[REEC] Revista Eletrônica de Engenharia Civil
DESENVOLVIMENTO·TECNOLOGIA·E·AMBIENTE
Volume 21, Nº 1, 2026 158 - 171
https://revistas.ufg.br/reec

GROUND PENETRATING RADAR (GPR): ENSAIO NÃO DESTRUTIVO EM PAVIMENTOS RÍGIDOS DE CONCRETO

Ground Penetrating Radar (GPR): Non-Destructive Test in Concrete Rigid Pavement

Maria Teresa Françoso[1], Luiz Carlos Almeida[2], Paulo Bressaglia[3], Diogenes Cortijo Costa[4]

PALAVRAS CHAVE:

Ground Penetrating Radar;
GPR;
Ensaio Não Destrutivo;
Pavimento de Concreto.

KEYWORDS:

Ground Penetrating Radar*;*
GPR*;*
Non-Destructive Test;
Concrete Pavement.

RESUMO: Em razão do interesse da engenharia no desenvolvimento de Ensaios Não Destrutivos (END) para avaliação de materiais e estruturas, este artigo aborda o uso do *Ground Penetrating Radar* (GPR) na investigação de pavimentos rígidos de concreto. São apresentadas as bases do funcionamento do método, bem como as etapas de coleta, processamento e interpretação das suas respostas, cujo conhecimento foi aplicado no estudo do pavimento de concreto de uma Estação de Transferência do Sistema de Transporte Coletivo do município de Campinas/SP. Os resultados alcançados comprovam a adequação do GPR para investigação não destrutiva de pavimentos rígidos, em particular na verificação do posicionamento da armadura e avaliação da espessura das placas de concreto, principalmente quando as respostas são processadas para auxiliar na interpretação dos dados. O estudo contribui para o desenvolvimento e disseminação do método GPR como instrumento de apoio na análise, manutenção e fiscalização de obras de pavimentos rígidos de concreto.

ABSTRACT: *Because the interest of engineering in the development of Non-Destructive Tests (NDE) for the evaluation of materials and structures, this article addresses the use of Ground Penetrating Radar (GPR) in the investigation of concrete rigid pavements. The method operation bases are presented, as well as the stages of collection, processing and interpretation of their responses, whose knowledge was applied in the study of the concrete pavement of the Public Transport System Transfer Station in the Campinas/SP city. The results achieved prove the adequacy of the GPR for non-destructive investigation of rigid pavements, in particular to check the positioning of the reinforcement bars and the thickness of the concrete slabs, especially when the GPR responses are processed to assist the data interpretation. The study contributes to the development and dissemination of the GPR system as a support tool in the analysis, maintenance and supervision of concrete rigid pavement works.*

*** Contato com os autores:**

Publicado em 29 de junho de 2026.

[1] **e-mail: mteresa@fec.unicamp.br (M. T. Françoso)**
Engenheira Civil, Doutora, Professora, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

[2] **e-mail: almeida@fec.unicamp.br (L. C. Almeida)**
Engenheiro Civil, Doutor, Professor, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

[3] **e-mail: paulo.bressaglia@gmail.com (P. Bressaglia)**
Engenheiro Civil, Mestre, Perito, MPF – Ministério Público Federal

[4] **e-mail: dcortijo@unicamp.br (D. C. Costa)**
Engenheiro Civil, Doutor, Professor, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

ISSN: 2179-0612 DOI: 10.5216/reec.V21i1.64944
© 2026 REEC - Todos os direitos reservados.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios utilizados para avaliar materiais, estruturas e ambientes envolvidos em um projeto são indispensáveis na engenharia, pois auxiliam na tomada de decisões que garantem segurança, qualidade e desempenho. No entanto, muitos dos métodos tradicionais demandam consideráveis recursos financeiros e materiais, além de exigirem um tempo significativo para a interpretação dos dados e a elaboração de relatórios. Além disso, a maioria dessas técnicas baseia-se em amostras obtidas aleatoriamente, o que pode comprometer a representatividade dos resultados. Diante dessas limitações, têm-se buscado alternativas não destrutivas, de rápida execução, precisas e economicamente viáveis, destacando-se o uso do *Ground Penetrating Radar* (GPR), também conhecido no Brasil como Radar de Penetração no Solo.

Baseado na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas, os primeiros trabalhos com o GPR datam do fim do século XIX, mas o método ganhou impulso nos últimos quarenta anos, após seu uso, pelo exército dos Estados Unidos da América, para localizar túneis construídos pelos vietnamitas, durante a Guerra do Vietnã, nos anos 1970. Desde então, vários sistemas comerciais foram disponibilizados no mercado, bem como proliferaram pesquisas sobre aplicações na engenharia, arqueologia, geologia e outras áreas que necessitam explorar a subsuperfície terrestre e estruturas.

Na Engenharia, a manutenção e fiscalização de obras viárias exige a investigação da estrutura dos pavimentos para verificar sua construção e condições de estabilidade. Tais procedimentos nem sempre são viáveis ou adequados por meio dos métodos tradicionais, considerando a necessidade de extração ou moldagem de corpos de prova que serão destruídos durante a análise, além da necessidade de reconstruir as partes de onde foram obtidas as amostras. Caso típico são as vias revestidas com concreto, em razão da impossibilidade de avaliar suas características construtivas e estado de conservação sem remover partes do pavimento, o que torna relevante o uso de ensaios não destrutivos, como, por exemplo, o GPR.

Diante disso, o objetivo desse artigo é apresentar as bases de funcionamento do *Ground Penetrating Radar* e demonstrar as etapas do levantamento realizado com o GPR, desde a coleta de dados até o processamento e interpretação dos resultados, em parte do pavimento de concreto de uma Estação de Transferência do Sistema de Transporte Coletivo da cidade de Campinas/SP.

2. *GROUND PENETRATING RADAR*

Ground Penetrating Radar (GPR) é uma técnica de investigação não destrutiva, cujo funcionamento tem como base a propagação de ondas eletromagnéticas (EM), bastante comum na Geofísica para exploração da subsuperfície terrestre, a qual também pode ser utilizada em outras estruturas como pavimentos revestidos com asfalto ou concreto.

Havendo variações nas propriedades elétricas das estruturas investigadas, principalmente na permissividade dielétrica, que interfere na velocidade de propagação dos sinais eletromagnéticos, parte das ondas EM são refletidas, enquanto outra porção continua a se propagar e refletir até que toda energia seja dissipada. Valores da permissividade dielétrica de alguns materiais, em relação a permissividade dielétrica no vácuo (8,854 × 10-12 Faraday/metro), denominada permissividade dielétrica relativa (ε_r), e as respectivas velocidades de propagação das ondas EM, em metros por nanosegundo (m/ns), são mostrados na Tabela 1.

TABELA 1: Permissividade Dielétrica Relativa e velocidade de propagação da onda EM de alguns materiais.

Material	Permissividade dielétrica relativa (ε_r)	Velocidade da onda EM (m/ns)
Água	80 - 82	0,033
Ar	1	0,3
Areia	3 - 6	0,06 – 0,07
Asfalto	2 - 12	0,15 – 0,21
Cimento	4 - 5	0,07 – 0,091
Brita	5,8 - 7	0,09 - 0,15

FONTE: Adaptado de Joshaghani e Shokrabadi (2021).

Para aplicação do método utiliza-se uma antena transmissora (Tx) para irradiar ondas EM com frequências que vão, em equipamentos comerciais, de 10 MHz até 3 GHz, escolhida de acordo com a profundidade e características do meio que se pretende investigar (Oliveira, Morais de Oliveira e Brandstetter, 2023). Quanto maior a frequência das ondas, menor a profundidade de investigação, porém melhor será a resolução dos dados. Na Tabela 2 há exemplos da profundidade de exploração alcançada pelo GPR, considerando a frequência das ondas EM irradiadas pela antena transmissora (Tx).

TABELA 2: Profundidade aproximada de investigação do GPR de acordo com a frequência das ondas EM irradiadas pela antena transmissora.

Profundidade (m)	Frequência da Antena (MHz)
0,3	2.600
0,4	1.600
1	9000
3	400

FONTE: Adaptado GSSI (2017).

Os sinais refletidos (ondas EM) são captados por uma antena receptora (Rx) e armazenados em função do tempo de propagação da onda entre Tx e Rx, gerando um registro denominado traço. A composição sequencial dos traços forma um radargrama, no qual o eixo das abcissas corresponde à distância percorrida pelas antenas e, o das ordenadas, o tempo que a onda EM levou para atingir uma superfície refletora (material com permissividade dielétrica diferente da permissividade do meio de propagação) e ser registrada. Na Figura 1 estão representadas a propagação e reflexão das ondas EM, assim como os respectivos registros (traço e radargrama).

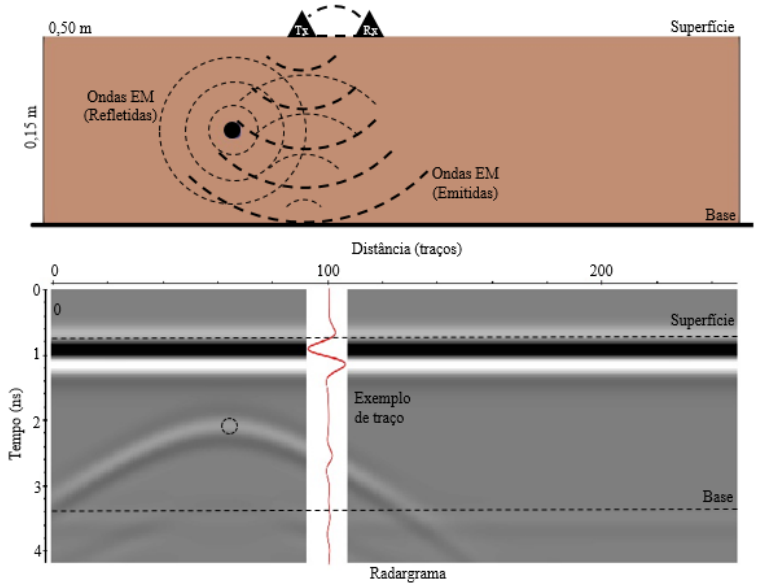

FIGURA 1: Propagação e registros (traço e radargrama) das ondas EM no sistema GPR.
FONTE: Autoria Própria.

1.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS DO GPR

O radargrama tem como propósito apresentar os dados do GPR, refletindo as características do meio investigado, porém sua interpretação depende da experiência do usuário, uma vez que não permite inferências diretas e precisas sobre a natureza dos alvos (Ambrosanio et al., 2024).

Por essa razão, o uso de técnicas de processamento é essencial para refinar os dados e aprimorar as imagens geradas pelo GPR. Tais técnicas permitem, por exemplo, minimizar reflexões indesejadas e corrigir o posicionamento dos objetos detectados, facilitando a interpretação das informações (Mojahid et al., 2025). No entanto, ao selecionar as técnicas de processamento, conforme aponta Ciampoli (2019), recomenda-se adotar abordagens que melhorem a qualidade dos radargramas sem comprometer a integridade dos dados.

Há diversos softwares disponíveis para o processamento das informações do GPR. Neste estudo, foi utilizada a versão 7.0 do software ReflexW (Sandmeier, 2018). A seguir, apresentam-se as principais etapas desse procedimento.

1.1.1 Correção do tempo-zero e informação das distâncias no radargrama

Os primeiros registros do GPR, conforme demonstrado na Figura 1, são as ondas EM que se propagam pelo ar (onda aérea) e pela superfície (onda de superfície) do meio investigado, cuja representação são faixas horizontais diretas na parte superior do radargrama. Contudo, antes dessas marcações, há um intervalo de tempo sem registro algum, devido à diferença da temperatura ambiente e do equipamento GPR, dimensão dos cabos e variações entre as antenas (Ciampoli, 2019), podendo essa defasagem ser ajustada por meio da correção do tempo-zero.

Como a resposta do sistema GPR são tempos de propagação das ondas EM representados por traços, os quais justapostos compõem o radargrama, conhecendo-se o intervalo horizontal de coleta de dados, pode-se determinar a distância percorrida pelas antenas e, a partir da velocidade de propagação da onda EM, é possível calcular a profundidade das reflexões de acordo com a Equação (1), cujas grandezas estão ilustradas na Figura 2.

$$d = V \times (t_w/2) \qquad \text{[Eq. 1]}$$

Em que:
d = profundidade do alvo;
V = velocidade de propagação da onda EM;
t_w = tempo de propagação da onda EM.

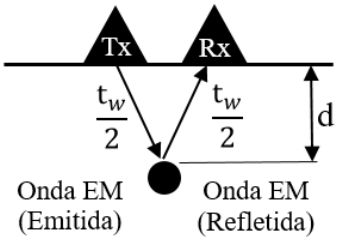

FIGURA 2: Grandezas relativas à velocidade de propagação da onda EM no meio.
FONTE: Autoria Própria.

O ajuste do tempo-zero, a inserção da distância horizontal percorrida pelas antenas e o cálculo da profundidade são realizados automaticamente pelo software de processamento, com base nos dados coletados. A Figura 3 ilustra esses ajustes no radargrama da Figura 1, considerando a correção do tempo-

zero de 0,8 ns, a aquisição dos dados a cada 0,002 m para determinação da distância horizontal e, para o cálculo da profundidade, a adoção de uma velocidade de propagação da onda EM de 0,12 m/ns.

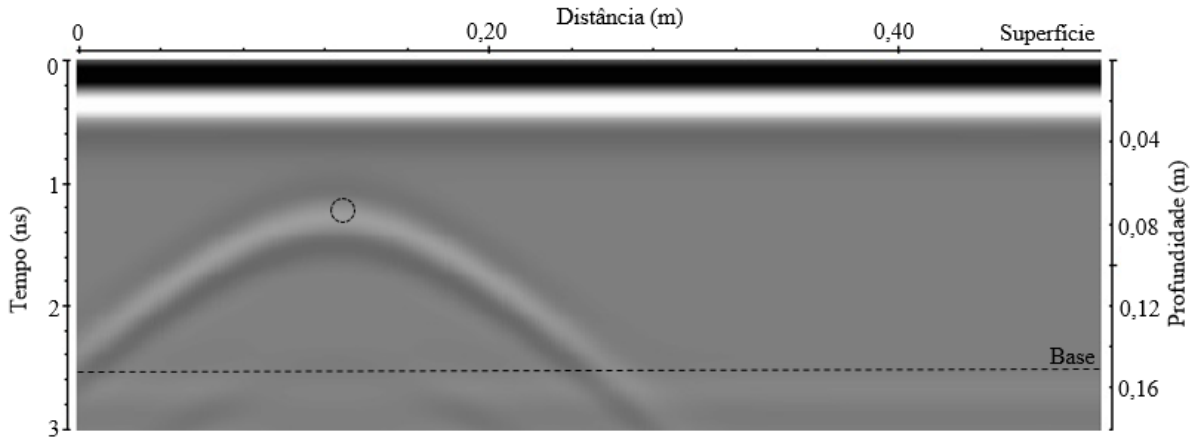

FIGURA 3: Exemplo de correção do tempo-zero e inserção da distância e profundidade no radargrama da Figura 1.
FONTE: Autoria Própria.

1.1.2 Migração

Os elementos ou estruturas existentes no meio investigado são representados no radargrama por hipérboles (Figura 1), pois as ondas EM propagam-se de forma cônica, havendo reflexões mesmo antes das antenas estarem posicionadas sobre os alvos (Conyers, 2016). Em razão dessa característica do sistema GPR, as representações nos radargramas não correspondem à forma geométrica dos objetos.

De acordo com Ciampoli (2019) e Conyers (2016), a migração dos dados do GPR pode amplificar as amplitudes dos traços no topo das hipérboles e remover seus eixos, ajustando a aparência dos registros das reflexões para melhor corresponder à geometria original do meio explorado, facilitando a interpretação dos resultados. A Figura 4 apresenta um exemplo da migração aplicada ao radargrama mostrado na Figura 3.

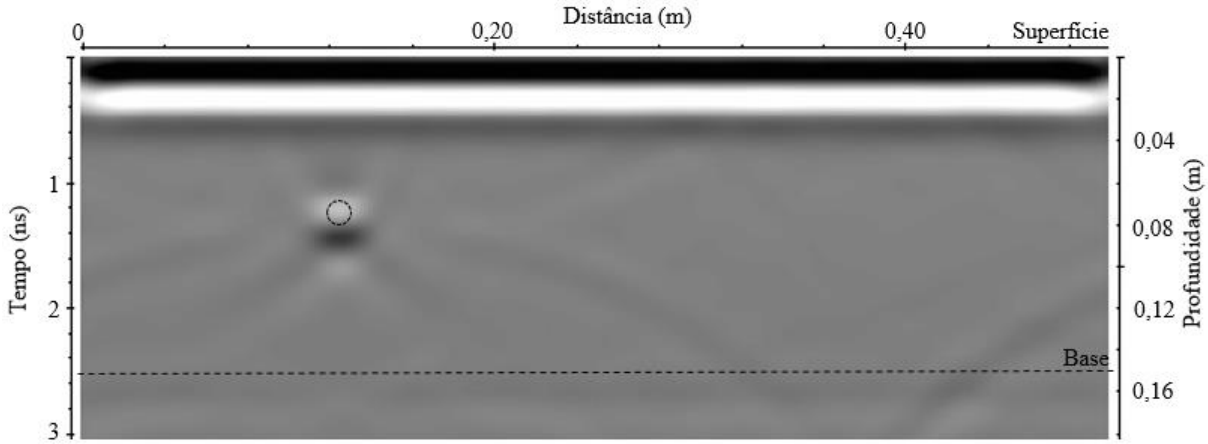

FIGURA 4: Exemplo de migração dos dados do GPR.
FONTE: Autoria Própria.

1.1.3 Processamento

Devido à propagação cônica das ondas EM e à atenuação da energia conforme penetram no meio investigado, as reflexões de alvos distantes do ponto de irradiação apresentam amplitudes menores nos traços. Para recuperar esses registros de menor amplitude e torná-los visíveis no radargrama, durante o processamento é possível aplicar um ganho para aumentar as amplitudes dos sinais registrados. O conceito da aplicação de ganho está ilustrado na Figura 5.

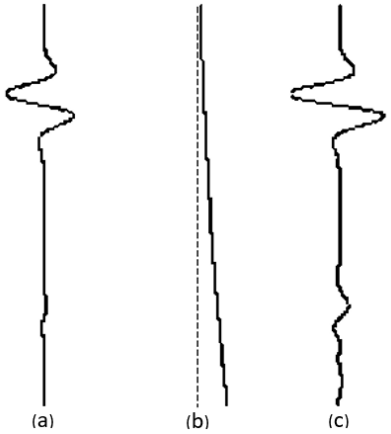

FIGURA 5: Conceito da aplicação de ganho: (a) traço original, (b) ganho aplicado e (c) traço com o ganho.
FONTE: Autoria Própria.

O ganho pode ser aplicado a todo o traço ou a uma parte específica, podendo também abranger o radargrama inteiro ou apenas trechos selecionados. Essa aplicação não altera os dados originais, modificando apenas a amplitude do sinal registrado.

Além do mais, durante a coleta de dados com o GPR, pode haver o registro de reflexões indesejadas - ruídos e ecos - causadas por interferências (estruturas próximas) diferentes dos alvos investigados e fontes externas de ondas EM (principalmente telefones celulares e antenas de transmissão de rádio), que podem prejudicar a interpretação do radargrama.

Para reduzir interferências desses registros, diversos filtros podem ser aplicados, como o filtro passa-banda (*bandpass*), que limita a faixa de frequência do sinal e remove componentes indesejados, sejam eles de alta ou baixa frequência (Afrasiabi et al., 2025). Ao contrário do ganho, a aplicação de filtros modifica a estrutura dos dados (traços) do GPR.

Exemplo do uso de filtro para remover as reflexões dos registros das ondas aérea e de superfície do radargrama da Figura 4 é apresentado na Figura 6, na qual também é mostrada a aplicação de ganho, na parte inferior do radargrama, para realçar trechos dos traços na base da estrutura.

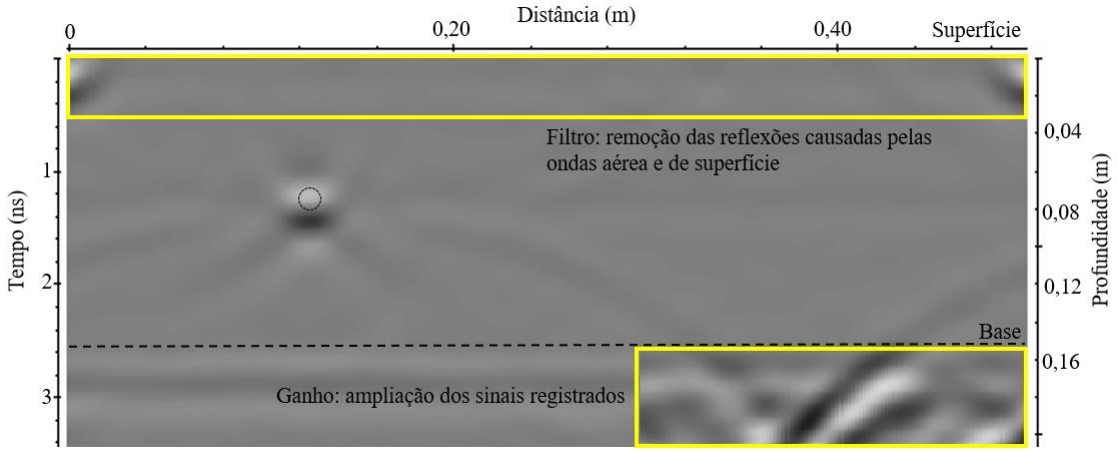

FIGURA 6: Exemplo da aplicação de ganho e filtro nos dados do GPR.
FONTE: Autoria Própria.

3. USO DO GPR EM PAVIMENTOS RÍGIDOS DE CONCRETO

Pavimentos rígidos, geralmente utilizados em vias de tráfego intenso, apresentam alta rigidez em relação ao subleito, o que lhes permite absorver e distribuir melhor as tensões, resultando em menor

deformação, maior durabilidade e menores custos de manutenção quando comparados aos pavimentos flexíveis (Joshaghani e Shokrabadi, 2021, e Rasol et al., 2020).

Exemplo desse tipo de revestimento são as placas de concreto de cimento Portland, as quais, para combater os esforços de retração gerados durante a cura do concreto, transferência de cargas e ligação entre as placas, são dotadas de juntas e armaduras que, para cumprirem sua função, devem ser corretamente posicionadas durante a construção.

Todavia, após a execução do pavimento, não é algo simples verificar se os detalhes construtivos, em particular o posicionamento das armaduras e espessura das placas de concreto, foram obedecidos, sendo relevante a disponibilidade de meios que auxiliem nessa avaliação.

Para demonstrar a utilidade do sistema GPR nesse contexto, foi investigado o pavimento rígido da Estação de Transferência Amarais, um mini terminal de ônibus que integra o Sistema de Transporte Público de Campinas/SP.

Como o pavimento analisado é composto por placas de concreto com características dimensionais e estruturais semelhantes, este artigo foca na análise de uma dessas placas, localizada no encontro das Ruas Sylvia da Silva Braga e Dário Freire Meirelles, conforme ilustrado na Figura 7.

FIGURA 7: Trecho do pavimento rígido da Estação de Transferência Amarais analisado no estudo. No destaque, a placa investigada, representativa da estrutura geral do pavimento.
FONTE: Adaptado de Google (2019).

As Figuras 8 e 9 demonstram o projeto do pavimento e a placa de concreto apresentada nesse estudo.

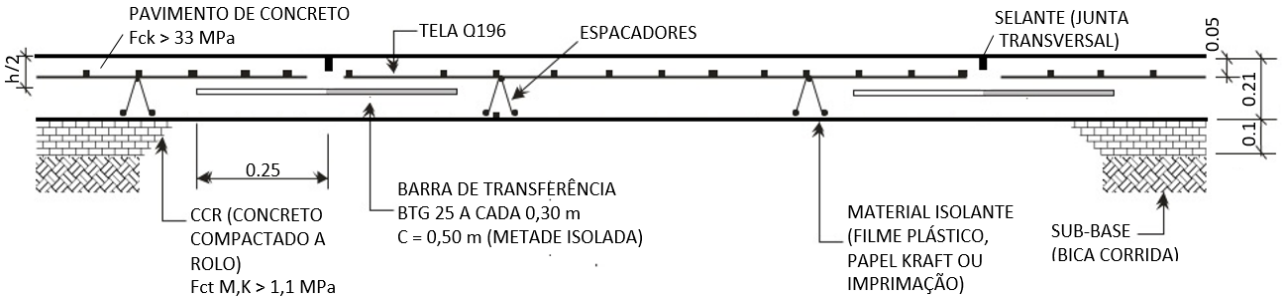

FIGURA 8: (a) Projeto do pavimento da Estação de Transferência Amarais.
FONTE: Adaptado de Gomes et al. (2018) e EMDEC (2007).

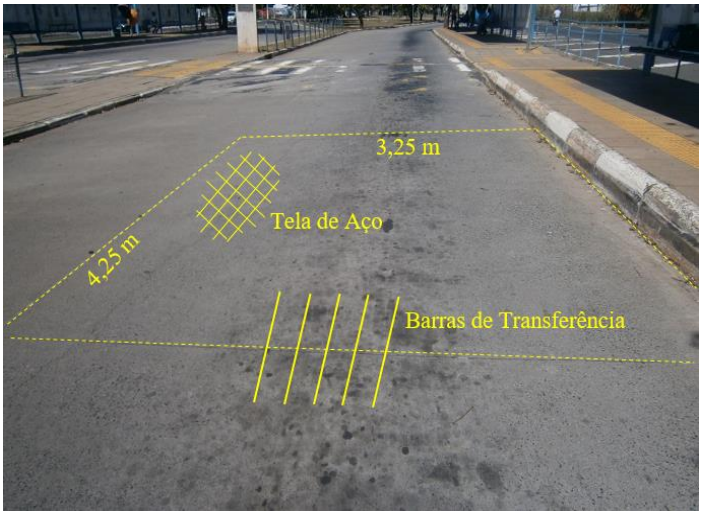

FIGURA 9: Foto do local de aquisição de dados com o GPR, com ilustração dos tipos de armaduras.
FONTE: Autoria Própria.

3.1 EQUIPAMENTO GPR E COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada com o equipamento GPR modelo SIR 3000 da Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), com antena de 1,6 GHz, no modo StuctureScan (recomendado pelo fabricante para investigação de estruturas confeccionadas em concreto de cimento Portland, cuja profundidade dos alvos esteja ao redor de 0,40 m). A aquisição de dados, em relação ao número de traços obtidos por unidade de distância horizontal, foi de 5 traços por centímetro (cm), isto é, um traço a cada 0,2 cm, e a permissividade dielétrica relativa do meio, tomada como 6,25, enquanto o intervalo de tempo para o registro das reflexões das ondas EM foi fixado em 12 ns. A Figura 10 mostra um dos momentos da coleta de dados.

FIGURA 10: Coleta de dados com o equipamento GPR.
FONTE: Autoria Própria.

3.2 DADOS DO GPR COLETADOS ENTRE PLACAS DE CONCRETO (JUNTA TRANSVERSAL)

Como pode ser visto no projeto apresentado na Figura 8, para transferência de carga entre as placas de concreto do pavimento, nas juntas transversais foi prevista a instalação de barras de transferência com diâmetro de 25 mm (milímetros) e cumprimento de 50 cm (centímetros), espaçadas a cada 30 cm. Com o objetivo de obter o *as built* e confirmar a presença dessas barras, realizou-se um levantamento com o GPR na região, cujo resultado é apresentado no radargrama da Figura 11.

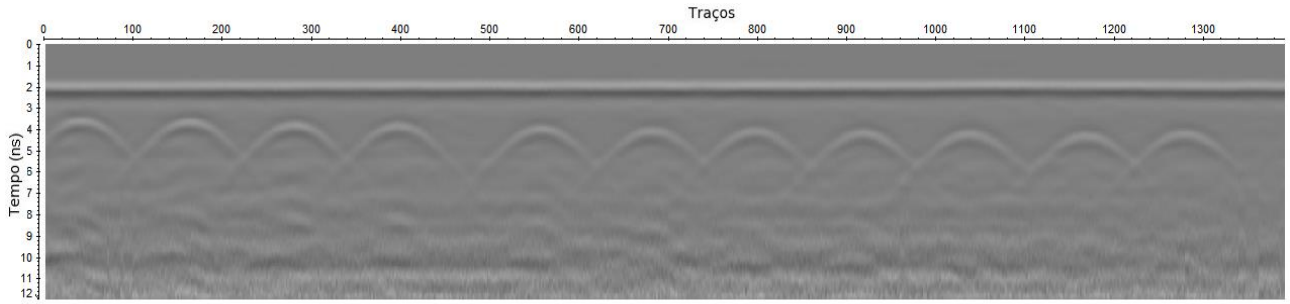

FIGURA 11: Dados do GPR coletados na junta transversal entre as placas de concreto.
FONTE: Autoria Própria.

Para auxiliar na interpretação dos dados obtidos em campo, o radargrama da Figura 11 foi processado com o *software* ReflexW. Embora não haja um roteiro específico, foram realizadas as etapas básicas do processamento: correção do tempo-zero, inserção das distâncias (profundidade e distância horizontal), aplicação de ganho e migração. Na Figura 12 é mostrado o resultado do processamento.

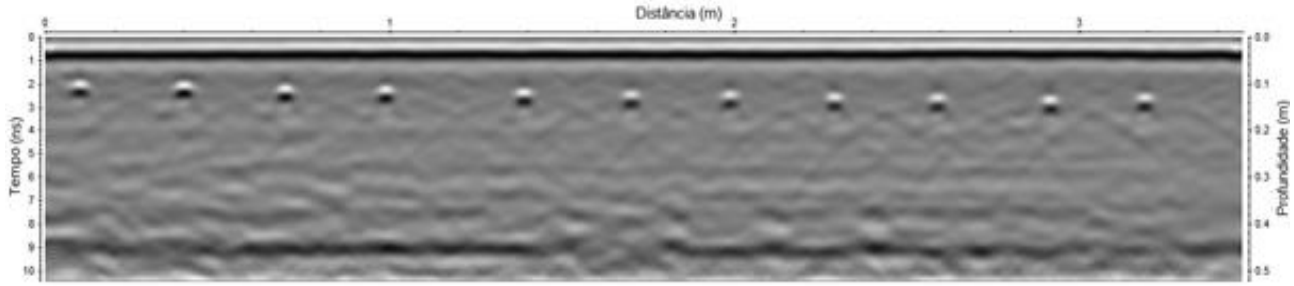

FIGURA 12: Resultado do levantamento realizado na junta transversal com o GPR, após o processamento dos dados.
FONTE: Autoria Própria.

Observa-se que as barras transversais estão a 10 cm de profundidade e espaçadas regularmente a cada 30 cm, com exceção de duas barras, próximas à distância horizontal de 1,00 m, cujo espaçamento entre elas é de 40 cm.

Também se verifica uma variação (declive) regular na profundidade de alocação das barras de transferência. Entre a primeira e a última barra, há um desnível de aproximadamente 6 cm, o que representa cerca de 2% da largura da placa (3,25 m), correspondendo à inclinação superficial de 2% planejada para o pavimento (3,25 m x 2% = 0,065 m). Em outros termos, a declividade no alinhamento das barras de aço reflete a variação da espessura da placa de concreto para atender às especificações do projeto para a superfície do pavimento.

Assim, a posição das barras de transferência no radargrama representa o tempo de propagação das ondas EM entre a superfície do pavimento e a armadura. Para uma análise mais precisa, é necessário cotejar os resultados com possíveis variações na superfície da estrutura investigada, como ilustrado na Figura 13.

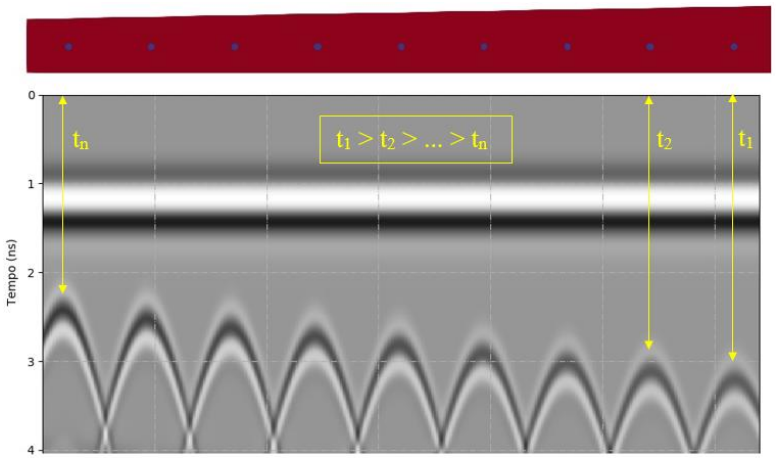

FIGURA 13: Exemplo das respostas do GPR em relação às variações existentes na superfície da estrutura investigada.
FONTE: Autoria Própria.

A Figura 14 apresenta com mais detalhes o radargrama processado do trecho sob análise, com indicação dos principais pontos de interesse.

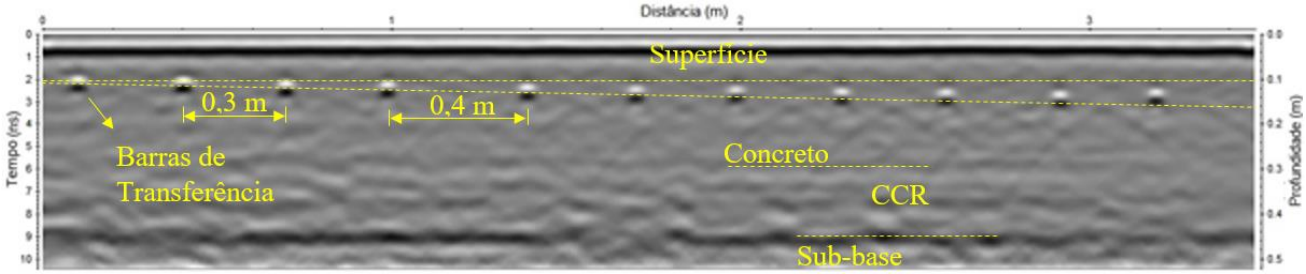

FIGURA 14: Perfil processado do radargrama dos dados coletados na junta transversal, com os pontos de interesse.
FONTE: Autoria Própria.

3.2 DADOS DO GPR COLETADOS LONGITUDINALMENTE À PLACA DE CONCRETO

Para combater os esforços de retração durante a cura do concreto, o trecho de pavimento investigado foi especificado com tela de aço Q196 (malha quadrada: 10 x 10 cm, com diâmetro dos fios de 5 mm), instalada a cinco centímetros da superfície da placa. Com o intuito de avaliar esse tipo de armadura, foram coletados dados com o GPR, longitudinalmente, sobre uma fissura existente na placa, obtendo-se o radargrama mostrado na Figura 15.

Para uma avaliação mais abrangente, as informações obtidas in loco foram processadas. O processamento incluiu a inserção das dimensões (profundidade e distância horizontal) e a correção do tempo-zero, seguido da aplicação de migração e ganho nos dados. O resultado desse processamento é apresentado na Figura 16.

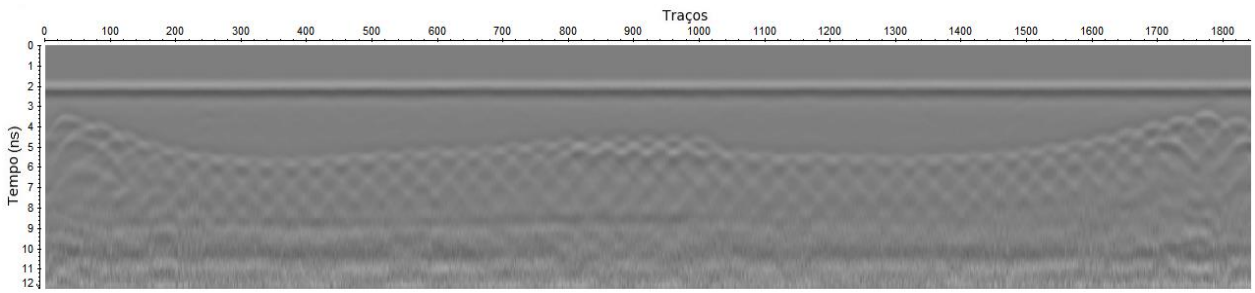

FIGURA 15: Dados do GPR coletados longitudinalmente à placa de concreto.
FONTE: Autoria Própria.

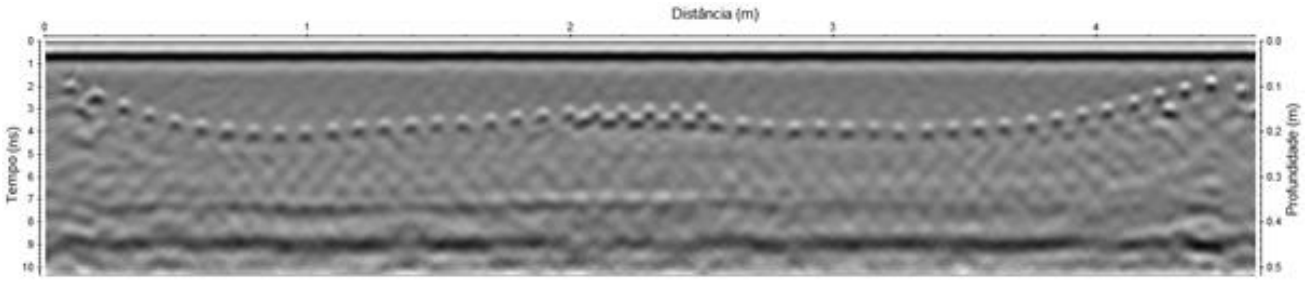

FIGURA 16: Processamento do radargrama da Figura 15, coleta de dados longitudinalmente à placa de concreto.
FONTE: Autoria Própria.

Observa-se que o trecho exibido no radargrama tem aproximadamente 4,50 m de comprimento, ou seja, um pouco mais que a extensão da placa investigada (4,25 m), recordando-se que nas extremidades de cada placa há juntas transversais que geram diversos registros de reflexões no radargrama, pois na região há espaçadores e barras de transferência. De acordo com o radargrama processado (Figura 16), a deformação da armadura ao longo da placa de concreto aparenta ser bastante acentuada, bem como a variação do respectivo cobrimento. Nota-se também a transposição ocorrida entre os painéis de telas de aço, numa extensão de aproximadamente 50 cm, na parte central do trecho investigado.

Cabe destacar que a deformação das telas de aço está ampliada em razão da diferença entre as escalas representativas da profundidade e da distância horizontal no radargrama. Realizado o ajuste (Figura 17), ou seja, adotando-se a mesma escala de representação para a profundidade e distância horizontal, a deformação é bem menos pronunciada, acentuando-se apenas nas extremidades da placa, onde estão as juntas transversais.

Sobre o cobrimento da tela de aço acima do planejado, foi citado no item anterior que se deve ao aumento da espessura da placa de concreto para atender à inclinação especificada em projeto para o pavimento.

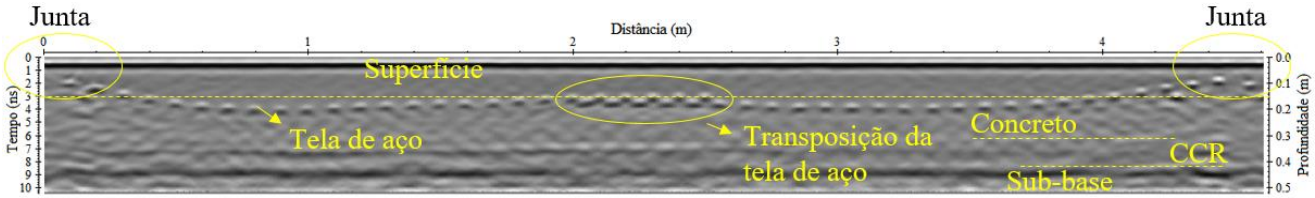

FIGURA 17: Perfil processado dos dados coletados longitudinalmente à placa, com pontos de interesse e modificação das escalas horizontal e vertical.
FONTE: Autoria Própria.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para uso do sistema GPR é importante a escolha adequada das antenas (frequência), sob pena das respostas não serem inteligíveis e inviabilizarem as interpretações dos resultados, principalmente no que tange ao alcance (profundidade) e resolução das respostas. Quanto menor a frequência da antena, maior será a onda gerada, permitindo investigações mais profundas, no entanto, a identificação dos alvos (resolução) ficará comprometida. Ademais, para que haja reflexões das ondas eletromagnéticas, os alvos devem ter características eletromagnéticas diferentes do meio explorado. No caso de placas armadas de concreto, com espessura em torno de 30 cm, conforme apurado no presente estudo, a antena de 1,6 GHz é adequada para avaliação tanto da espessura como da existência e posição de armadura no seu interior. Todavia, para outras espessuras de placas, devem ser utilizadas antenas compatíveis, de acordo, por exemplo, com as referências da Tabela 2.

Devido à atenuação que a energia da onda EM sofre à medida que penetra na estrutura investigada, quanto mais distante o alvo das antenas, menores são as amplitudes das reflexões registradas, mesmo que sejam materiais com características (propriedades elétricas) bastante diferentes do meio de propagação das ondas, como, por exemplo, barras de aço inseridas no concreto, as quais, quando localizadas próximas da superfície de exploração, geram reflexões bastante nítidas em relação às barras mais profundas.

Para ajustar informações nos radargramas, podem ser aplicadas técnicas de processamento dos dados do GPR. Essas técnicas permitem ampliar sinais atenuados, especialmente aqueles provenientes de reflexões distantes da superfície, do mesmo modo que possibilitam a remoção de informações indesejadas causadas por fatores internos e externos que interferem no método. Como resultado, há uma significativa melhora na visualização das respostas nos radargramas.

O processamento dos dados do GPR envolve etapas comuns que permitem converter os resultados expressos em traços, os quais representam os tempos de propagação das ondas eletromagnéticas e a intensidade das reflexões, em distâncias, tanto em profundidade quanto em extensão horizontal. Também possibilitam a delimitação das regiões de interesse nos radargramas, removendo áreas irrelevantes por meio da correção do tempo-zero. Outro ajuste importante é a adequação da velocidade das ondas eletromagnéticas, que transforma o formato hiperbólico das reflexões em uma imagem mais intuitiva, utilizando uma rotina de processamento conhecida como migração.

Quanto à indicação da distância e profundidade nos radargramas, importante avaliar a escolha das escalas dos respectivos eixos, pois, se inadequadas, comprometem a interpretação dos resultados, haja vista a deformação que podem causar na apresentação dos dados.

A semelhança geométrica obtida após o processamento (migração) das respostas do sistema GPR com o meio explorado, em especial no caso de peças de concreto com armadura, é apenas relativa, não correspondendo às dimensões (diâmetro) das barras de aço.

Observou-se no estudo realizado que as aquisições de dados ocorreram em toda a extensão da placa de concreto, sendo essa uma das principais vantagens de se utilizar o método GPR, ou seja, a coleta de informações de forma não destrutiva e contínua, sem a necessidade de significativas interferências, como, por exemplo, a interrupção prolongada do tráfego ou destruição do pavimento para obter amostras.

Após o processamento dos dados, foi possível determinar as posições das armaduras e espessura da placa de concreto, no limite da profundidade de investigação permitida pela antena de 1,6 GHz (em torno de 40 cm). É importante destacar que alguns aspectos dos radargramas foram interpretados após análise do projeto, pois a superfície onde houve a coleta de dados possui inclinação dada pelo aumento da espessura da placa de concreto.

Embora o foco principal deste estudo seja a análise das placas de concreto, os radargramas obtidos (Figuras 14 e 17) também permitiram identificar as interfaces entre o concreto, a camada de CCR (Concreto Compactado a Rolo) e a sub-base.

Dessa forma, o GPR destaca-se como uma solução eficiente e não destrutiva para a avaliação de pavimentos rígidos de concreto, superando as limitações dos métodos tradicionais baseados na extração de corpos de prova. Sua aplicação permite a obtenção de dados contínuos e quase que imediatamente, reduzindo a necessidade de intervenções invasivas e minimizando impactos operacionais, como interrupções no tráfego. Ademais, a tecnologia possibilita a identificação precisa da espessura das placas e do posicionamento das armaduras, contribuindo para diagnósticos mais completos e decisões mais assertivas na inspeção, manutenção e reabilitação dos pavimentos.

5. CONCLUSÕES

Bastante comum na Geofísica para investigação da subsuperfície terrestre, nos últimos anos o sistema GPR passou a ser empregado para estudo de estruturas construídas com os mais variados tipos de materiais como concreto, asfalto e madeira.

Dentre as vantagens do método, destacam-se a possibilidade de investigações não destrutivas, de forma rápida e contínua, com pouca ou nenhuma interferência no meio de interesse, o que foi demonstrado no presente estudo para identificar o posicionamento da armadura e espessura de placas de concreto em pavimentos rígidos. Tais vantagens permitem, por exemplo, a avaliação de patologias do pavimento, elaboração de *as built* e aplicação do método como instrumento auxiliar na fiscalização de obras.

Outra característica relevante do método é a possibilidade de processar suas respostas por meio de *softwares*, permitindo inserir, remover ou realçar informações nos radargramas para aprimorar a análise dos dados.

Ressalta-se que o uso do GPR exige o conhecimento tanto da fundamentação teórica do método como do funcionamento dos dispositivos de coleta de dados para que se obtenha respostas adequadas, particularmente em relação ao meio de propagação das ondas eletromagnéticas e escolha dos equipamentos necessários.

Assim, para a aplicação eficiente do GPR na avaliação de pavimentos rígidos de concreto, é fundamental selecionar a frequência da antena conforme a profundidade de investigação e a resolução desejada. Além disso, a calibração do equipamento deve considerar a permissividade dielétrica do meio, garantindo maior precisão nos resultados. O processamento dos dados também desempenha um papel importante, aprimorando a interpretação e facilitando a identificação das características estruturais do pavimento.

Por fim, sendo o GPR método de ensaio não destrutivo em desenvolvimento na construção civil, há a necessidade de outros estudos para validação e desenvolvimento de funcionalidades de interesse para a engenharia como, por sugestão, a investigação das camadas mais profundas (granulares) dos pavimentos de concreto e construção de um campo de testes para aquisição de dados experimentais de outros tipos de pavimentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFRASIABI, A.; FARAMARZI, A.; CHAPMAN, D.; KESHAVARZI, A. Optimising Ground Penetrating Radar data interpretation: a hybrid approach with ai-assisted kalman filter and wavelet transform for detecting and locating buried utilities. **Journal Of Applied Geophysics**, [S.L.], v. 232, p. 105567, jan. 2025.

AMBROSANIO, M.; BEVACQUA, M. T.; ISERNIA, T.; PASCAZIO, V. Electromagnetic Imaging of GPR Data: theory and experiments. In: SERHIR, Mohammed; LESSELIER, Dominique. **Ground Penetrating Radar**: from theoretical endeavors to computational electromagnetics, signal processing, antenna design and field applications. London: Iste e Wiley, 2024. Cap. 1. p. 1-23.

CIAMPOLI, L. B.; TOSTI, F.; ECONOMOU, N.; BENEDETTO, F. Signal Processing of GPR Data for Road Surveys. **Geosciences**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 96, 19 fev. 2019.

CONYERS, L. B. **Ground-Penetrating Radar for Geoarchaeology**. Oxford: Wiley, 2016. 147 p.

EMPRESA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO DE CAMPINAS (EMDEC). **Intercamp - Área 3 - Estação de Transferência Amarais**. Projeto Executivo - Pavimentação - Planta e Cortes (Código DE-ET-AM-00-PE-PAV-001), mar. 2007.

GOMES, J. P. S.; OLIVEIRA, M. F.; FONTES, A. S.; MONTE, M. J. M. Dimensionamento de pavimento armado com tráfego de veículos pesados: km 57 da rodovia AM-010. In: **CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC**, 2018, Maceió. Anais [...]. Maceió: CONFEA, 2018.

GOOGLE. **Google Earth**. Version 7.3. 2018. Nota (Ruas Sylvia da Silva Braga e Dário Freire Meirelles). Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep.html>. Acesso em: 3 ago. 2018.

GSSI. **SIR 3000 Manual**. Nashua: Geophysical Survey Systems, Inc., 2017. 99 p.

JOSHAGHANI, A.; SHOKRABADI, M.. Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements. International Journal Of Pavement Engineering, [S.L.], v. 23, n. 13, p. 4504-4531, 19 jul. 2021.

MOJAHID, A.; OUAI, D.; AMRAOUI, K.; EL-HAMI, Khalil; AITBENAMER, H. Intelligent recognition of subsurface utilities and voids: a ground penetrating radar dataset for deep learning applications. **Data In Brief**, [S.L.], v. 59, p. 111338, abr. 2025.

OLIVEIRA, S. A.; MORAIS DE OLIVEIRA, A.; BRANDSTETTER, M. .C. G. O. Revisão bibliográfica de métodos não destrutivos para investigação em campo de falhas em sistema de impermeabilização: Termografia por Infravermelho, Georadar (GPR) e Condutividade Elétrica. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 2, p. 80-95, 29 dez. 2023.

RASOL, M. A.; PÉREZ-GRACIA, V.; FERNANDES, F. M.; PAIS, J. C.; SANTOS-ASSUNÇAO, 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, p. 107662, jul. 2020.

SANDMEIER, K. J. **ReflexW 7**. Karlsruhe, Germany, Sandmeier, 2012. Disponível em: http://www.sandmeier-geo.de. Acesso em: 5 set. 2018.