação de tubulações em determinadas regiões. Condutos que apresentam direção paralela aos perfis não forma identificados, sendo interessante a realização de perfis perpendiculares aos já realizados.

Para estudos futuros sugere-se a realização de uma malha contendo perfis perpendiculares entre si utilizando antenas de 400 Mhz e 2600 Mhz, com uma distância de 50 centímetros entre as linhas, de forma que se obtenha uma amostragem maior do subsolo. Outro ponto importante seria a realização de perfis ao redor de cada caixa de inspeção para se obter a assinatura característica de cada tipo de tubulação a fim de comparar as hipérboles ao longo dos perfis. A realização de testes laboratoriais para identificar os tipos de solo presentes no terreno é de suma importância para confirmar a atenuação dos sinais que provavelmente foram causados pela presença de argila. Por fim, tendo em vista que o GPR consiste em um método indireto, sugere-se a realização de pequenas escavações nas coordenadas onde as hipérboles apareceram, tendo como objetivo a validação dos dados.

Apesar das limitações apresentadas, os resultados obtidos são promissores na identificação de tubulações, evitando escavações desnecessárias e proporcionando informações importantes sobre a localização das tubulações enterradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors; Software, Inc. Internal Report, Canadá, 2001, 130p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.575-1: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626 (1998). Instalação Predial de água fria, projeto e execução

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626 (2020). Instalação Predial de água fria e água quente.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8160 (1999). Sistemas prediais de esgoto sanitário, projeto e execução.

BORGES, W.R. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. 2007. 256p. Tese (doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 2007.

CAVALCANTE, Felipe Martins. Aplicação de inovações tecnológicas e de novos sistemas construtivos nas instalações hidráulicas e sanitárias: um ganho na produtividade. 2019. 83 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

CREDER, Hélio 1926-2005. Instalações Hidráulicas e Sanitárias / Hélio Creder. 6° ediçãoRio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.

DANIELS, D.J. Surface-Penetrating Radar, Institute of Electrical Engineers - IEE, London, 300 p. 1996.

DUARTE, O. de O., 2003. Dicionário Enciclopédico Inglês - português de Geofísica e Geologia. 2.° ed., SBGf/Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, 352p.

Ghozzi, R., Lahouar, S., Besbes, K., & Souani, C. "Mapping of sewer lines using GPR: a case study in Tunisia." Data 3.4 (2018): 40.

Hayakawa, H. & Akira K. "Radar imaging of underground pipes by automated estimation of

velocity distribution versus depth." Journal of Applied Geophysics 40.1-3 (1998): 37-48.

Jacob, Robert W., and T. M. Urban. "Ground-penetrating radar velocity determination and precision estimates using common-midpoint (CMP) collection with hand-picking, semblance analysis and cross-correlation analysis: A case study and tutorial for archaeologists." Archaeometry 58.6 (2016): 987-1002.

JOL, H. M. Ground penetrating Radar: Theory and Applications. Ed Elsevier Science. 1. ed. 2009. 524 p.

MARQUES DE JESUS, C.R. Análise de Custos para Reabilitação de Edifícios para Habitação. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008, p. 128;

MORAES, V. T. F. Propostas e diretrizes para projeto de "Retrofit". O caso de uma edificação para atividade de ensino. 2011. 199p. Dissertação (Mestrado em Sistema deGestão), - LATEC - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

MOREIRA, Gabriela Lúcia Andrade. Inovação tecnológica e aplicação de novos sistemas construtivos nas instalações hidráulicas e sanitárias. 2010. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

OKUBARA, T. F. Projeto de retrofit de galpão de triagem de recicláveis visando baixo custo operacional. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

PORSANI, J. L. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p, 1999.

F.J. Prego, M. Solla, I. Puente, P. Arias . Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes. NDT & E International, v. 91, p. 22-31, 2017.

QUALHARINI, E., L., Retrofit de construções: metodologia de avaliação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO,10, 2004, São Paulo. Construção Sustentável. São Paulo, 2004.

Apolônio, R. M., L. G. Omar, J. M. H. Jesus, M. C. J. A. Nogueira, B. C. Carvalho. Proposta de retrofit para um edifício histórico seguindo os princípios de sustentabilidade, 2010.

SILVA, E. G. da. Retrofit em edifício público com ênfase na segurança e funcionalidade edilícia: intervenção projetual na sede administrativa do Centro de Tecnologia (CT/UFRN). 2021. 138f. Dissertação (Mestrado Profissional em Arquitetura, Projeto e Meio Ambiente) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

YELF, R.J. Application of Ground Penetrating Radar to Civil and Geotechnical Engineering. Electromagnetic Phenomena, V.7, n.1 (18), 2007, p. 102-117, 2007.