

## APLICAÇÃO DO GEORADAR EM PROTÓTIPO DE PAVIMENTO DE CONCRETO - SÍTIO GEOFÍSICO DA UEG - ANÁPOLIS / GO

37

## APPLICATION OF GEORADAR IN CONCRET OF PAVEMENT PROTOTYPE - UEG GEOPHYSICAL SITE - ANÁPOLIS / GO

**Prof. Dr. ANTÔNIO LÁZARO FERREIRA SANTOS**  
Universidade Estadual de Goiás, Campus Central, Anápolis / GO  
antoniolazaros@gmail.com

**BRUNO BARBOSA SANTOS**  
Graduado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás,  
Campus Central, Anápolis / GO  
brunobsantos@outlook.com

**Prof. Dr. TULE CÉSAR BARCELOS MAIA**  
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental,  
Goiânia / GO  
tulebarcelos@gmail.com

**Resumo:** A interpretação de dados advindos de investigações geofísicas rasas pode ser complexa devido às incertezas a respeito dos alvos em subsuperfície. Para reduzir as ambigüidades e auxiliar a interpretação dos dados geofísicos de superfície foi instalado no câmpus da UEG o Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicado a Engenharia SCGR-ENG da UEG. Para avaliação das camadas que compõem o pavimento, foi utilizado o equipamento SIR 4000 (fabricado pela *Geophysical Survey Systems – GSSI*), acoplado a uma antena blindada de 900 e 2000 MHz. O processamento dos dados ocorreu no software Radan, versão 7.0. A rotina de processamento consistiu na aplicação de filtro temporal (*dewow*), de ganho manual (*manual gain* (y), migração e conversão de tempo em profundidade (velocidade constante). O presente artigo, apresenta os resultados das aquisições de dados com GPR, no sítio controlado, na detecção da espessura de pavimento de concreto e vergalhões. A aplicação utilizando da combinação das frequências de 900 e 2000 MHz, na produção de dados de radargramas possibilitaram a identificação de cada camada do pavimento com suas respectivas profundidades, apresentando resultados satisfatórios, tendo em conta que é possível identificar a parte superior e inferior do pavimento, assim como, os vergalhões inseridos na camada de concreto.

**Palavras-chave:** Sítio Controlado. Georadar. Pavimento de concreto.

**Abstract:** The data interpretation from shallow geophysical survey can be complex because the uncertainty about subsurface targets. To reduce the ambiguity and help in the interpretation of geophysical data, the Shallow Geophysical Test Site of UEG-CCET was installed inside the câmpus at UEG. To evaluate the layers that make up the pavement, the SIR 4000 equipment (manufactured by Geophysical Survey Systems – GSSI) was used, coupled to a shielded antenna of 900 and 2000 MHz. Data processing took place in the Radan software, version 7.0. The processing routine consisted of the application of temporal filter (*dewow*), manual gain (*manual gain* (y), migration and conversion of time into depth (constant speed). This article presents the results of data acquisitions with GPR, in the controlled site, in the detection of the thickness of concrete pavement and rebar. The application using the combination of the frequencies of 900 and 2000 MHz, in the production of radargram data allowed the identification of each layer of the pavement with its respective depths, presenting satisfactory results, taking into account that it is possible to identify the upper and lower part of the pavement, as well as the rebar inserted in the concrete layer.

**Keywords:** Controlled Site. Ground Penetrating Radar. Concret pavement.

## Introdução

O sistema de transporte rodoviário tem um papel importante na sociedade de hoje com influência direta em seu desenvolvimento econômico. O efeito das cargas dos veículos é a principal causa da deterioração do pavimento ao longo do tempo, seguido pela influência das condições meteorológicas e erros em projeto ou construção que podem intensificar esses efeitos, resultando em uma rápida degradação do pavimento (BENEDETTO *et al.*, 2011).

No intuito de avaliar a condição de uma via se faz necessária à obtenção de variadas informações do subsolo e do revestimento do pavimento que podem ser feitas por métodos de verificação direta no campo ou através de investigações indiretas. Os métodos diretos são conhecidos como sondagens clássicas, classificadas como métodos destrutivos, pois necessitam fazer aberturas no pavimento para retirada de amostras para análise e investigação. Já os métodos geofísicos conhecidos como Ensaios Não Destrutivos (END), têm como exemplo o (GPR) *Ground Penetrating Radar* de características não invasivas e baixo custo de operação, vêm mostrando bons resultados e sendo amplamente utilizados em estudos em engenharia. Sua aplicação ocorre para mapeamento de estruturas enterradas em subsuperfície (tubulações, caixas, etc), como também, para caracterização de estruturas diversas, como as de revestimentos flexíveis e rígidos, proporcionando a identificação de rupturas e irregularidades normalmente ocorrentes (SOLLA *et al.*, 2011).

Dentro da faixa de operação, seus comprimentos de onda, em geral centimétricos o método radar de penetração é mais explicitamente dedicado às investigações de pavimento (WU; LI *et al.*, 2002). A aplicação do GPR em infraestruturas rodoviárias centra-se principalmente na avaliação de pavimentos como um levantamento complementar, juntamente com métodos mais tradicionais, como inspeção visual, sistemas de perfuração, amostragem, deflexões e monitoramento de resposta dinâmica. Em alguns casos, o GPR também é combinado com termografia infravermelha e varredura a laser.

O uso do GPR como método geofísico na avaliação de pavimentos é recomendado nas normas da AASTHO (*Association of State Highway Transportation*

*Officials*) e da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D4748-98, que apresentam os procedimentos para a inspeção das camadas superiores de pavimentos flexíveis e rígidos. Nos pavimentos de concreto, o GPR é utilizado para medir a espessura da laje de concreto e detectar a localização das barras de reforço (vergalhões).

A avaliação para detectar rachaduras e vazios é outra aplicação em pavimentos de concreto (RASOL *et al.*, 2020a; RASOL *et al.*, 2020b; RASOL *et al.*, 2020c), além da estimativa das características mecânicas das camadas de pavimento (BENEDETTO *et al.*, 2011). Estudos recentes mostram bons resultados do método GPR na identificação de espessuras de revestimentos (BORGES *et al.*, 2014; VIEIRA; GANDOLFO, 2013), na identificação de manta de impermeabilização e a espessura do concreto secundário.

Neste contexto, visando a aplicação do método GPR em protótipo de pavimento de concreto na área do Câmpus de Ciências Exatas e Tecnológicas Henrique Santillo da Universidade Estadual de Goiás (UEG) em Anápolis, GO iniciou-se em 2014, os primeiros trabalhos de geofísica aplicada a engenharia civil, com o intuito de determinar as espessuras das camadas do pavimento da rodovia do Câmpus (SANTOS *et al.*, 2015). Em 2018, visando ampliar os estudos de geofísica rasa, foi proposta a criação de um Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicada a Engenharia (SCGRA-ENG) em parceria com o Tribunal de Contas do Estado de Goiás, com o intuito de subsidiar fiscalizações de obras públicas. Com a instalação do SCGRA-ENG, foi dado um importante passo para melhorar o conhecimento relativo às respostas geofísicas de alvos rasos como os encontrados nos estudos de engenharia.

O presente artigo tem como objetivo a utilização do GPR, como Ensaio Não Destrutivo (END), na definição da espessura e estrutura de um protótipo de revestimento na área do SCGRA-ENG, trazendo os resultados fim de verificar o grau de detalhamento e resolução do método geofísico.

## Metodologia

40

### Área experimental

O pavimento flexível situa-se na área do sítio geofísico da UEG, Câmpus Central - CET, figura 1, na cidade de Anápolis, Estado de Goiás, (719310.55 m E; 8187994.65 m N), WGS-84, fuso 22, próximo à rodovia BR-153 (SILVA, 2019).



Figura 1: Localização da área de estudo. Fonte: Autores, 2020.

Na área de estudo foi construída uma seção de teste experimental para simular um pavimento de concreto e avaliar a viabilidade do uso do método GPR, como método não destrutivo (END) para analisar o seu comportamento.

O modelo físico foi construído em uma seção de pavimento de concreto com uma profundidade máxima de 140 cm e uma área com dimensões 40,0 cm m de largura e 90,0 cm de comprimento, totalizando 0,36 m<sup>2</sup>.

Para a construção do pavimento, o solo foi escavado utilizando-se uma retroescavadeira. Na figura 2 é apresentada a divisão bem como a composição adotada para o experimento com base na norma do DNIT (2006), as quais incluem: a) o Revestimento; b) a Sub-base e c) o Subleito. A estrutura da seção do pavimento compreende as seguintes camadas:

**Revestimento:** Camada constituída de uma placa de concreto com dimensões de 90 cm x 140 cm laterais x 10 cm de profundidade. O traço do concreto utilizado foi calculado para ter um uma resistência característica do concreto à compressão (fck) igual a 25 MPa e um abatimento igual a  $120 \pm 20$  mm. Além disso, para a sua fabricação foram utilizadas brita 1, brita 0 e cimento CP II F – 40. Na camada de concreto, na forma de retângulo, foram colocadas duas barras de aço (vergalhões) com as dimensões de 5 mm de diâmetro e 80 cm de comprimento, espaçadas por 60 cm uma da outra.

**Sub-Base:** Esta é composta de material granular, com espessura de 20 cm e bem compactada. Nesta camada foi introduzido horizontalmente um cano PVC, com 50 mm de diâmetro e com perfurações ao longo de sua extensão as quais permitem a adição de água em meio à camada de brita;

Uma camada de matacão envelopada por uma geomanta representando um colchão drenante; **Subleito:** Formado pelo próprio solo disposto na fundação da cava aberta no talude natural. Segundo Santos *et al.*, (2019) este se caracteriza por um Plintossolo Pétrico Concrecionário, bem compactado, de característica granular.

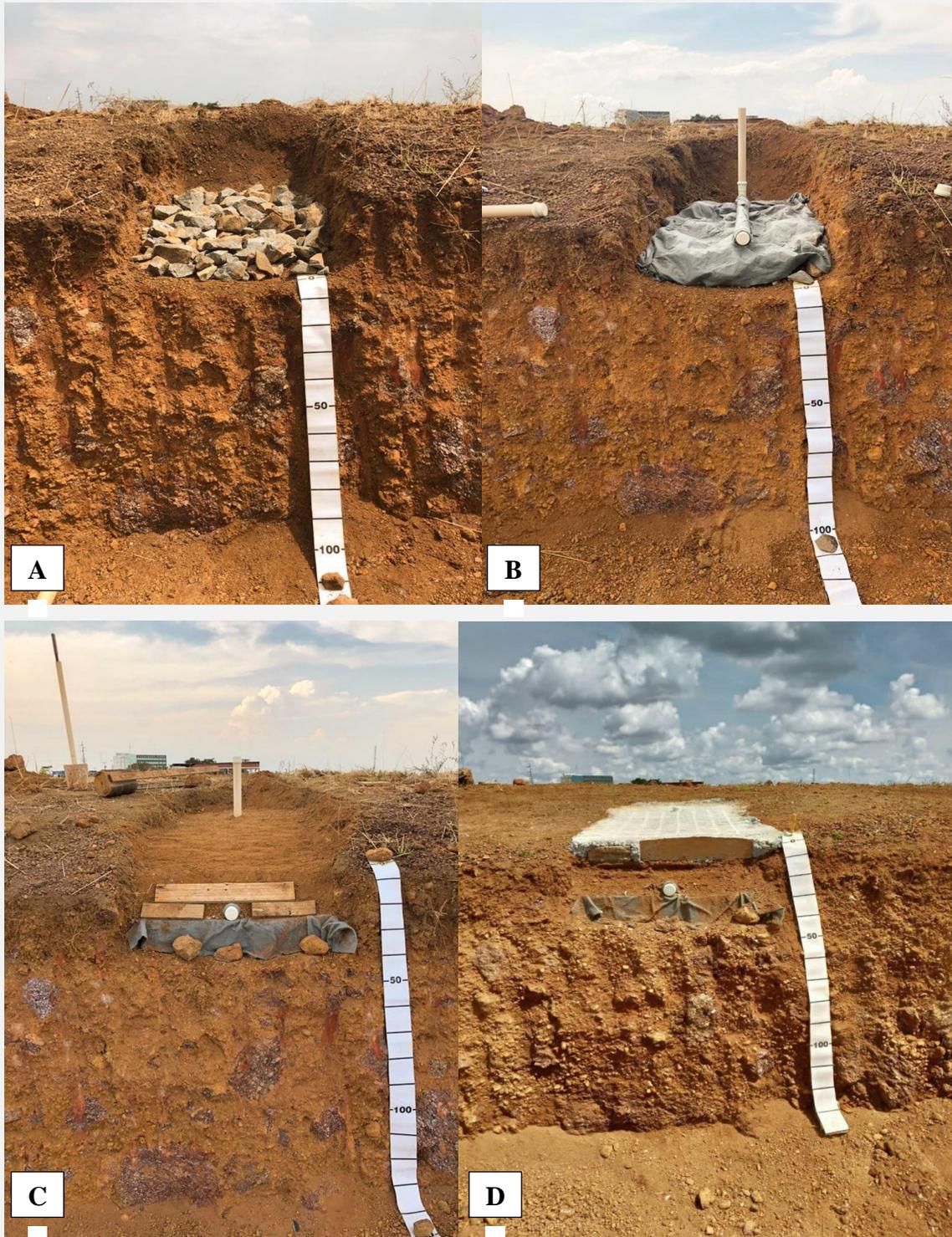


Figura 2: Subleito mais camada de rachão (parte a) 01; Sub-base formada por Rachão mais geomanta com tubo PVC (parte b); Solo granular compactado (parte c); e Pavimento piloto com revestimento de concreto (parte d). Fonte: Autores, 2020.

O modelo de equipamento GPR utilizado no levantamento de dados deste estudo foi da marca GSSI, modelo SIR 4000, Figura 3, utilizando antenas blindadas do tipo Bi-estáticas, de 900 MHz e de 2000 MHz, as quais apresentam melhores resoluções do sinal, proporcionando maior nível de detalhamentos dos materiais subsuperficiais. As aquisições dos dados foram realizadas com amostragens a cada 10 cm e a cartografia 2D e 3D.

Após a etapa de aquisição, os dados brutos, foram processados com o software RADAN 7, da GSSI, aplicando a seguinte sequência: correção tempo-zero, filtragem temporal, ganho (função de ganho com parte linear e exponencial), filtragem (média de subtração) e um filtro passa-banda. Na tabela 1 é apresentada a configuração usada para a aquisição de dados:



Figura 3: Orientação da coleta de dados em campo utilizando o SIR 4000 e as antenas de 900 (A) MHz e 2000 MHz (B). Fonte; Autores, 2020.

Tabela 1: Etapas do processamento dos radargramas gerados com as antenas de 900 MHz e 2000 MHz.

Antenas/Frequência	900MHz	2000MHz
Janela de tempo [ns]	50	12
Samples/Scan	512	512
Scan/Second	177	200
Scans/Unit [scan/cm]	2	4
Transmit Rate	100	100

Os valores dos parâmetros usados na etapa do processamento dos radargramas gerados com as antenas de 900 MHz e 2000 MHz estão dispostos no Tabela 2, respectivamente.

Tabela 2 Parâmetros dos processamentos de dados com GPR

Étapas	Processamento	900MHz	2000MHz
1	Correção- tempo zero		
2	Filtragem Dewow	1ns	0,5 ns
3	Função- ganho linear	1	1,44
	Função-exponencial	1	1,44
4	Subtração	250	200
5	Filtro passa baixa	600 MHz	1100 MHz
	Filtro passa alta	1200 MHz	2500 MHz

Fonte: Autores, 2020

## Resultados e discussão

Para os perfis analisados, foi utilizado um padrão de comprimento e largura, com a malha geofísica utilizada de 10 cm em 10 cm de espaçamento. Os paralelos ao eixo X têm uma extensão 75 cm e os paralelos ao eixo Y tem extensão de 100 cm.

Os radargramas obtidos nas aquisições com GPR foram analisados para separar e determinar as espessuras das camadas de base, sub-base, colchão drenante e de revestimento, além das barras de transferências e tubo de PVC. Os resultados do levantamento com o sistema acoplado ao solo podem ser vistos nas figuras 4 e 5. Para cada sistema, a primeira imagem GPR (a) corresponde as antenas de 900 MHz e esta última (b) a imagem da estrutura do pavimento. É observado na Figura 4 que as zonas marcadas pelas linhas (vermelhas) no radargrama correspondem às possíveis áreas anômalas identificadas com descontinuidades nas reflexões e mudanças nas amplitudes dos sinais GPR refletidos. As amplitudes tendem a ser uniformes em uma mesma camada. Além disso, quando as ondas atingem a face de outro meio ocorre uma variação da amplitude e isso se deve às características físicas de cada material. Quando ocorre uma variação e a amplitude atinge seu ápice significa que para aquele ponto e naquela profundidade houve uma mudança de superfície.

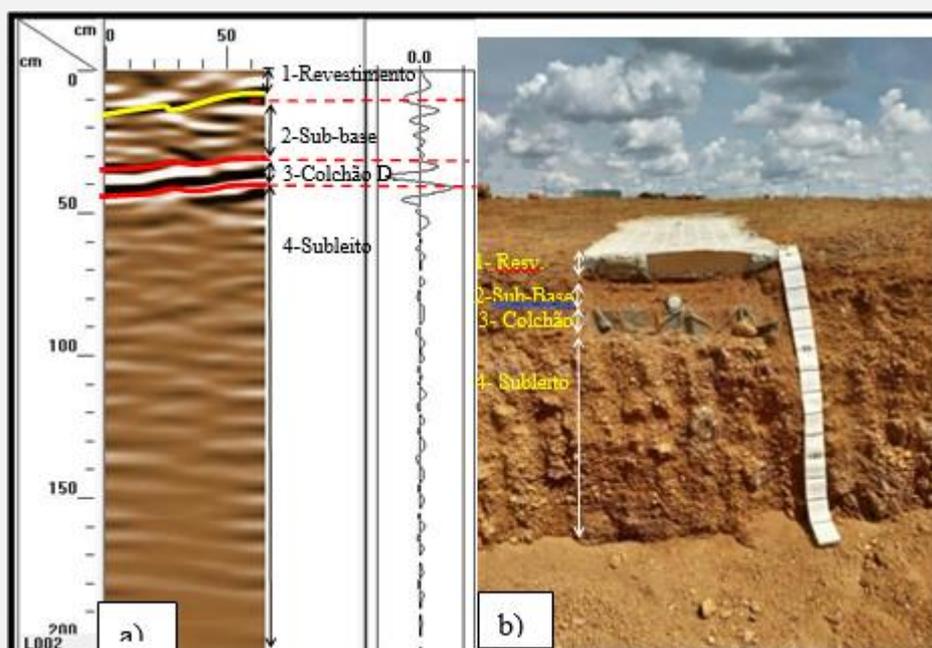


Figura 4: Imagem do radargrama com as diferentes interfaces (parte a); e perfil da estrutura do pavimento (parte b). Fonte: Autores, 2020.

Desta forma, a partir do radargrama da figura 4, nota-se que para o ponto analisado, na profundidade de 12 cm há uma variação de camada, caracterizando, a interface do revestimento com a sub-base, e na profundidade de 32 cm, ocorre variação de camada, sendo ela a interface da sub-base com o colchão drenante.

No radargrama da figura 5 verifica-se a diferenciação de camadas da seção longitudinal do protótipo. Como esperado, reflexões mais fortes, hiperbólicas, foram observadas nos locais onde se localizam os vergalhões na camada de concreto e na interfaces entre as camadas de colchão drenante e o subleito. Estas anomalias são atribuídas a presença do metal (anomalia hiperbólica em vermelho) e na camada do colchão drenante, devido a alterações nas constantes dielétricas causadas pela presença de ar entre os blocos de rachão (em amarelo). Estudos realizados por MARECOS *et al.* (2017), na avaliação de pavimentos por meio da combinação de diferentes métodos não destrutivos, corroboram os resultados obtidos no presente experimento realizado no SCGRA-ENG.

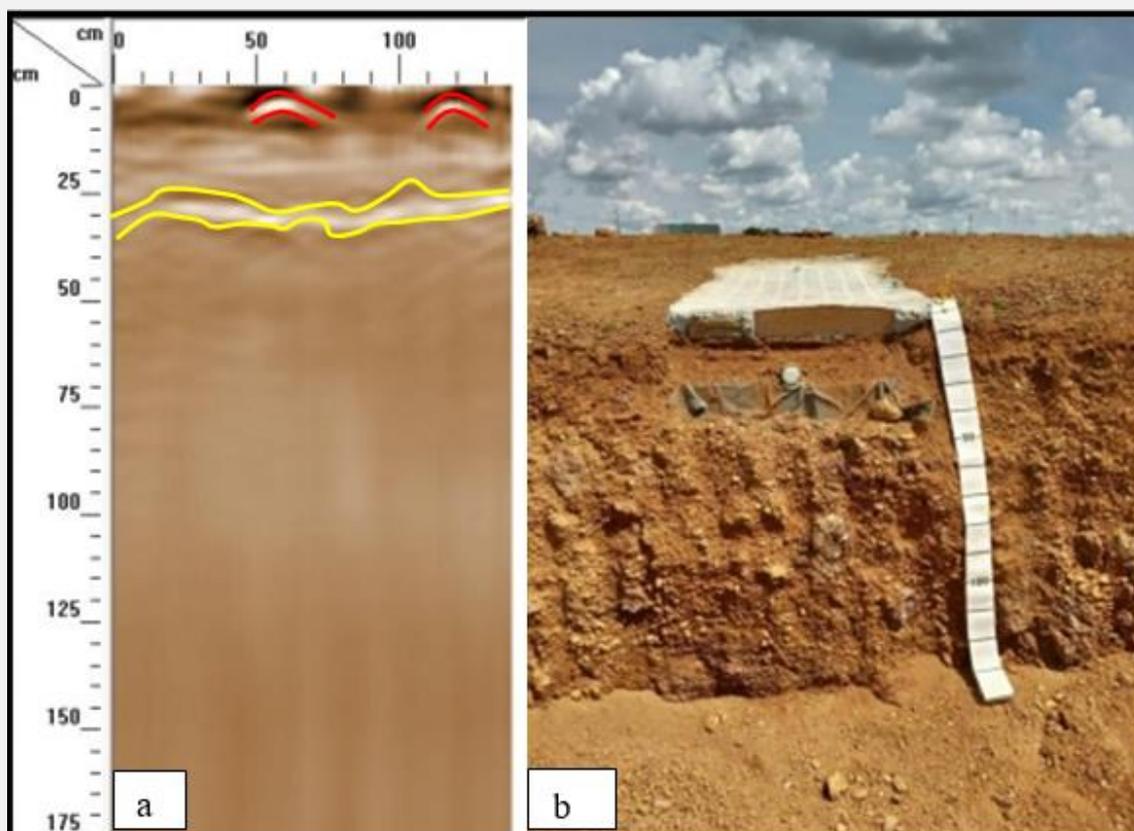


Figura 5 - Imagem do radargrama da antena de 900MHz (seção longitudinal ao pavimento) com as hipérbolas no quadro vermelho e as diferentes interfaces, em amarelo (parte a); e perfil da estrutura do pavimento (parte b). Fonte: Autores, 2020.

No radargrama da figura 6 também é possível verificar a diferenciação das camadas do protótipo. Este radargrama apresenta a resposta da linha L2 de aquisição, seção transversal ao pavimento. No radargrama, a hipérbole está assinalada pelas setas em vermelho. Esta hipérbole é a resposta das ondas eletromagnéticas para a presença do tubo de PVC e seu padrão reflexivo mais fraco. Pode ter sido ocasionado pelo fato de que o protótipo estava úmido, no momento da aquisição dos dados, devido ao período chuvoso. Esta atenuação do sinal ou perda de informação é muito provavelmente porque as amplitudes de reflexão do GPR diminuem sistematicamente com o aumento do teor de água.

Estudos realizados Chen e Wimsatt (2010), demonstraram que o sinal de GPR atenua linearmente com o aumento de umidade em lajes de concreto em vários níveis de saturação (0-100%). Relatou também que a presença de umidade reduz a frequência central do sinal, desta forma, o teor de água no concreto pode ser considerado como o

parâmetro mais importante, influenciando as propriedades elétricas do meio e, assim, a propagação de ondas eletromagnéticas (EM).

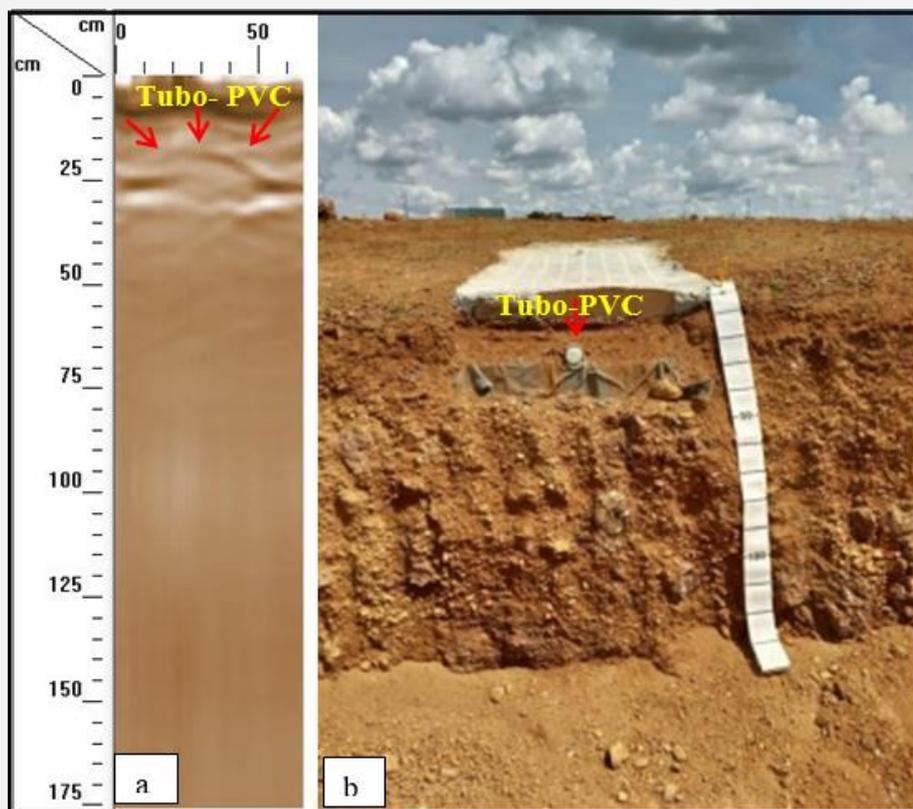


Figura 6: Imagem do radargrama da antena de 900 MHz (seção transversal ao pavimento) com a hipérbole do tubo de PVC, em vermelho (parte a) e tubo real, seta vermelha (parte b). Fonte: Autores, 2020.

Com o objetivo de melhorar a resolução para os primeiros 4,0 cm de profundidade do pavimento, utilizou-se a antena de 2000 MHz. Na figura 7, observa-se que esta frequência foi capaz de detectar com boa resolução, duas hipérboles referentes aos dois vergalhões, inseridos no interior da laje de concreto do pavimento.

Após a análise dos dados foram elaboradas imagens 3D a fim de evidenciar o posicionamento dos vergalhões (setas) de metal no protótipo. O resultado obtido é apresentado na figura 8.

A comparação entre as antenas de 900 MHz e 2000 MHz permite determinar algumas diferenças em relação à identificação das interfaces da camada de revestimento. A antena de 2000 MHz proporcionou melhor continuidade na reflexão,

principalmente para detectar os vergalhões metálicos do que a antena de 900 MHz, para os 20 cm iniciais do pavimento. Isto ocorre é porque a resolução é uma função do comprimento de onda e aumenta enquanto a antena de frequência aumenta (ANTUNES *et al.*, 2016).

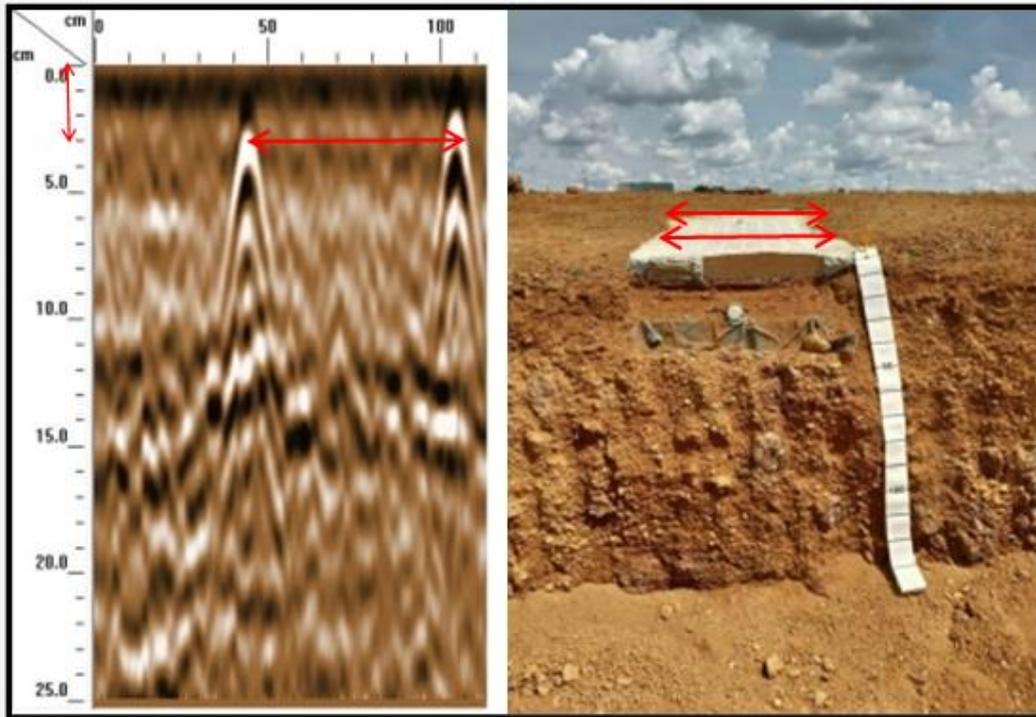


Figura 7: Imageamento 2D do protótipo com a antena de 2 GHz. Fonte: Autores, 2020.

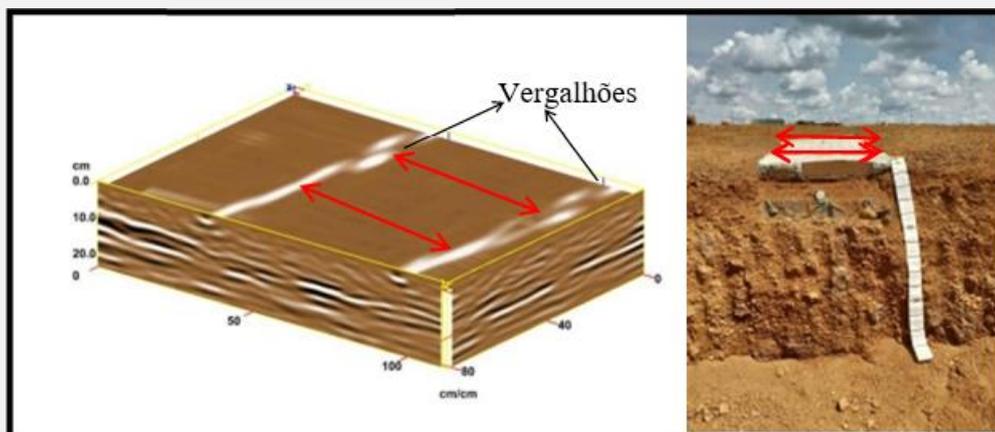


Figura 8: Imageamento 3D do protótipo com a antena de 2 GHz. Fonte: Autores, 2020.

## **Conclusões**

Utilizando-se do georadar com antenas de 900 MHz e de 2000 MHz na investigação da estrutura do pavimento piloto, identificou-se diferentes padrões de reflexão associados às interfaces das camadas, assim como, o tubo de PVC e os vergalhões.

Os dados obtidos a partir dos radargramas processados possibilitaram identificar a espessura de cada camada do pavimento e a sua devida profundidade. As camadas subjacentes a camada do revestimento, base, colchão drenante e subleito, apresentaram radarfaceis semelhantes, todas mostraram estruturas de refletores horizontais, paralelos e contínuos. Utilizando a antena de 900 MHz, foi possível definir a hiperbóle, ainda que incipiente, referente ao tubo de PVC, inserido na laje de concreto do revestimento. No entanto, a antena de 2000 MHz apresentou boa definição nas estruturas até os 20 cm iniciais, determinando as posições dos vergalhões a 4,0 cm de profundidade.

Frente aos resultados obtidos, pode-se concluir que a metodologia com GPR, utilizando-se da combinação das antenas de alta frequência, 2000MHz com a de 900MHz, mostrou-se eficaz, sendo que as assinaturas GPR de alvos conhecidos são importantes para calibração dos resultados, que podem ser usados na validação do processo construtivo de pavimentos e auditorias de infraestruturas rodoviárias. Recomenda-se, para solos com uma elevada percentagem de argila ou elevado teor de umidade, que sejam utilizados diferentes tipos de antenas, para melhorar a interpretação das medidas.

## Agradecimentos

Ao Tribunal de Contas do estado de Goiás-TCE-GO, pelo apoio tendo como base o convênio nº 001/2018 UEG/TCE-GO.

## Referências

AASHTO. Part 2. Chapter 5. Evaluation of Existing Pavements for Rehabilitation. In National Cooperative Highway Research Program 1-37A: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures; AASHTO: Washington, DC, USA, 2004.

ANTUNES, J.; FONSECA, V.; AFONSO, P.; GOMES, J.; ANTUNES, L.; FREIRE, M. L.; PEREIRA, A. C.; SILVA, P. S.; PICADO-SANTOS, H.; NEVES, L. Pavement solutions for tropical climate countries - Project R &D Tropical-PAV. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 8, 2016, Lisboa. Anais... Lisboa: CRP, 2016. p. 1-10.

ASTM. Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar; Non-destructive testing of pavement structures; ASTM D4748; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2004.

BORGES, W. R.; SILVA, L. A.; CUNHA, L. S.; BRANCO, R. M. G. C.; FARIAS, M. M. GPR applied to rigid pavement from Santos Dumont Airport, RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, n. 2, p. 225-234, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

GSSI. Geophysical Survey Systems – **Manual Radan 7**. 2018. Disponível em: <<https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2020/01/MN43199H-RADAN-7-User-Manual.pdf>>. Acesso: 16/02/2018.

MARECOS, V.; SOLA, M.; FONTUL, S., ANTUNES, V. 2017. Assessing the pavement subgrade by combining different non-destructive methods. **Construction and Building Materials**, v. 135, n.15, p. 76-85, March. 2017.

SANTOS, A. L. F.; DA SILVEIRA, E. C.; BORGES, W. R.; 2015. A utilização do georadar de penetração no subsolo (GPR) na determinação estratigráfica do pavimento da rodovia do Câmpus da UEG- Anápolis-GO. **Revista Mirante**, v. 8, n.3, p. 90-99, dez. 2015.

SILVA, F. N. **Caracterização pedogeotécnica e estudo geofísico aplicados a um perfil de solo do Câmpus Henrique Santillo UEG – Anápolis/GO.** 2019. 89p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2019.

RASOL, M.A.; PÉREZ-GRACIA, V.; FERNANDES, F.M.; PAIS, J.C.; SANTOS-ASSUNÇÃO, S.; SANTOS, C.; SOSSA, V. GPR laboratory tests and numerical models to characterize cracks in cement concrete specimens, exemplifying damage in rigid pavement. **Measurement**, v. 158, n.1, p. 1-11, July. 2020.

RASOL, M.A.; PÉREZ-GRACIA, V.; SOLLA, M.; PAIS, J.C.; FERNANDES, F.M.; SANTOS, C. An experimental and numerical approach to combine Ground Penetrating Radar and computational modelling for the identification of early cracking in cement concrete pavements. **NDT E Int.** v. 115, p. 1-12, September, 2020.

RASOL, M.A.; PÉREZ-GRACIA, V.; FERNANDES, F.M.; PAIS, J.C.; SOLLA, M.; SANTOS, C. NDT assessment of rigid pavement damages with ground penetrating radar: Laboratory and field tests. **Int. J. Pavement Eng.** v. 23, n. 3, p. 900-915, Jan. 2020.

VIEIRA, R.; GONDOLFO, O. C. B. Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (GPR). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 42 / 16, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado: RAPv, 2013. p. 1-12