

# Modelagem numérica do uso do *ground penetrating radar* na investigação de defeitos em pavimentos flexíveis

Maria Teresa Françoso<sup>1</sup>, Heloisa Moraes Treiber<sup>2</sup>, Irving J. Pizarro Marchena<sup>3</sup>, Felipe Farina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de InfrA, FEC, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo – Brasil, mteresa@fec.unicamp.br

<sup>2</sup>Departamento de InfrA, FEC, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo – Brasil, heloisa.moraes@gmail.com

<sup>3</sup>Departamento de InfrA, FEC, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo – Brasil, ipizarro@itcr.ac.cr

<sup>4</sup>Departamento de InfrA, FEC, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo – Brasil, felipe.farina.90@gmail.com

## Recebido:

3 de novembro de 2018

## Aceito para publicação:

21 de julho de 2019

## Publicado:

30 de abril de 2020

## Editor de área:

Francisco Thiago Aragão

## Palavras-chaves:

GPR-Ground Penetrating Radar,  
FDTD,  
Simulações numéricas GPR 2D,  
Avaliação,  
Defeitos,  
Pavimento flexível.

## Keywords:

GPR-Ground Penetrating Radar,  
FDTD,  
GPR 2D numerical simulation,  
Evaluation,  
Distresses,  
Flexible pavement.

DOI:10.14295/transportes.v28i1.1883



## RESUMO

Em geral os defeitos em pavimento são identificados quando tornam-se visíveis a olho nu, sendo diagnosticados por meio de métodos destrutivos e de modo amostral. O *ground penetrating radar* (GPR) é um método de investigação não destrutiva (IND), utilizado no pavimento desde a década de 1970. Este trabalho tem como objetivo demonstrar a importância da modelagem numérica ao se trabalhar com GPR para a investigação de defeitos em pavimentos e suas gêneses utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo no simulador numérico gprMax. Foram modelados levantamentos em três cenários: ausência de defeitos aparentes; afundamento por consolidação em trilha de roda e presença de tapa-buraco. As respostas obtidas por modelagem foram comparadas aos resultados dos levantamentos de campo. Como contribuição do artigo pode-se demonstrar a importância da modelagem como ferramenta na formação de profissionais; no planejamento dos serviços de campo, além de facilitar a interpretação dos dados.

## ABSTRACT

Pavement distress is only identified when they reach the surface and become visible to the naked eye. The diagnosis of internal failures is made by destructive and sampling methods. The ground penetrating radar is a promising non-destructive testing (NDT) technique, used in pavement surveys since the 1970s. This work aims to show the potential of the GPR method for the investigation of pavement distress and its genesis through finite-difference time-domain (FDTD) simulation of the GPR signal, with the gprMax numerical simulator. They were modeled in three different scenarios, in which will be represented: a pavement structure without apparent distress; a structure with subgrade rutting and a structure with a patch. The responses obtained by modeling were compared to the results of field surveys. As a contribution of the article it can be demonstrated the importance of modeling as a tool in the training of professionals and in the planning of field services, besides facilitating the interpretation of field data.

## 1. INTRODUÇÃO

Em geral os defeitos em pavimentos só são identificados quando atingem a superfície e tornam-se visíveis a olho nu. O diagnóstico de alterações internas é feito por meio de furos de sondagem e abertura de poços, em intervalos constantes e em pontos de interesse específico, quando há indícios de problemas. Trata-se de levantamentos amostrais, nos quais ocorrências e informações importantes podem deixar de ser levadas em consideração e, no caso de abertura de poços, destrutivos, custosos e demorados, que impactam na operação da via.

O GPR ou radar de subsuperfície (Porsani, 1999) é um método geofísico de investigação da subsuperfície que emprega ondas de rádio para buscar contrastes nas propriedades eletromagnéticas dos materiais – permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ); condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) – objetivando mapear estruturas e características ocultas no solo ou em estruturas feitas pelo homem (Annan, 2001) de modo não destrutivo.

Por sua capacidade de detectar mudanças nas propriedades dos materiais, o método tem sido usado com sucesso na detecção de patologias, o que é comprovável pela vasta bibliografia disponível. Citam-se o manual do Reino Unido (Highways England, 2008); os trabalhos dedicados ao emprego do GPR na detecção de mudanças nos teores de umidade nas camadas do pavimento (Grote *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2006; Venmans *et al.*, 2016); na previsão de bombeamento de finos do subleito (Tosti e Benedetto, 2012) e na detecção de trincas (Diamanti e Redman, 2012; Krysiński e Sudyka, 2013; Solla *et al.*, 2014).

É possível observar pela bibliografia citada ao longo deste artigo que a utilização do GPR para a investigação de defeitos em pavimentos está consolidada, porém a propagação de ondas em meios estratificados com descontinuidades de formato aleatório – caso de pavimentos com defeitos – é um fenômeno eletromagnético complexo, cuja compreensão pode ser difícil para profissionais de Engenharia de Transportes.

A importância da modelagem numérica ao se trabalhar com o GPR para a detecção de defeitos em pavimentos e para investigação de suas gêneses será demonstrado por meio de simulações numéricas 2D executadas com o simulador numérico gprMax (Warren *et al.*, 2016; Warren e Giannopoulos, 2018). O gprMax é um simulador da propagação de ondas eletromagnéticas desenvolvido para modelar o GPR utilizando o método FDTD para resolver em 3D as equações de Maxwell (Warren *et al.*, 2016).

### 1.1. Objetivo

O objetivo neste trabalho é demonstrar a importância da modelagem numérica ao se trabalhar com o método GPR para a investigação de defeitos em pavimentos e suas gêneses. Para tanto foi utilizado o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD – *finite-difference time-domain*) por meio do simulador numérico gprMax. Isto será possível comparando-se as respostas oriundas da modelagem com as obtidas em campo utilizando um equipamento GPR.

Serão abordados temas como: histórico de aplicações do GPR na caracterização de pavimentos para contextualização da utilização do método, critérios de modelagem eletromagnética (discretização espacial e temporal; condição de estabilidade; condições de fronteiras de absorção; definição de domínio; características do transmissor e do receptor; frequência central; janela temporal; intervalo de amostragem espacial e número de traços); parâmetros constitutivos dos materiais das camadas; geometria da estrutura e dos defeitos investigados; bem como a comparação entre dados obtidos por meio de modelagem e os obtidos em levantamento de campo.

## 2. BREVE HISTÓRICO DE APLICAÇÕES DO GPR NA INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTOS

Solla *et al.* (2016) citam os trabalhos de Hironaka *et al.* (1976) e Kovacs e Morey (1983) como exemplos das primeiras aplicações do GPR em pavimentos a serem descritas. Um dos primeiros sistemas para inspeção de rodovias montados em veículos foi desenvolvido pela *Federal Highway Administration* (FHWA) em 1985 (Clemeña *et al.*, 1986).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) publicou no final da década de 1990 normas sobre o uso do GPR para a determinação da espessura de camadas do pavimento (ASTM, 2015) e investigação da subsuperfície (ASTM, 2011).

O *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) incluiu o GPR como ferramenta para estimativa das espessuras das camadas e para investigação das condições do pavimento na versão de 2002 do *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* (NCHRP, 2004). Em 2004 a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) publicou o *Standard Practice for Application of Ground Penetrating Radar to Highways*, para instruir o engenheiro rodoviário na aplicação de GPR sem-contato em instalações de transporte (AASHTO, 2004).

Como exemplos de especificações e manuais europeus para estimativa das espessuras das camadas e para investigação das condições do pavimento para projetos de restauração citam-se o do Reino Unido (*Highways England*, 2008); conjunto entre Finlândia, Suécia e Noruega (*Mara Nord Project*, 2011); Bélgica (Grégoire et al., 2016) e o da *European GPR Association* (EUROGPR, 2016).

O método é reconhecido por autores nacionais como uma ferramenta para estimativa de espessuras para fins de inventário em nível de rede (Gonçalves e Ceratti, 1998); avaliação estrutural (Gonçalves e Ceratti, 1998; Medina e Motta, 2005; Balbo, 2007); controle executivo (Gonçalves e Ceratti, 1998) e na identificação dos materiais das camadas (Balbo, 2007).

Com o reconhecimento e o interesse crescente, diversos autores têm se dedicado ao tema e as perspectivas são animadoras. Citam-se trabalhos sobre aplicações do GPR em pavimentos flexíveis rurais e urbanos (Lopes, 2009; Françoso et al., 2013; Vieira e Gandolfo, 2013; Silva, 2014; Treiber, 2016); pavimento rígido urbano (Santos et al., 2015) e aeroportuário (Silva et al., 2011).

### 3. MODELAGEM NUMÉRICA

#### 3.1. Concepção do modelo numérico

Para simular os resultados obtidos em um levantamento com o GPR para a estrutura existente, geraram-se modelos numéricos 2D por meio do programa de código aberto gprMax. O simulador numérico dá suporte à geração de modelos 3D, mas em função da capacidade e do tempo de processamento requeridos e por se tratar de um trabalho com objetivos educacionais, optou-se por considerar as características do pavimento na terceira dimensão constantes e gerar modelos 2D dos cenários estudados. Os modelos 2D são obtidos ao adotar-se um domínio computacional que, na dimensão considerada constante, tenha o tamanho de uma única célula, definida como o elemento de discretização.

Modelou-se o transmissor (Tx) como uma fonte linear (dipolo), não blindada, para fins de simplificação. Utilizou-se para Tx a frequência central de 900 MHz – a mesma do equipamento utilizado para os levantamentos de campo – e adotou-se a forma de onda denominada Ricker, que é a segunda derivada normalizada negativa de uma função gaussiana. Adotou-se ainda um afastamento entre Tx e o receptor (Rx) de 155 mm e posicionou-se ambos 25 mm acima da superfície do pavimento.

Para resolver as equações de Maxwell pelo método FDTD com o gprMax foram necessárias as discretizações espaciais  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  e temporal  $\Delta t$  (Warren et al., 2016). Adotou-se para a

discretização espacial o critério de que o passo deveria ser pelo menos dez vezes menor do que o menor comprimento de onda do campo eletromagnético propagado (Warren *et al.*, 2016):

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (1)$$

em que  $\Delta l$ : passo de discretização espacial [mm];

$\lambda$ : comprimento de onda do campo eletromagnético propagado [mm].

O passo de discretização espacial escolhido para a frequência central de 900 MHz – que corresponde a uma frequência máxima de 3600 MHz – é  $\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z = 2$  mm. Este valor atende ao critério representado pela Equação 1.

A discretização temporal relaciona-se à discretização espacial por meio de uma condição de estabilidade conhecida como CFL (Courant, Freidrichs e Lewy), representada pela Equação 2, que deve ser satisfeita para que o problema proposto seja solucionado corretamente (Warren *et al.*, 2016):

$$\Delta t = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2)$$

em que  $\Delta t$ : passo de discretização espacial [ns];

$c$ : velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo (velocidade da luz)  $\approx 300$  mm/ns;

$\Delta x = \Delta y = \Delta z$ : passos de discretização espacial nas direções x, y e z [mm];

Como o programa calcula automaticamente o valor de  $\Delta t$  (Warren *et al.*, 2016), não é necessário que ele seja informado pelo usuário e é garantida a satisfação à condição de estabilidade.

Uma preocupação ao se trabalhar com o método FDTD é a interferência das ondas eletromagnéticas refletidas nos limites do domínio computacional sobre o resultado das simulações. Para evitar tal interferência adotam-se as condições de fronteiras de absorção (ABC – *absorbing boundary conditions*), que podem ser descritas como camadas virtuais dispostas no entorno do domínio computacional com a finalidade de absorver as ondas eletromagnéticas propagadas e permitir a simulação de um espaço semi-infinito (Benedetto *et al.*, 2014).

Para garantir resultados confiáveis, recomenda-se que fontes e alvos do modelo estejam pelo menos 15 células afastadas das ABC e que haja pelo menos 15 células de espaço livre (ar) acima da fonte (Warren *et al.*, 2016). A fim de atender a estas recomendações alongou-se horizontalmente o domínio inicialmente previsto (1000 × 1000 mm) em 200 mm para cada lado e acresceu-se uma “camada” de espaço livre de 100 mm acima da superfície do pavimento, resultando num domínio de 1400 × 1100 mm. Finalmente, adotou-se uma janela temporal (*time window*) de 15 ns e um intervalo de amostragem espacial de 20 mm para todos os casos, o que resultou em B-scans compostos por 55 traços.

### 3.3. Geometria, materiais e parâmetros constitutivos da estrutura de pavimento e defeitos investigados

Adotou-se como base para a simulação estrutura apresentada na Figura 3.1, compatível com o tipo de pavimento adotado nas avenidas perimetrais do campus da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) – situado no distrito de Barão Geraldo, município de Campinas, a cerca de 100 km de São Paulo – e que considera a presença de um reforço de 3 cm no revestimento:

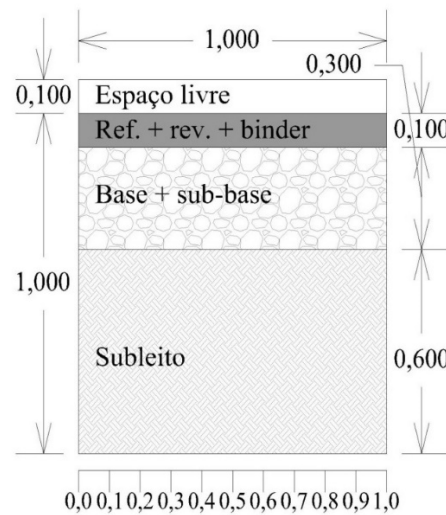


Figura 3.1. Seção da estrutura de pavimento simulada. Dimensões em [m].

Os parâmetros constitutivos dos materiais das camadas – cujo valores são compatíveis com os encontrados na literatura (Saarenketo, 2006; Cassidy, 2009; ASTM, 2011) – são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Parâmetros constitutivos dos materiais das camadas

Camada	Material	Espessura [cm]	Permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon$ )	Condutividade elétrica ( $\sigma$ ) [mS/m]	Permeabilidade magnética relativa ( $\mu$ )
Tapa-buraco		-			
Reforço	C.A.	3,0	4	$10^{-4}$	1
Revestimento		3,0			
Binder		4,0			
Base	Material granular	15,0	6	$10^{-4}$	1
Sub-base		15,0			
Subleito	Areia siltosa seca	60,0	7	$10^{-4}$	1

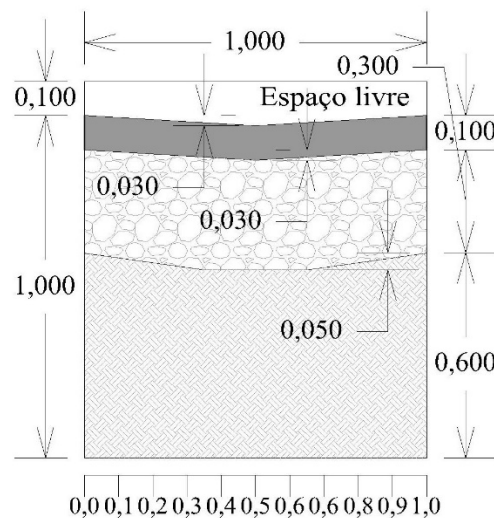
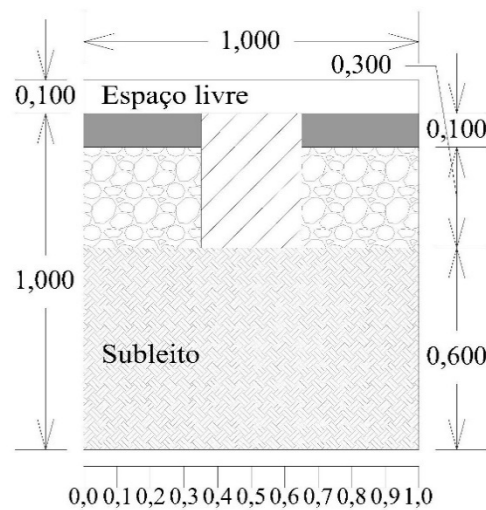


Figura 3.2. Seção da estrutura de pavimento simulada, com presença de afundamento por consolidação em trilha de roda. Dimensões em [m].



**Figura 3.3.** Seção da estrutura de pavimento simulada, com presença de tapa-buraco. Dimensões em [m].

Em meios homogêneos, isotrópicos e lineares a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) é constante. Assim sendo consideraram-se as camadas homogêneas, isotrópicas e lineares e os parâmetros constitutivos independentes da frequência.

Simularam-se os seguintes defeitos: afundamento por consolidação em trilha de roda (Figura 3.2) e tapa-buraco (Figura 3.3).

## 4. LEVANTAMENTO DE CAMPO

### 4.1. Local de estudo

Os locais estudados estão localizados no sistema viário do campus da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

### 4.2. Equipamentos utilizados

Para o levantamento com o GPR utilizou-se o equipamento modelo SIR System 3000 da Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), com antena de 900 MHz. Para demarcação do eixo de cada uma das seções e cadastramento dos pontos de referência, que na fase de processamento seriam utilizados para a correção topográfica das seções levantadas com o GPR, utilizou-se a estação total modelo Nivo 5C da Nikon.

### 4.3. Programas para processamento e análise dos dados levantados

Para o processamento e análise dos dados levantados com o GPR utilizou-se os programas RADAN 7 (2017) e Reflex-Win (2019). Para o levantamento topográfico utilizou-se o programa TopoEVN (2011).

### 4.4. Descrição do levantamento de campo

Com o auxílio da estação total locaram-se os eixos das seções transversais em três diferentes locais de uma mesma via, que apresentavam características que correspondiam àquelas das seções modeladas: ausência de defeitos aparentes; presença de afundamento por consolidação em trilha de roda e presença de tapa-buraco. Em seguida cadastraram-se ao longo dos eixos de cada uma das seções transversais os pontos de referência: a cada 50 cm na seção sem defeitos aparentes (11 pontos); a cada 10 cm na seção com afundamento por consolidação em trilha de

roda (50 pontos) Figura 4.1; a cada 10 cm na região do defeito e a cada 50 cm no restante da seção com tapa-buraco (24 pontos) – Figura 4.2.



**Figura 4.1.** Pontos de referência cadastrados na seção transversal com afundamento por consolidação em trilha de roda.



**Figura 4.2.** Pontos de referência cadastrados seção transversal localizada na região do tapa-buraco.

Por fim executaram-se os levantamentos com o GPR, que consistiram em mover o equipamento ao longo dos eixos retromencionados.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Os perfis obtidos com o GPR não são imagens propriamente ditas da subsuperfície e sim registros temporais das respostas dos materiais à propagação de energia eletromagnética captados pela antena receptora, que registra sua amplitude; frequência e tempo de percurso em relação ao instante no qual o pulso foi propagado pela antena transmissora.

O pulso refletido é representado por uma ondaleta, denominada traço ou *A-scan*, que relaciona a amplitude do sinal com o tempo. Quanto maior o contraste entre as camadas subsequentes, maior será o coeficiente de reflexão na interface e, conseqüentemente, maior será a amplitude. Ao se dispor os traços sequencialmente em relação à distância de deslocamento, cria-se um registro da resposta do pavimento em forma de perfil. Ao se aplicar uma paleta de cores aos valores de amplitude registrados obtém-se uma imagem denominada radargrama ou *B-scan*.

### 5.1. Resultados obtidos por meio da modelagem numérica

Os radargramas sintéticos apresentados na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 foram obtidos para as condições descritas em 3.

É possível perceber em todas as figuras as interfaces entre camadas compostas por materiais com propriedades eletromagnéticas contrastantes. Interfaces entre camadas compostas por materiais com propriedades eletromagnéticas similares, como no caso do reforço/revestimento/binder e base/sub-base não são facilmente identificáveis, por isso foram modeladas como camadas únicas.

No radargrama sintético apresentado na Figura 5.2 a presença do afundamento por consolidação em trilha de roda e sua geometria são detectáveis em todas as interfaces visíveis, com exceção da superfície do revestimento, fato atribuível à proximidade com a fonte.

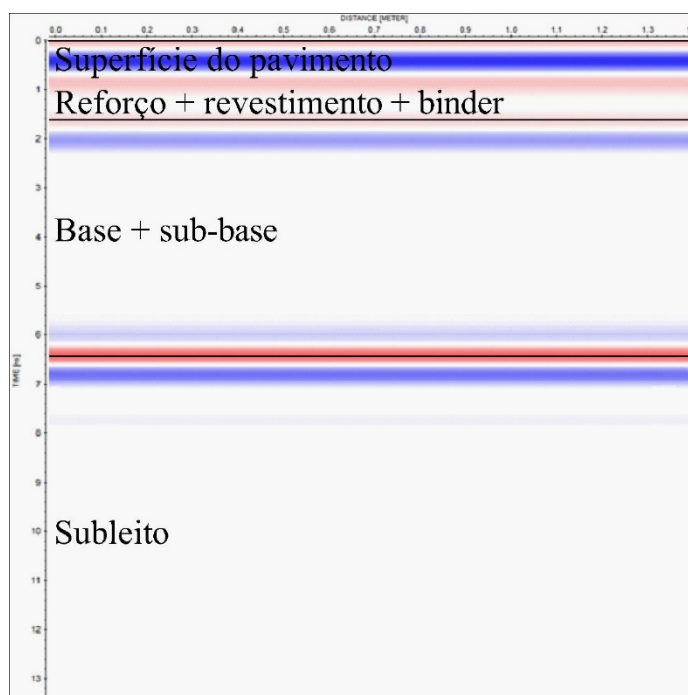
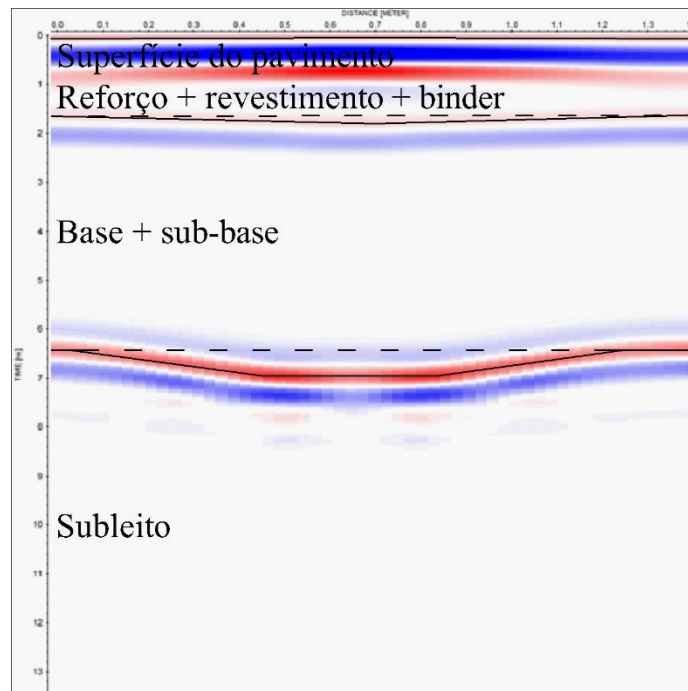
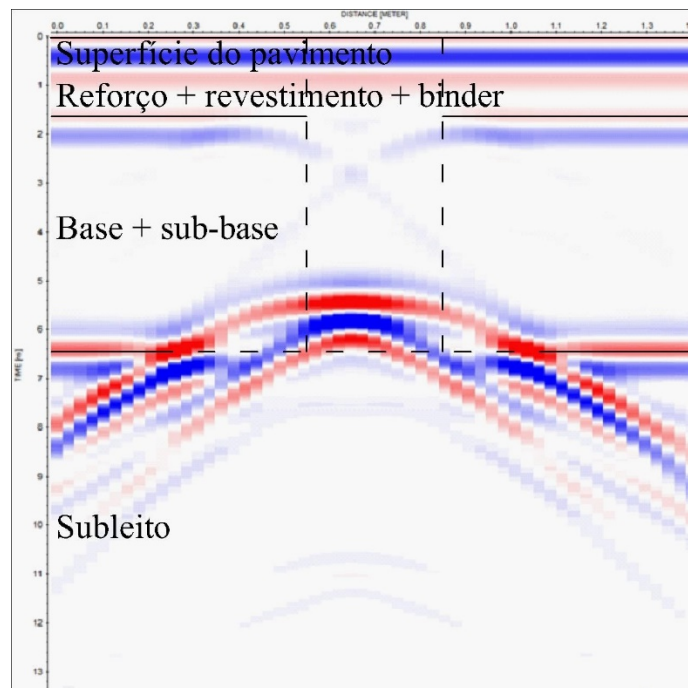


Figura 5.1. Radargrama sintético obtido para a seção com ausência de defeitos aparentes apresentada na Figura 3.1.





**Figura 5.2.** Radargrama sintético obtido para a seção com presença de afundamento por consolidação em trilha de roda apresentada na Figura 3.2.



**Figura 5.3.** Radargrama sintético obtido para a seção com presença de tapa-buraco apresentada na Figura 3.3.

Já no radargrama sintético apresentado na Figura 5.3 a presença do tapa-buraco é identificável pela interrupção da interface reforço/revestimento/binder e base/sub-base – descontinuidade assinalada pelas linha tracejadas verticais – e pela acentuada reflexão na base do tapa-buraco. A onda se propaga pelo tapa-buraco e como há contraste entre o C.A. e o solo, há diferença na velocidade de propagação. As linhas que se cruzam formando um “x” são os ramos das hipérboles formadas na transição entre base/sub-base e remendo.

### 5.2. Resultados obtidos em campo

Os radargramas apresentados na Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6 foram obtidos para as condições descritas em 4.

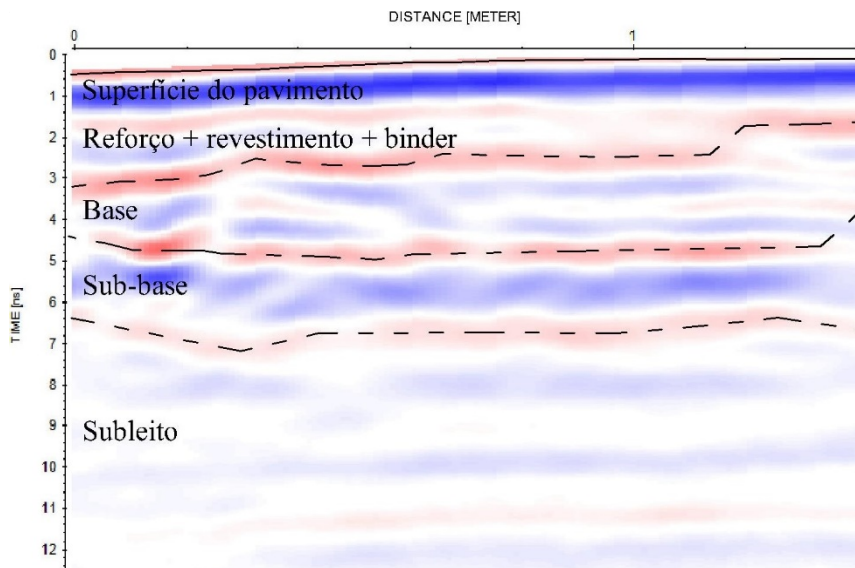


Figura 5.4. Radargrama obtido em campo para a seção com ausência de defeitos aparentes.

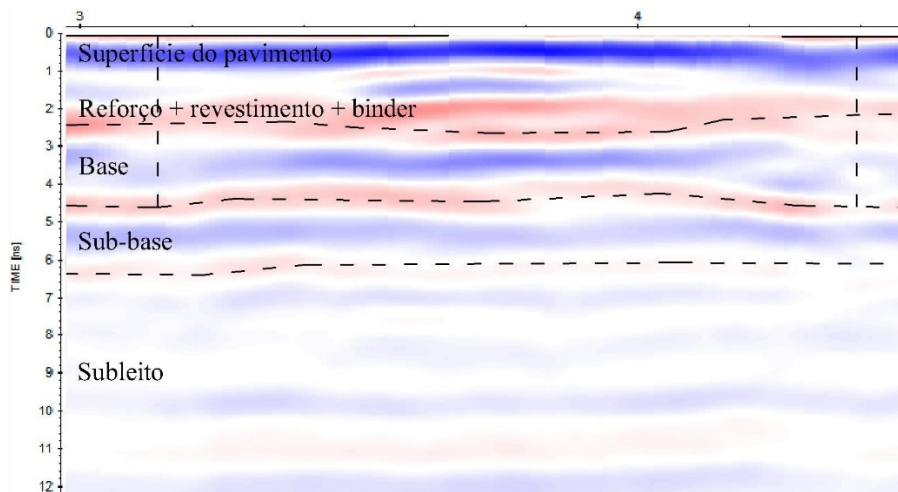


Figura 5.5. Radargrama obtido em campo para a seção com presença de tapa-buraco.

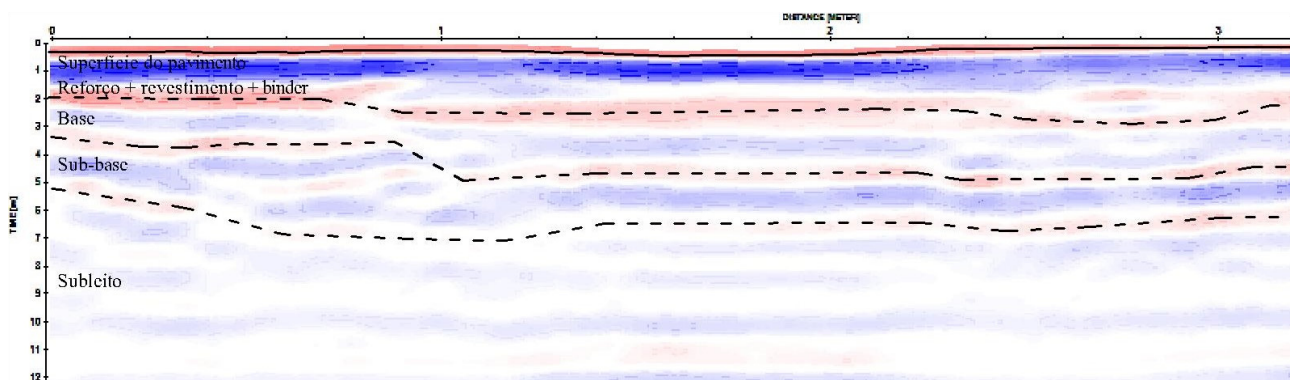


Figura 5.6. Radargrama obtido em campo para a seção com presença de afundamento por consolidação em trilha de roda.

A interface entre as camadas é delimitada pelas reflexões de polaridade positiva (em vermelho). É possível detectar a presença de afundamento em todas as seções. Na Figura 5.4 é possível observar o abaulamento transversal da via na superfície do pavimento, entre 0,0 m e 1,0 m e o afundamento, entre 0,1 m e 1,3 m, aproximadamente.

No radargrama apresentado na Figura 5.5 é possível observar um afundamento acentuado na interface entre as camadas asfáltica e a granular, entre 3,1 m e 3,4 m, aproximadamente. A delimitação do tapa-buraco, indicada pelas linhas verticais, é feita ao se identificar a interrupção da interface por meio da redução da amplitude do sinal, a qual é perceptível pela diminuição da intensidade do vermelho e do azul e a presença do branco, que corresponde à amplitude zero. A posição dos limites indicados e a extensão do tapa-buraco são compatíveis com os dados obtidos no levantamento topográfico. Trata-se um bom exemplo do uso combinado do GPR com outras técnicas de investigação, tais como a inspeção visual: a descontinuidade transversal identificável é comprovada em campo pelo tapa-buraco, e o mesmo é delimitado ao se avaliar o radargrama. No radargrama apresentado na Figura 5.6 é possível observar o afundamento por consolidação em trilha de roda na superfície do pavimento, entre 1,2 m e 2,2 m, aproximadamente. Também é possível observar que a deformação das camadas inferiores acompanha a trilha de roda.

Percebe-se em todos os radargramas a redução da amplitude da reflexão à medida em que aumenta a profundidade, fenômeno previsto e que está associado a propagação de energia eletromagnética. Durante a fase de processamento aplicou-se o ganho, com objetivo de compensar a atenuação sofrida pelo sinal.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se por meio de modelagem numérica, a capacidade do GPR em investigar as condições estruturais de pavimentos flexíveis em três cenários diferentes, nos quais foram representados: uma estrutura com ausência de defeitos aparentes; uma estrutura com afundamento por consolidação em trilha de roda e uma estrutura com tapa-buraco. A simulação facilitou a identificação de possíveis patologias nas camadas subsequentes ao revestimento. Os resultados desta etapa foram comparados com as respostas dos levantamentos executados em campo utilizando o equipamento GPR.

Os resultados da simulação numérica e do posterior levantamento de campo demonstram, nos diferentes cenários estudados, que é possível usar o GPR para detectar a presença, a posição, a geometria aproximada e uma possível gênese de defeitos no pavimento, otimizando recursos e reduzindo custos, evitando assim, as sondagens destrutivas e contribuindo no diagnóstico da situação e subsidiando na escolha da restauração adequada para cada cenário.

Como contribuição do artigo, verifica-se que a modelagem numérica quando combinada com os levantamentos de campo geofísicos como o GPR, torna-se uma ferramenta útil na formação de profissionais da área de Engenharia. Dada a sua capacidade em simular cenários, auxilia na compreensão e interpretação dos dados e no planejamento de serviços de campo, evitando intervenções destrutivas, além de otimizar recursos e podendo reduzir custos.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores gostariam de agradecer à Arquiteta Patricia Cordero Castro pelo apoio nos levantamentos de campo.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO (2004). AASHTO R 37-04: *Standard practice for application of ground penetrating radar (GPR) to highways*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Annan, A. P. (2001). *Ground penetrating radar workshop notes*. Mississauga: Sensors & Software.
- ASTM (2011). ASTM D6432 - 11: *Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*. West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI:10.1520/D6432-99.
- ASTM (2015). ASTM D4748 - 10: *Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar*. West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI:10.1520/D4748-10R15.
- Balbo, J. T. (2007). *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Benedetto, A.; Tosti, F.; Pajewski, L.; D'Amico, F.; Kusayanagi, W. (2014). *FDTD simulation of the GPR signal for effective inspection of pavement damages*. Proceedings of The 15th International Conference On Ground Penetrating Radar, [s.l.], p.513-518 2014. IEEE. DOI:10.1109/ICGPR.2014.6970477.
- Cassidy, N. J. (2009). *Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids*. In: *Ground penetrating radar: theory and applications*. 1. ed. United Kingdom: Elsevier Science. p. 41-72. DOI:10.1016/B978-0-444-53348-7.00002-8.
- Chen, D. H.; Chen, T.-T.; Scullion, T.; Bilyeu, J., (2006). *Integration of field and laboratory testing to determine the causes of a premature pavement failure*. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 33, n. 11, p. 1345-1358. DOI:10.1139/106-079.
- Clemeña, G. G.; Sprinkel, M. M.; Long, R. (1986). *Use of ground-penetrating radar for detecting voids underneath a jointed concrete pavement*. Charlottesville, Virginia: Virginia Highway & Transportation Research Council in Cooperation with the U.S. Department of Transportation. Disponível em: <<https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/19120>>.
- Diamanti, N.; Redman, D. (2012). *Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks*. Journal of Applied Geophysics, Recent, Relevant and Advanced GPR Studies in Applied Geophysics. v. 81, p. 106-116. DOI:10.1016/j.jappgeo.2011.09.006.
- EUROGPR. *The European GPR Association guidelines for pavement structural surveys*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.eurogpr.org/vn2/images/documents/GS1601\\_EG\\_Pavements\\_Policy\\_Draft\\_v1\\_0\\_160412.pdf](http://www.eurogpr.org/vn2/images/documents/GS1601_EG_Pavements_Policy_Draft_v1_0_160412.pdf)>.
- Françoso, M. T.; Mota, C. O.; Lima, T. R. S. M.; Peixoto, C. D. F. (2013). *Nondestructive testing in asphalt pavements using ground penetrating radar (GPR)*. Applied Mechanics and Materials, v. 303-306, p. 525-528. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.303-306.525.
- Gonçalves, F. P.; Ceratti, J. A. P. (1998). *Utilização do ground penetrating radar na avaliação de pavimentos*. In: *Anais, São Paulo. Anais*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31. São Paulo: ABPv. Disponível em: <<http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/19.pdf>>.
- Grégoire, C.; Van Der Wielen, A.; Van Geem, C.; Drevet, J.-P. (2016). *BRRC Method of Measurement ME 91/16: Methodologies for the use of ground-penetrating radar in road condition surveys*. Brussels: Belgian Road Research Center. Disponível em: <<http://www.brrc.be/en/item/me9116>>.
- Grote, K.; Hubbard, S.; Harvey, J.; Rubin, Y. (2005). *Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques*. Journal of Applied Geophysics, v. 57, n. 2, p. 129-153. DOI:10.1016/j.jappgeo.2004.10.002.
- Highways England. *Design Manual for Roads and Bridges: Volume 7 - Pavement design and maintenance, Section 3 - Pavement maintenance assessment, Part 2 - Data for pavement assessment HD 29/08*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/dmrb/vol7/section3/hd2908.pdf>>.
- Hironaka, M. C.; Hitchcock, R. D.; Forrest, J. B. (1976). *Detection of voids underground and under pavements*. Port Hueneme, California: Naval Civil Engineering Laboratory. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a030997.pdf>>.
- Kovacs, A.; Morey, R. M. (1983). *Detections of cavities under concrete pavement*. [s.l.]: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Department of the Army. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a131851.pdf>>.
- Krysiński, L.; Sudyka, J. (2013). *GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks*. Journal of Applied Geophysics, Ground Penetrating Radar. v. 97, p. 27-36. DOI:10.1016/j.jappgeo.2013.03.010.
- Lopes, O. A. (2009). *Uso do GPR (ground penetrating radar) em trechos de pavimentos da Cidade Universitária da UFRJ*. 2009. Coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/109-msc-pt-2009/1646-osvaldo-antunes-lobes>>.
- Mara Nord Project. *The use of GPR in road rehabilitation projects*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://maranord.ramk.fi/static/content\\_files/MaraNord\\_GPR\\_rehab\\_guidelines\\_Version\\_3\\_0.pdf](http://maranord.ramk.fi/static/content_files/MaraNord_GPR_rehab_guidelines_Version_3_0.pdf)>.
- Medina, J. de; Motta, L. M. G. da. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. [s.l: s.n.]
- NCHRP (2004). *Evaluation of existing pavements for rehabilitation*. In: NCHRP 1-37A, Final Report: Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. [s.l.] Transportation Research Board.
- Porsani, J. L. (1999). *Ground penetrating radar: proposta metodológica de emprego em estudos geológico - geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado* - SP. IGCE UNESP, Rio Claro.
- RADAN 7: *RADar Data ANalyzer for Windows* (2017). Versão 7.5.18.02270. [S. l.]: Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). Disponível em: <<https://support.geophysical.com/GSSIsupport/>>.
- Reflex-Win (2019). Versão 9.0.5. Karlsruhe, Germany: Sandmeier geophysical research. Disponível em: <<https://www.sandmeier-geo.de/download.html>>.
- Saarenketo, T. (2006). *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*. 2006. Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Oulu.

- Santos, E. J. F.; Françoso, M. T.; Almeida, L. C. de; Paiva, C. E. L.; Sznclwar, M. (2015). *Avaliação geofísica com GPR de pavimento rígido de concreto de cimento Portland*. In: Anais, Bonito, MS. Anais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57 - CBC2015. Bonito, MS.
- Silva, L. A. da (2014). *Uso de georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos*. 2014. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/17355>>.
- Silva, L.; Borges, W.; Cunha, L.; Branco, R.; Farias, M. (2011). *Mapeamento com o GPR das interfaces geotécnicas do pavimento rígido do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro/RJ*. In: Anais, Rio de Janeiro. Anais... In: 12TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY & EXPOGEF. Rio de Janeiro: Brazilian Geophysical Society. DOI:10.1190/sbgf2011-097.
- Solla, M.; Lagüela, S.; González-Jorge, H.; Arias, P. (2014). *Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings*. NDT & E International, v. 62, p. 55–65. DOI:10.1016/j.ndteint.2013.11.006.
- Solla, M.; Lorenzo, H.; Pérez-García, V. (2016). *Ground penetrating radar: fundamentals, methodologies and applications in structures and infrastructure*. In: Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure. London: CRC Press. p. 89–107. DOI:10.1201/b19024.
- Tosti, F.; Benedetto, A. (2012). *Pavement Pumping Prediction Using Ground Penetrating Radar*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, SIIV-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures 2012. v. 53, p. 1044–1053. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.954.
- TopoEVN (2011). Versão 6.9.5.40. [S. l.]: Métrica. 1 CD-ROM.
- Treiber, H. M.; Françoso, M. T.; Almeida, L. C. de (2016). *Aplicações do ground penetrating radar na caracterização de estruturas de pavimento*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, XII - CINPAR 2016. Porto, Portugal.
- Venmans, A. A. M.; Van de Ven, R.; Kollen, J. (2016). *Rapid and Non-intrusive Measurements of Moisture in Road Constructions Using Passive Microwave Radiometry and GPR – Full Scale Test*. Procedia Engineering, Advances in Transportation Geotechnics III. v. 143, p. 1244–1251. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.111.
- Vieira, R.; Gandolfo, O. (2013). *Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (GPR)*. In: Anais, Gramado. Anais. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42 / ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 16. Gramado: ABPv. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/268745098>>.
- Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis I. (2016). *gprMax*: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, Comput Phys Commun, 209, 163-170. DOI:10.1016/j.cpc.2016.08.020.
- Warren, C., Giannopoulos, A. (2018). *A. gprMax*: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. Versão 3.1.4. Edinburgh, Scotland: [s. n.]. Disponível em: <<http://www.gprmax.com/>>.