TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Avaliação das respostas do *ground penetrating radar* às mudanças nas características de britas graduadas para camadas do pavimento

Evaluation of ground penetrating radar responses to changes in crushed stones pavement layers characteristics

Heloisa Moraes Treiber[1], **Maria Teresa Françoso**[1]

[1]Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo – Brasil

contato: heloisa.moraes@gmail.com, (HMT); mteresaf@unicamp.br, (MTF)

Recebido:
5 de maio de 2022
Aceito para publicação:
24 de janeiro de 2023
Publicado:
3 de maio de 2023

Editor de área: Francisco Thiago Sacramento Aragão

Palavras-chave:
GPR-*Ground Penetranting Radar*.
Brita graduada.
Umidade.
Controle tecnológico.

Keywords:
GPR-Ground Penetranting Radar.
Crushed stone.
Moisture.
Quality control.

DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2770

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a sensibilidade do *ground penetrating radar* às variações da granulometria e massa específica aparente de misturas de britas graduadas utilizadas em camadas do pavimento. Foram comparados dois tipos de mistura, uma de graduação densa e uma de graduação aberta: respectivamente a BGS da Faixa B da especificação 141/2010 – ES do DNIT e a base drenante da especificação ET-DE-P00/008 do DER/SP, que foram compactadas em uma caixa de madeira de 40 × 40 × 15 cm confeccionada para esse fim. Para a execução dos ensaios foi utilizado o sistema GPR SIR 3000, da GSSI, com antena blindada de transmissão pelo solo, com frequência central de 1,6 GHz. Visando avaliar a sensibilidade às variações da massa específica aparente foram realizados levantamentos com ambas as misturas nas seguintes condições: teor de umidade variando ±1,0% em relação à umidade ótima; no estado solto e compactadas a 90; 95; 98 e 100% do Proctor Modificado. Em todos os ensaios o objetivo foi detectar variações na permissividade dielétrica, relacionando-as à granulometria e às condições de compactação das misturas. Os resultados obtidos demonstram que, em função do baixo contraste entre as propriedades físicas das duas misturas, o *ground penetrating radar* não foi capaz de diferenciá-las e que é sensível às variações da massa específica aparente, mas não o suficiente para substituir os métodos tradicionais de controle de qualidade da execução de camadas granulares, porém pode ser utilizado para identificar heterogeneidades nas mesmas.

ABSTRACT

This paper presents the study of ground penetrating radar responses to changes in the following characteristics of crushed stones for pavement layers: particle size composition and bulk density. For the execution of the tests was used a ground coupled shielded antenna, with a central frequency of 1.6 GHz, coupled to a control and data storage unit. In order to evaluate the sensitivity of GPR to variations in granulometric composition particle size, two materials were compared, one dense graded and one open graded, respectively, the B gradation from DNIT Specification 141/2010 – ES and the drainage layer gradation from DER/SP specification ET-DE-P00 / 008., which were compacted in a 40 × 40 × 15 cm wooden box made for this purpose. In order to assess the sensitivity to variations in apparent density, surveys were carried out with both mixtures under the following conditions: moisture content varying ± 1.0% in relation to the optimum humidity; uncompacted and compacted to 90%; 95%; 98% and 100% of the Modified Proctor. In all tests, the objective was to detect variations in the relative

dielectric permittivity and to relate it to the granulometry and the conditions of compaction of the mixtures. The results obtained demonstrate that due to the low contrast between the physical properties of the two mixtures compared, the ground penetrating radar was not able to differentiate them and that it is sensitive to variations in the saturation conditions, but that this sensitivity is not sufficient for it to be used as a replacement for traditional methods of quality control in the execution of granular layers, but indicate that it can come to be used to identify heterogeneities in the executed layers.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Pérez, Medina e Romana (2006) camadas granulares em pavimentos flexíveis ou rígidos desempenham um papel importante no seu comportamento, uma vez que a vida útil de projeto dos pavimentos tem relação com a qualidade e a resposta das camadas granulares.

Atualmente, tanto o controle de qualidade na execução de novas camadas quanto o diagnóstico de alterações em camadas existentes são feitos por meio de furos de sondagem e abertura de poços, respectivamente, em intervalos constantes e em pontos de interesse específico; trata-se de levantamentos amostrais nos quais informações importantes podem deixar de ser levadas em consideração, além de serem métodos destrutivos de custo considerável e execução demorada.

O *ground penetrating radar* (GPR) é um método geofísico de investigação da subsuperfície que consiste na emissão de impulsos de ondas eletromagnéticas para dentro dos meios de interesse e análise das respostas obtidas para buscar contrastes nas propriedades eletromagnéticas dos materiais com a finalidade de mapear, de modo não destrutivo, estruturas e características ocultas na subsuperfície (Porsani, 1999; Annan, 2001).

O GPR tem sido utilizado em pavimentos rodoviários desde a década de 1980; inicialmente para a avaliação das espessuras das camadas e, posteriormente, para a investigação da gênese de defeitos e de sua presença em camadas subsuperficiais. Trabalhos recentes dão ênfase 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, van de Ven e J. Kollen, 2016) ou como ferramenta para o controle de qualidade na execução das camadas de base e sub-base granulares (Mara Nord Project, 2011). Cabe destacar que ainda são poucos os trabalhos com este enfoque, pois é necessário avaliar previamente a influência da granulometria e da densidade aparente na permissividade dielétrica, contribuição pretendida por esta pesquisa.

1.1. Objetivo

O objetivo neste trabalho de pesquisa é avaliar a sensibilidade do GPR às variações na granulometria e na massa específica aparente de duas misturas de britas graduadas, sendo uma de graduação densa e, a outra, a de graduação aberta, ambas utilizadas em camadas de pavimentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico do GPR como ferramenta para o controle de qualidade de camadas do pavimento

Como exemplo do uso do GPR para o controle de qualidade de camadas do pavimento, pode-se citar a aplicação consagrada tanto para avaliar espessuras como analisar a densificação de misturas asfálticas por meio da variação das permissividades dielétricas.

Segundo Roimela (1997) *apud* Narbro et al. (2012), o conceito de que misturas asfálticas são materiais compostos e a permissividade dielétrica das misturas é função da permissividade de cada um dos materiais constituintes inclusive do ar presentes nos vazios, foi utilizado para desenvolver o modelo de regressão que serviu de referência para especificação finlandesa, que trata da avaliação *in situ* da permissividade dielétrica (Pank, 2008) e do método de cálculo do volume de vazios a partir da permissividade dielétrica (Pellinen et al., 2015).

Um projeto piloto dentro do âmbito do *The Second Strategic Highway Research Program* (SHRP 2) avaliou o uso de câmeras de infravermelho e do GPR para identificar a densidade *in situ* durante as operações de construção (Sebesta, Scullion e Saarenketo, 2013) além dos problemas relacionados à execução como, por exemplo, a segregação da mistura. A conclusão dos autores foi que o GPR tem vantagem sobre a câmera de infravermelho, pois é usado após compactação; no entanto, desenvolvimentos adicionais seriam necessários antes que uma implantação bem-sucedida pudesse ocorrer.

Hoegh e Dai (2017) descrevem, além da experiência obtida no SHRP 2, estudos realizados no estado de Minnesota (EUA) para implementação do chamado teste de cobertura total, apresentando como resultado recomendações de melhores práticas. Em abril de 2019 a AASHTO publicou a PP 98-19 – *Standard Specification for Asphalt Surface Dielectric Profiling System using Ground Penetrating Radar*, que trata dos requisitos de equipamento e sistema, procedimentos de calibração e verificação dos sistemas de perfilagem dielétrica (*dielectric profiling systems* – DPS) (AASHTO, 2019).

2.2. Propriedades eletromagnéticas dos materiais

A permissividade dielétrica (ε) é a propriedade elétrica mais importante a afetar os resultados de levantamentos com o GPR (Saarenketo, 2006) e descreve a habilidade de um material de armazenar e liberar energia eletromagnética na forma de cargas elétricas (Cassidy, 2009), influenciando na velocidade de propagação da energia eletromagnética, na sua atenuação, no comprimento de onda e na reflexão, refração e transmissão em interfaces. Quando a permissividade dielétrica de um material é expressa em relação à permissividade dielétrica do espaço livre – $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ F/m – recebe o nome de permissividade dielétrica relativa (ε_r) e torna-se adimensional. A Tabela 1 apresenta valores de referência para ε_r.

Tabela 1: Valores de permissividade dielétrica relativa de diferentes materiais utilizados e de valores médios para estruturas (Adaptado de Saarenketo, 2006)

Material	Permissividade dielétrica relativa (ε_r)	Material	Permissividade dielétrica relativa (ε_r)
Ar	1	Bases asfáltica	6 – 7
Água (doce)	81	Bases cimentadas	8 – 10
Leito rochoso (granito)	5 – 7	Pavimentos (novos/secos)	5
Brita	4 – 7	Pavimentos (normais)	6
Concreto asfáltico/outras misturas asfálticas	4 – 8 (com adição de escória 8 – 15)	Pavimentos (antigo/úmido)	7 – 8
Revestimento primário (brita)	12 – 14	Pavimentos com revestimento primário	7 – 9
Base granulares	6 – 8		

É possível observar na Tabela 1 que o valor de ε_r d'água é significativamente maior que dos demais materiais; é por esta diferença que, segundo Saarenketo (2006, p. 24), "[...] o componente mais importante a afetar a permissividade dielétrica de solos e materiais granulares é a água". Saarenketo (1998, p. 74) classifica a água presente em solos e agregados, de acordo com suas propriedades elétricas, como: "(1) água adsorvida, também chamada de água higroscópica; (2) água viscosa ou capilar e (3) água livre". Água higroscópica ou adsorvida é aquela aprisionada a partir do ar em forma de película delgada em torno da superfície negativamente carregada dos minerais (Saarenketo, 1998; Scullion e Saarenketo, 1997). Água viscosa ou capilar é aquela situada entre a água adsorvida e a água livre e se distingue da água adsorvida por não poder ser aprisionada a partir do ar e seu volume varia com a evaporação nas estações quente e seca. (Saarenketo e Scullion, 1996; Saarenketo, 1998).

A permissividade dielétrica em solos e materiais granulares depende, então, do grau de ligação das moléculas de água em torno dos grãos. Como a atração da água livre aos solos e materiais granulares é fraca, podendo responder à ação da gravidade, tem grande impacto na permissividade dielétrica composta. Quanto maior a presença de água livre (ou não aprisionada) no material, maior sua permissividade (Saarenketo e Scullion, 1996; Saarenketo, 1998; Scullion e Saarenketo, 1997).

2.3. Propagação de ondas eletromagnéticas em materiais dielétricos

Segundo Annan (2001, p. 52) "[...] em altas frequências, os campos eletromagnéticos propagam-se como ondas através do meio". Da teoria de propagação de ondas eletromagnéticas originam-se as Equações 1 a 4, apresentadas a seguir, sendo utilizadas em aplicações práticas com o GPR (Saarenketo, 2006).

A velocidade de propagação v está relacionada a ε e μ, expressa pela Equação 1

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

Na qual: v: velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio de interesse [metros por nanosegundo – m/ns];

c = 2,997×10^8 m/s ≈ 0,3 m/ns, é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço livre (velocidade da luz);

μ_r: permeabilidade magnética relativa. A permeabilidade magnética (μ), descreve a habilidade de um material de se magnetizar na presença de um campo magnético. Quando

a permeabilidade magnética de um material é expressa em relação à permeabilidade magnética do espaço livre – $\mu_0 = 4\,\pi\,\times\,10^{-7}$ H/m – recebe o nome de permeabilidade magnética relativa (μ_r) e torna-se adimensional. Para materiais não-ferrosos $\mu_r = 1$.

Quando se conhece a espessura da camada de interesse – em experimentos controlados em laboratório ou a partir de sondagens ou poços de inspeção – é possível estimar v por meio da Equação 2:

$$v = \frac{2d}{T} \tag{2}$$

Sendo: d: espessura da camada [m];
T: é o tempo de ida e volta do sinal entre as reflexões que correspondem ao topo e a base da camada [ns].

Do mesmo modo, quando se conhece a velocidade de propagação na camada de interesse, é possível estimar sua espessura por meio da Equação 3:

$$d = v\frac{T}{2} \tag{3}$$

A partir das Equações 1 e 2 é possível estimar a permissividade dielétrica do material utilizando a Equação 4:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \tag{4}$$

2.4. Materiais multifásicos

Sob a perspectiva da teoria eletromagnética, os materiais granulares são considerados materiais compostos ou multifásicos, constituídos por três fases heterogêneas e com propriedades eletromagnéticas distintas, sendo elas o esqueleto mineral, o ar e a água presentes nos vazios.

A permissividade dielétrica de materiais granulares é sensível às variações nos teores de vazios preenchidos por ar e, principalmente, por água. Na literatura são encontrados modelos que buscam caracterizar a resposta de materiais multifásicos ao ponderar a permissividade da mistura a partir da contribuição de cada fase (Annan, 2001; Cassidy, 2009; Sihvola, 1999).

Sihvola (1999) descreve uma classe de modelos baseada na relação potencial entre as permissividades da mistura e de cada fração, a qual pertence o modelo de mistura refrativa (*refractive mixing model*) adotado neste trabalho. Cassidy (2009, p. 64) refere-se a tal modelo como sendo o índice de refração complexo (*complex refractive index model* – CRIM) e o descreve como adequado "para a maioria das aplicações práticas" por fornecer "uma boa analogia com a resposta de materiais reais". Para materiais granulares o modelo é expresso pela Equação 5:

$$\varepsilon_{mat.} = \left[\left(N_e S\sqrt{\varepsilon_{água}}\right) + \left((1-N_e)\sqrt{\varepsilon_{agreg.}}\right) + \left(N_e(1-S)\sqrt{\varepsilon_{el}}\right)\right]^2 \tag{5}$$

Na qual: N_e: porosidade efetiva [%];

S: saturação [%];

$\varepsilon_{mat.}$: permissividade dielétrica relativa efetiva da mistura (adimensional);

$\varepsilon_{água.}$: permissividade dielétrica relativa da água (adimensional);

$\varepsilon_{agreg.}$: permissividade dielétrica relativa da matriz granular (adimensional);

ε_{el}: permissividade dielétrica relativa do espaço livre (adimensional).

A porosidade efetiva, definida como "uma indicação da quantidade de água que realmente pode ser drenada do material saturado" (Suzuki, Azevedo e Kabbach Jr., 2013, p. 85) e a saturação, definida como uma "medida da quantidade de água existente num solo ou material granular" (Suzuki, Azevedo e Kabbach Jr., 2013, p. 86), são expressas, respectivamente, pelas Equações 6 e 7:

$$N_e = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_h \times \gamma_d} \times \left(1 + \gamma_d \times h\right) \quad (6)$$

$$S = \frac{N - (Ne \times U)}{N} \quad (7)$$

Sendo: γ_s: = massa específica aparente seca [g/cm^3];

γ_d: = massa específica dos grãos [g/cm^3];

γ_h = 1 g/cm^3, é massa específica da água;

h: teor de umidade [%];

N: porosidade [%];

U: porcentagem de drenagem = 50%.

Destaca-se que a Equação 7 foi deduzida a partir do cálculo de volume de água remanescente e saturação apresentadas por Suzuki, Azevedo e Kabbach Jr. (2013, pp. 86-87).

N é expresso pela Equação 8:

$$N = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \quad (8)$$

2.5. Construção de imagens com o GPR

Os perfis obtidos com o GPR são registros temporais das respostas dos materiais à propagação de pulsos de energia eletromagnética captados pela antena receptora que, por sua vez, mostra a 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, consequentemente, 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. Após a aplicação de uma paleta de cores aos valores de amplitude registrados obtém-se uma imagem denominada radargrama ou *B-scan*.

Na Figura 1a observa-se a demonstração de um traço típico do GPR e na Figura 1b nota-se a construção de um radargrama a partir da disposição dos traços e aplicação de uma paleta de tons de cinza, que atribui o preto à amplitude máxima negativa, o branco à amplitude máxima positiva e diferentes tons de cinza aos valores intermediários.

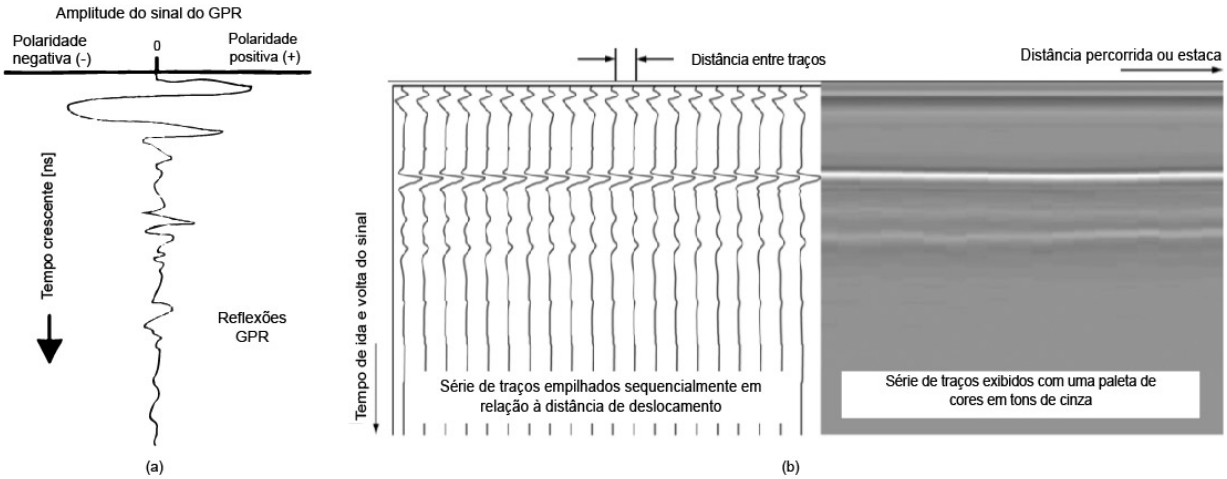


Figura 1. (a) Ilustração esquemática de um traço típico do GPR; (b) Exemplo de uma série da traços do GPR empilhados. Fonte: (a) adaptado de ASTM (2011); (b) adaptado de ASTM (2015)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Concepção do experimento

Com objetivo de avaliar a sensibilidade do GPR às variações na granulometria e na massa específica aparente de britas graduadas utilizadas em camadas de pavimentos, optou-se por comparar dois tipos de misturas de britas graduadas: uma de graduação densa e uma de graduação aberta. Como referência para a mistura de graduação densa escolheu-se uma BGS da Faixa B da especificação 141/2010 – ES (DNIT, 2010) e para a mistura de graduação aberta escolheu-se a faixa granulométrica recomendada para base drenante da especificação ET-DE-P00/008 (DER/SP, 2005), apresentadas na Figura 2.

Cada mistura foi compactada em 3 camadas de 50 mm, em uma caixa de madeira, com o uso de martelete vibratório e placa compactadora, utilizando-se o grau de compactação (GC) como referência para os valores a serem atingidos. A cada valor de GC foram feitas leituras com o GPR para relacionar ε com a massa específica aparente seca (γ_s); paralelamente, como apoio e validação, empregou-se o modelo expresso pela Equação 5 para calcular os valores teóricos de permissividade dielétrica.

Os valores de porosidade efetiva (Ne) e de saturação (S) foram calculados de acordo com o descrito no item 2.5. Foram adotados os seguintes valores para as permissividades de cada fração: $\varepsilon_{el} = 1$; $\varepsilon_{água} = 81$, em concordância com a Tabela 1, e $\varepsilon_{agreg.} = 5$, menor valor para granito apresentado por Porsani (1999, p. 30). Visando estabelecer curvas de referência, foram calculados valores de $\varepsilon_{teórica}$ para as seguintes condições: GC = 50; 60; 70, 80; 90; 95; 96; 97; 98; 99 e 100%.

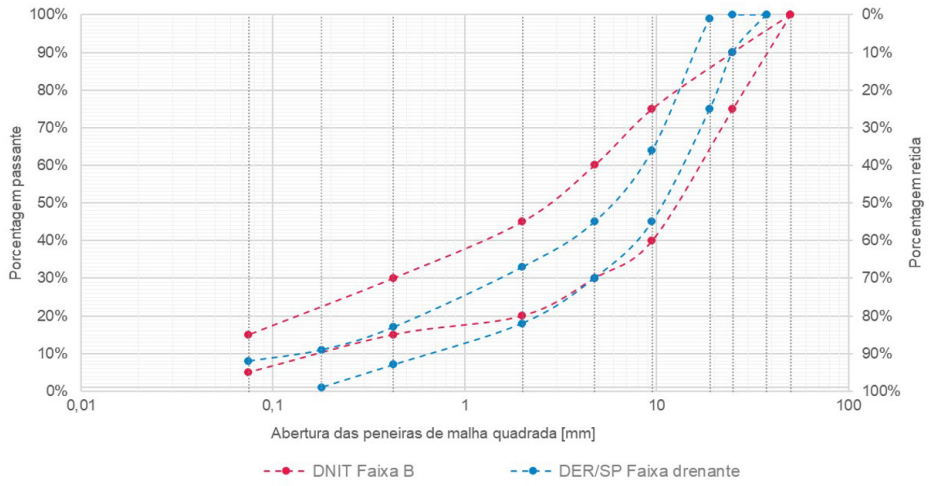


Figura 2. Faixas granulométricas de referência. Fonte: DER/SP (2005) e DNIT (2010)

3.2. Material granular

As amostras de agregados utilizados nesta pesquisa foram fornecidas por uma pedreira comercial situada no município de Sorocaba, região sudoeste do Estado de São Paulo, em um afloramento do Maciço Granítico Sorocaba (Luque, 2015).

Denominou-se BGS a curva granulométrica composta para a Faixa B da especificação do DNIT e Mistura Drenante (MD) a curva granulométrica composta para a faixa recomendada para base drenante pelo DER/SP. As curvas granulométricas compostas são apresentadas na Figura 3.

A análise granulométrica das amostras seguiu as orientações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). A determinação de γ_d dos agregados graúdos e miúd os foi executada por fração, para a condição seca, conforme métodos prescritos pelo ME 195/97 (DNER, 1997) e ME 194/98 (DNER, 1998), respectivamente. Os ensaios de compactação para determinação $h_{ót.}$ e $\gamma_{smáx}$ foram executados em amostras das duas misturas, utilizando a energia modificada, conforme método prescrito pela NBR 7182 (ABNT, 2016). As características físicas: massa específica (γ_d); umidade ótima ($h_{ót}$) e massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{smáx.}$), obtidas para o Proctor Modificado, da BGS e da Mistura Drenante são apresentadas na Tabela 2.

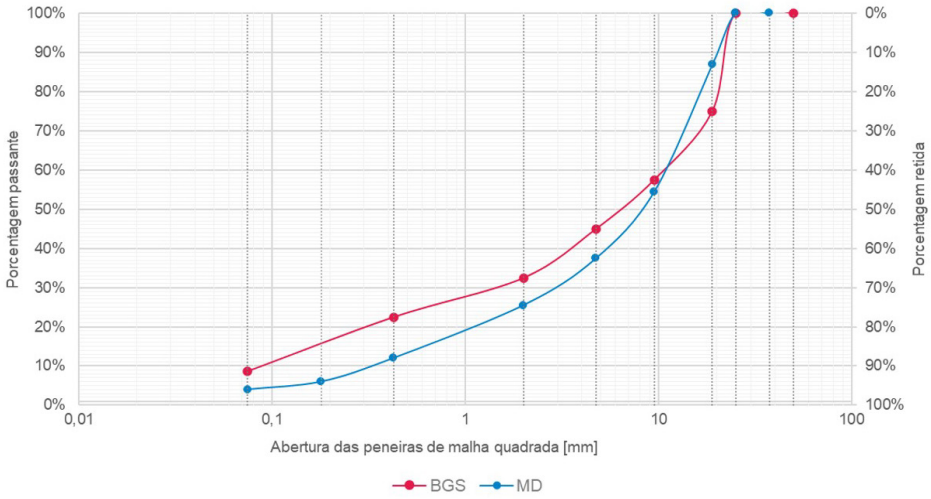


Figura 3. Curvas granulométricas compostas para a BGS e para a Mistura Drenante

Tabela 2: Características físicas da BGS e da Mistura Drenante.

Mistura	γd [g/cm^3]	$h_{ót.}$ [%]	$\gamma_{smáx.}$ [g/cm^3]
BGS	2,628	5,82	2,246
MD	2,620	6,70	2,173

3.3. Aparato utilizado para aquisição dos dados

A compactação dos corpos de prova em uma caixa de madeira de 400 × 400 × 150 mm foi feita com um martelete vibratório da marca Stanley, modelo SHR263B2C, com 800 W de potência, frequência de 60 Hz e energia de impacto de 2,4 J e placa compactadora de aço carbono de 394 × 394 mm, com massa de 10,6 kg. Optou-se por esta marca e modelo de martelete vibratório por atender às especificações do item 3.7.2.2 da norma britânica BS 1377-4 (BSI, 1990) quanto à potência e frequência e porque sua massa (3,0 kg) permitiu que as compactações pudessem ser executadas com independência. A caixa de madeira é apresentada na Figura 4a e o conjunto martelete e placa compactadora é apresentado na Figura 4b.

Com o objetivo de garantir o espaçamento constante entre as linhas de levantamento e o alinhamento da antena, quando da execução do ensaio, foi confeccionado um gabarito em acrílico transparente, de 446 × 446 mm, com malha de referência composta por linhas espaçadas entre si 50 mm. Justificam-se as dimensões aumentadas pela necessidade do gabarito cobrir completamente a caixa e ficar imóvel durante a aquisição dos dados, o que foi garantido por anteparos de acrílico fixados em sua superfície inferior.

Na Figura 5 vê-se apresentado o gabarito posicionado em cima da caixa. É possível visualizar as linhas de referência impressas a laser. As linhas vermelhas evidenciam as bordas do gabarito.

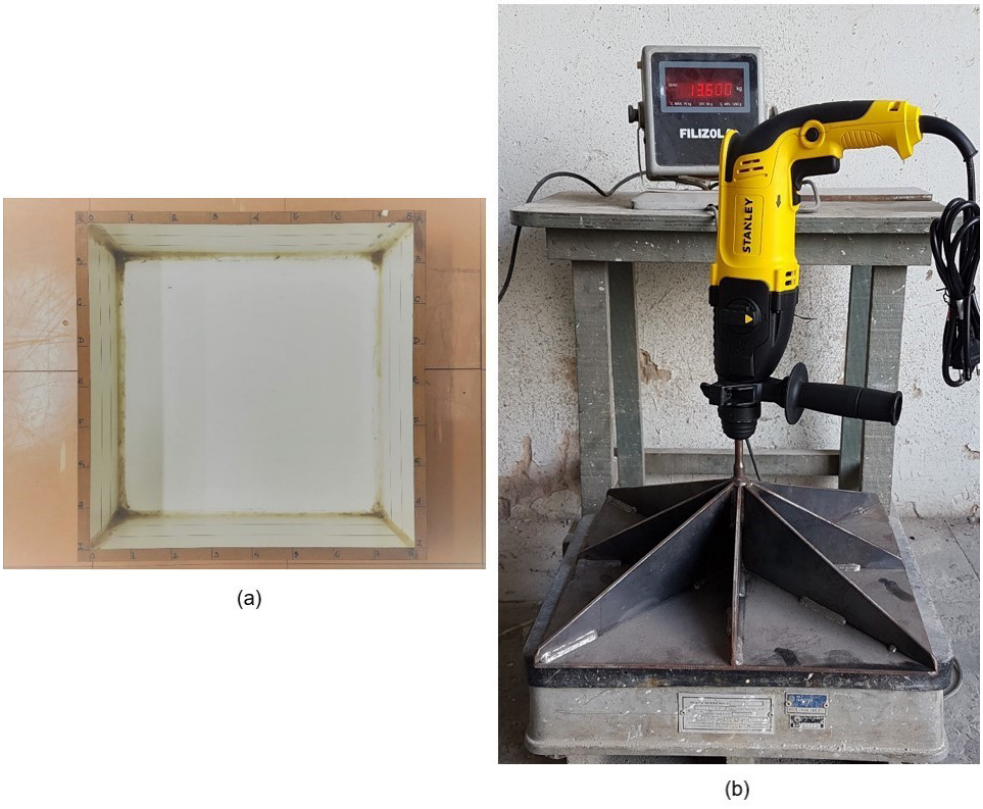


Figura 4. (a) Caixa de madeira; (b) Conjunto martelete e placa compactadora



Figura 5. Gabarito em acrílico transparente

3.4. Sistema GPR

Para a execução dos ensaios foi utilizada a antena blindada modelo 5100, de transmissão pelo solo, com frequência central (fc) de 1,6 GHz e separação biestática de 58 mm, acoplada ao sistema SIR-3000, ambos fabricados pela empresa Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) e apresentados na Figura 6.



Figura 6. À esquerda, o sistema SIR-3000; à direita, antena modelo 5100 fixada em um "mini-carro" (*minicart*); ao fundo, caixa de controle da antena

3.5. Aquisição dos dados

Utilizou-se o conjunto de configurações pré-definidas pelo fabricante denominado *1500/1600 BlueCart*, salvo os parâmetros RANGE, que é o valor da janela temporal e para o qual se utilizou o valor calculado de 5 ns; DIEL, que é o valor de permissividade utilizado como referência para a aquisição dos dados, para o qual se adotou ε = 10 e SCANS PER UNIT, que corresponde ao intervalo espacial de aquisição de dados, para o qual se utilizou o valor de 50, visando adquirir dados a cada 20 mm.

O procedimento utilizado na aquisição dos dados para avaliação da sensibilidade à variação na massa específica aparente consistiu em um ciclo composto pelas seguintes etapas: 1) preparo das misturas; 2) lançamento e compactação da mistura na caixa (salvo quando o material foi avaliado na condição solta); 3) aquisição dos dados com o GPR; 4)

pesagem da caixa e cálculo da massa específica aparente e 5) verificação e correção do teor de umidade para repetição do ciclo. As linhas de levantamento e as espessuras das camadas são apresentadas na Figura 7.

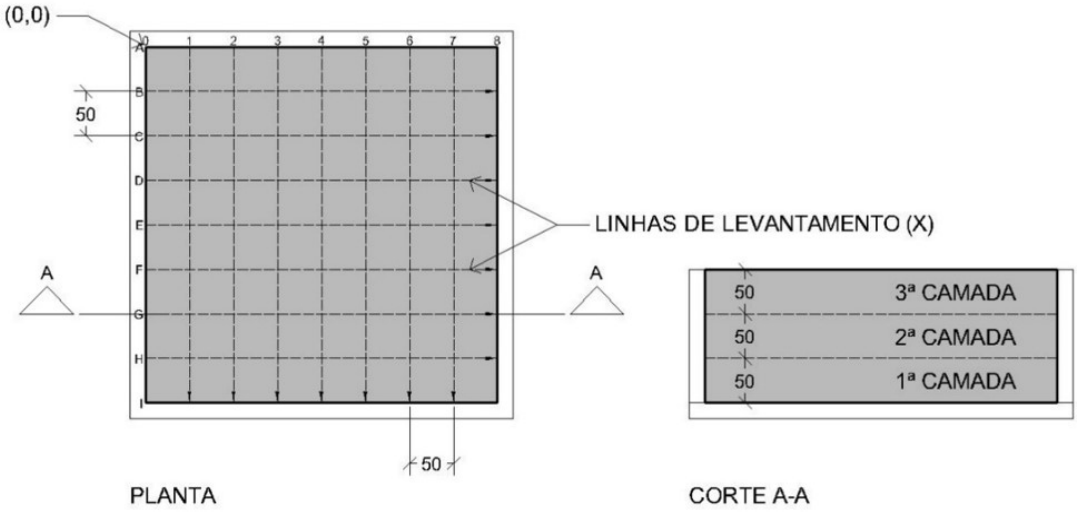


Figura 7. Detalhe das linhas de levantamento e espessura das camadas. Dimensões em [mm]

3.6. Processamento dos dados adquiridos com o GPR

Os dados adquiridos com o GPR foram processados por meio do programa REFLEXW (Sandmeier, 2017), sendo utilizado o procedimento composto pelas seguintes etapas: 1) correção do tempo zero ($T0$); 2) aplicação de filtro passa banda e 3) cálculo da permissividade dielétrica (ε_{mat}) a partir do tempo (T) correspondente à interface camada granular/fundo da caixa.

Segundo Jol (2009, p. 150) "desvios térmicos, instabilidade eletrônica, diferenças de comprimento dos cabos e variações na caixa de ar da antena" podem causar 'saltos' no tempo correspondente à interface ar/superfície investigada. A esse ponto no traço dá-se o nome de tempo zero ($T0$) e sua correção é uma operação que ajusta tal posição. É necessário corrigir todos os traços adquiridos antes que outros métodos de processamento sejam aplicados (Jol, 2009). O filtro passa-banda é um filtro de frequência que combina outros dois: o filtro passa-baixa e o passa-alta. Define-se então a faixa de frequência desejada para os dados, sendo os demais, removidos (Jol, 2009). Para o cálculo de $\varepsilon_{mat.}$ a partir de T foram utilizadas as Equações 3 e 4, considerando-se 150 mm o valor de da espessura da camada granular.

4. RESULTADOS

4.1. Cálculo das permissividades dielétricas teóricas ($\varepsilon_{teórica}$)

Os valores de $\varepsilon_{teórica}$, obtidos para BGS e para a Mistura Drenante para as condições descritas no item 3.1 são apresentados na Tabela 3. Destaca-se que, para os cálculos de $\varepsilon_{teórica}$ apresentados, os valores de h são constantes e correspondem ao valor $h_{ót.}$ de cada mistura (cfr. Tabela 2).

Tabela 3: Valores de $\varepsilon_{teórica}$ obtidos para variação de γ_S

Mistura	GC	γ_s [g/cm³]	N [%]	Ne [%]	S [%]	$\varepsilon_{teórica}$ (adimensional)	V [m/ns]
BGS	50%	1,123	57,27	50,73	55,71	14,98	0,077
	60%	1,348	48,72	40,88	58,05	13,17	0,083
	70%	1,572	40,17	31,02	61,39	11,40	0,089
	80%	1,797	31,63	21,17	66,53	9,62	0,097
	90%	2,021	23,08	11,32	75,48	7,73	0,108
	95%	2,134	18,81	6,39	83,01	6,66	0,116
	96%	2,156	17,95	5,41	84,95	6,43	0,118
	97%	2,179	17,10	4,42	87,08	6,20	0,120
	98%	2,201	16,24	3,43	89,43	5,95	0,123
	99%	2,224	15,39	2,45	92,04	5,69	0,126
	100%	2,246	14,54	1,46	94,96	5,43	0,129
MD	50%	1,087	58,53	51,25	56,22	15,27	0,077
	60%	1,304	50,23	41,50	58,69	13,48	0,082
	70%	1,521	41,94	31,75	62,15	11,71	0,088
	80%	1,738	33,65	22,00	67,31	9,91	0,095
	90%	1,956	25,35	12,25	75,84	8,00	0,106
	95%	2,064	21,20	7,37	82,61	6,93	0,114
	96%	2,086	20,37	6,40	84,30	6,70	0,116
	97%	2,108	19,55	5,42	86,13	6,47	0,118
	98%	2,130	18,72	4,45	88,12	6,22	0,120
	99%	2,151	17,89	3,47	90,29	5,97	0,123
	100%	2,173	17,06	2,50	92,68	5,71	0,125

Observa-se que, para ambas as misturas, como os valores de h são constantes e que $\varepsilon_{teórica}$ respondeu de modo inversamente proporcional às mudanças nos valores de γ_s.

4.2. Experimento em laboratório

A execução do experimento seguiu o procedimento descrito em 3.1. Foram adquiridos dados para a BGS e a Mistura Drenante em cinco condições de compactação diferentes – no estado solto e compactadas a 90; 95; 98 e 100% do Proctor Modificado – e em seis linhas de levantamento, totalizando 60 conjuntos de dados, compostos cada por um número de traços que variou entre 16 e 20. Para a preparação das misturas e compactação admitiu-se o teor de umidade variando ±1,0% em relação à umidade ótima. O controle de execução é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Controle de execução do experimento em laboratório

Mistura	Condição pretendida	γ [g/cm³]	h [%]	γ_s [g/cm³]	GC [%]
BGS	Estado solto	1,46	6,82	1,368	60,89
	GC = 90%	2,16	6,16	2,030	90,39
	GC = 95%	2,26	6,09	2,134	95,00
	GC = 98%	2,32	5,55	2,200	97,97
	GC = 100%	2,37	5,55	2,245	99,97
MD	Estado solto	1,73	6,70	1,621	74,58
	GC = 90%	2,06	5,82	1,944	89,48
	GC = 95%	2,21	6,70	2,067	95,12
	GC = 98%	2,27	6,70	2,130	98,01
	GC = 100%	2,31	6,70	2,166	99,68

A fim de comparar as características das misturas produzidas em laboratório foram calculados os valores de $\varepsilon_{teórica}$, por meio da Equação 5, utilizando os valores de γ_s e h apresentados na Tabela 3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de $\varepsilon_{teórica}$ obtidos para as misturas produzidas em laboratório

Mistura	GC [%]	γs [g/cm³]	S [%]	$\varepsilon_{mat.}$ (adimensional)	v [m/ns]
BGS	60,89	1,37	59,72	12,99	0,083
	90,39	2,03	77,49	7,53	0,109
	95,00	2,13	84,55	6,54	0,117
	97,97	2,20	87,53	6,10	0,121
	99,97	2,25	92,80	5,60	0,127
MD	74,58	1,62	64,23	10,90	0,091
	89,48	1,94	71,75	8,40	0,103
	95,12	2,07	82,43	6,96	0,114
	98,01	2,13	87,64	6,28	0,120
	99,68	2,17	91,28	5,87	0,124

Os dados adquiridos com o GPR, para as condições apresentadas na Tabela 4, foram processados seguindo o procedimento descrito em 3.6. Os dados correspondentes às linhas de levantamento 4 (escolhida por ser a seção central da caixa) estão sintetizados na Tabela 6 e serão discutidos em seguida.

Tabela 6: Valores de $\varepsilon_{mat.}$ obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para BGS e MD produzidas em laboratório

Mistura	Linha de levantamento	GC [%]	S [%]	T [ns]	v [m/ns]	$\varepsilon_{mat.}$ (adimensional)
BGS	4	95,00	84,55	2,54	0,118	6,41
	4	97,97	87,53	2,53	0,119	6,38
	4	99,97	92,80	2,50	0,120	6,24
MD	4	95,12	82,43	2,63	0,114	6,93
	4	98,01	87,64	2,70	0,111	7,28
	4	99,68	91,28	2,51	0,119	6,30

O objetivo nas Figuras 8a e 8b é facilitar a visualização dos resultados e auxiliar nas discussões apresentando, respectivamente, os traços médios gerados pelo programa REFLEXW (Sandmeier, 2017) correspondentes à linha de levantamento 4 (escolhidas por ser a seção central da caixa) para:

- BGS nas condições $GC = 95{,}00\%$ e $CG = 99{,}97\%$; e
- Mistura Drenante nas condições $GC = 95{,}11\%$ e $GC = 99{,}68\%$.

Há pequenas discrepâncias entre os valores de T apresentados nas Figuras 8a, 8b e na Tabela 6 pois as figuras apresentam valores que foram calculados automaticamente e a tabela mostra os resultados calculados manualmente.

Após o processamento, o instante $T0$, que corresponde à superfície da camada granular, ficou localizado exatamente em $T = 0$. É possível observar, em ambas as figuras, como os traços são similares e se sobrepõem em alguns trechos, indicando que o GPR seria pouco sensível à pequenas variações nos valores de γ_s.

É conhecida a sensibilidade do GPR à presença de água – $\varepsilon_{água} = 81$. Mesmo com o controle de execução do experimento, que manteve a variação da umidade dentro do intervalo permitido para a execução de camadas granulares em campo de ±1%, observou-se que este parâmetro tem um efeito importante no valor de $\varepsilon_{mat.}$. Um estudo paramétrico realizado na fase de planejamento do experimento, indicou que 1% de aumento na

umidade poderia implicar no acréscimo de até 1 unidade no valor de ε_{mat}; assim sendo, optou-se por adotar a saturação (S) como base para comparação entre os dados obtidos por meio do cálculo de $\varepsilon_{teórica}$ (Tabela 3), os valores de $\varepsilon_{\text{teórica}}$ obtidos para as misturas de laboratório (Tabela 5) e os valores de $\varepsilon_{mat.}$ obtidos a partir dos levantamentos com o GPR (Tabela 6) apresentadas na Figura 9a e na Figura 9b.

Tanto na Figura 9a quanto na Figura 9b fica demonstrado o que foi observado até aqui: a concordância entre os resultados da modelagem numérica e os obtidos em laboratório (representados pelo símbolo "×") e o pequeno contraste entre as propriedades físicas das misturas (visível na faixa de valores na qual varia $\varepsilon_{mat.}$, idêntica para as duas misturas) explicam a baixa sensibilidade do GPR às variações nas características estudadas. No tocante à variação localizada dos valores de $\varepsilon_{mat.}$, é atribuída à heterogeneidade do material dentro da caixa. Finalmente, os valores obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura, conforme se verifica na Tabela 1.

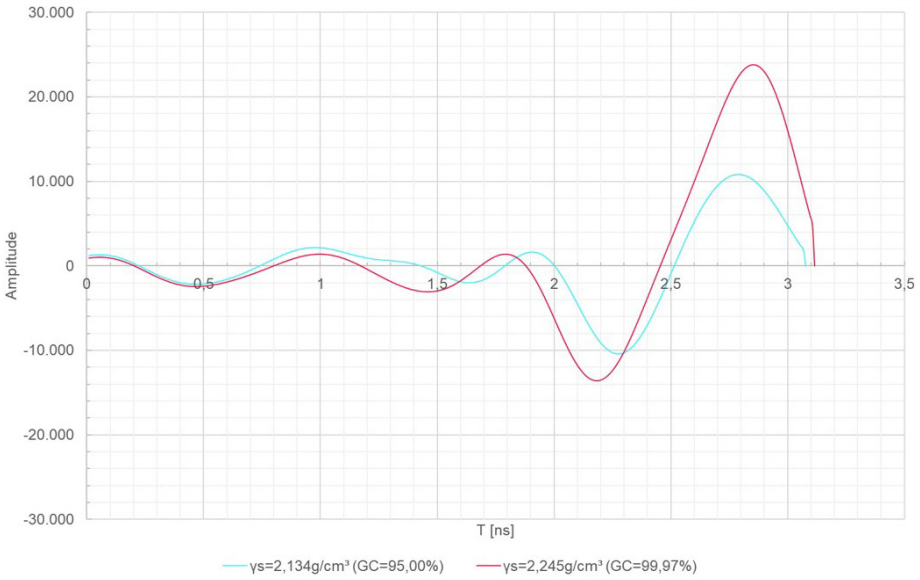


Figura 8a. Traços médios gerados para a BGS nas condições GC = 95% e CG = 99,97%

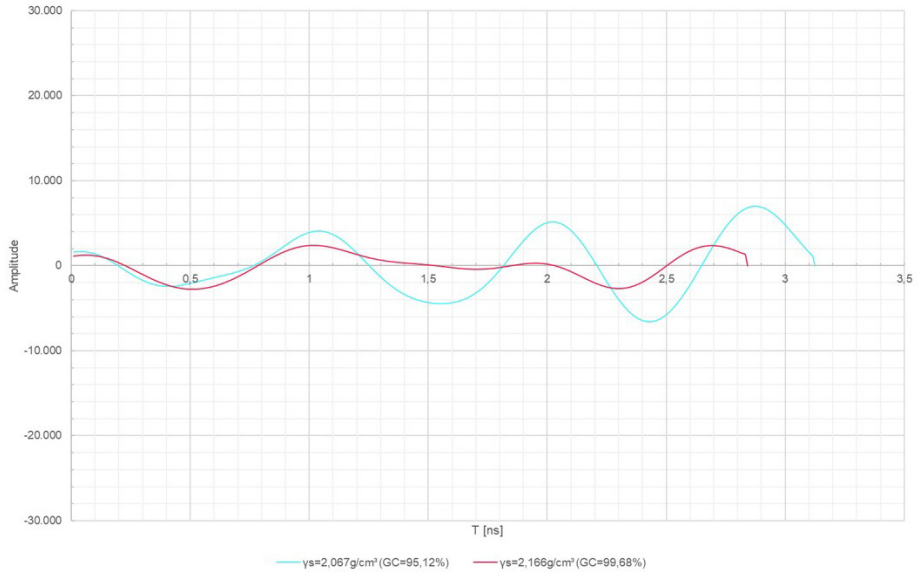


Figura 8b. Traços médios gerados para a MD nas condições GC = 95,11% e CG = 99,68%

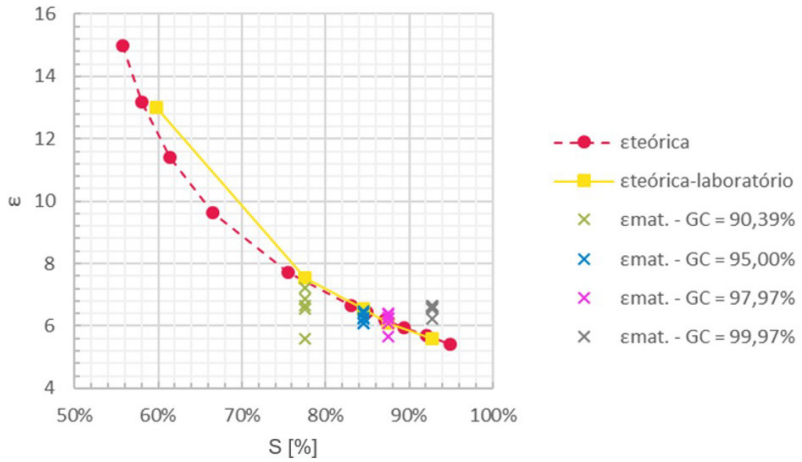


Figura 9a. Síntese dos dados obtidos por meio de modelagem numérica e em laboratório para a BGS

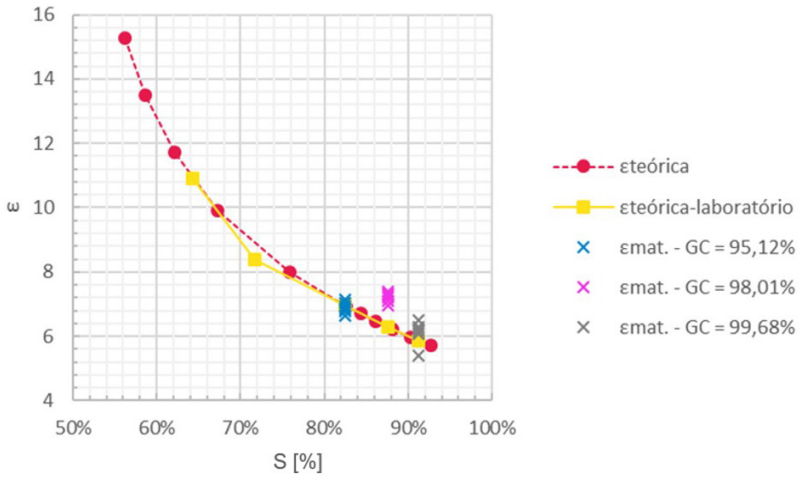


Figura 9b. Síntese dos dados obtidos por meio de modelagem numérica e em laboratório para a Mistura Drenante

5. CONCLUSÕES

Em função do baixo contraste entre os valores de permissividade dielétrica, propriedades físicas dos dois tipos de misturas escolhidas, tanto os resultados teóricos quanto os de laboratório demonstraram que o GPR não foi capaz de diferenciá-las. Sugere-se, para estudos futuros, a comparação dos dois tipos de mistura com outras do tipo macadame hidráulico, por exemplo.

Quanto à massa específica aparente, tanto os resultados teóricos quanto os de laboratório demonstraram que o GPR não foi capaz de reconhecer variações inferiores a 10% no Grau de Compactação. No caso de materiais com presença de água como, por exemplo, materiais granulares, não é recomendável correlacionar a permissividade dielétrica exclusivamente à massa específica aparente porque a água exerce grande influência sobre o valor da primeira. Recomenda-se então a correlação da permissividade dielétrica com a saturação.

No tocante à simulação numérica, observa-se que os resultados obtidos foram condizentes com os resultados de laboratório e que o modelo CRIM mostrou-se eficaz. A simulação numérica demonstrou-se uma importante ferramenta auxiliar na compreensão e interpretação dos dados.

Conclui-se que as potenciais contribuições do GPR para o controle de qualidade de execução de camadas granulares são, até presente data, o controle de espessura (aplicação já consagrada na bibliografia disponível) e a avaliação da uniformidade da camada para indicação dos pontos para execução dos ensaios de verificação. As especificações e o processo executivo destas aplicações deverão ser devolvidas a partir de estudos futuros.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio Financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2019) *PP 98-19: Standard Specification for Asphalt Surface Dielectric Profiling System Using Ground Penetrating Radar*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT (2003) *NBR NM 248:2003: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2016) *NBR 7182:2016: Solo - Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Annan, A.P. (2001) *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Mississauga: Sensors & Software.

ASTM (2011) *D6432 - 11: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM (2015) *ASTM D4748 - 10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-pulse Radar*. West Conshohocken: ASTM International.

BSI (1990) *BS 1377-4:1990: Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Compaction-related Tests*. United Kingdom: British Standards Instituiton.

Cassidy, N.J. (2009) Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In Jol, H.M. (ed.) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. United Kingdom: Elsevier Science, p. 41-72. DOI: 10.1016/B978-0-444-53348-7.00002-8.

Chen, D.H.; T. Chen; T. Scullion et al. (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. 1345-58. DOI: 10.1139/l06-079.

DER/SP (2005) *ET-DE-P00/008: Sub-base ou Base de Brita Graduada*. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem - São Paulo.

DNER (1998). *ME 194/98: Agregados - Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco de Chapman*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNER (1997) *ME 195/97: Agregados - Determinação da Absorção e da Massa Específica do Agregado Graúdo*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT (2010) *141/2010 - ES: Base Estabilizada Granulométricamente - Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Grote, K.; S. Hubbard; J. Harvey et al. (2005) Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, v. 57, n. 2, p. 129-53. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2004.10.002.

Hoegh, K. e S. Dai (2017) Asphalt pavement compaction assessment using ground penetrating radar-arrays. In *Proceedings of the First Congress on Technical Advancement*. Reston: ASCE. DOI: 10.1061/9780784481035.011.

Jol, H.M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. United Kingdom: Elsevier Science.

Luque, T.H. (2015) *Origem e Evolução do Magmatismo no Maciço Granítico Sorocaba, SP: Contribuições da Geoquímica Elementar e Isotópica*. Tese (doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. DOI: 10.11606/T.44.2016.tde-04052016-104335

Mara Nord Project (2011) *Recommendations for Guidelines for the Use of GPR in Road Construction Quality Control*. Brussels: European Commission.

Narbro, A.; J. Poikajärvi; J. Ullberg et al. (2012) *Mara Nord Project: Final report*. Rovaniemi: Rovaniemi University of Applied Sciences.

PANK (2008) *PANK-4122: Asfalttipäällysteen Tyhjätila, Päällystetutkamenetelmä*. Helsinki: Finnish Pavement Technology Advisory Council (PANK).

Pellinen, T.; P. Eskelinen; E. Huuskonen-Snicker, et al. (2015) *Assessment of Air Void Content of Asphalt Using Dielectric Constant Measurements by GPR and with VNA*. Helsinki: Aalto University.

Pérez, I.; L. Medina and M.G. Romana (2006) Permanent deformation models for a granular material used in road pavements, *Construction & Building Materials*, v. 20, n. 9, p. 790-800. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.050.

Porsani, J. L. (1999) *Ground Penetrating Radar: Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico - Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado - SP*. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

Roimela, P. (1997) *Using GPR and Die Lectric Probe in Pavement Quality Control*. Oulu: University of Oulu.

Saarenketo, T. (1998) Electrical properties of water in clay and silty soils, *Journal of Applied Geophysics*, v. 40, n. 1, p. 73-88. DOI: 10.1016/S0926-9851(98)00017-2.

Saarenketo, T. (2006) *Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys*. Tese (doutorado). Faculty of Science, Department of Geosciencies, University of Oulu, Oulu, Finland. Disponível em: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf> (acesso em 24/01/2023).

Saarenketo, T. e T. Scullion (1996) *FHWA/TX-97/1341-2: Using Electrical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates*. Arlington: Texas Transportation Institute.

Sandmeier, K.J. (2017) REFLEXW. 8.5. Karlsruhe. Disponível em: <https://www.sandmeier-geo.de/download.html> (acesso em: 24/01/2023).

Scullion, T. e T. Saarenketo (1997) Using suction and dielectric measurements as performance indicators for aggregate base materials, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1577, n. 1, p. 37-44. DOI: 10.3141/1577-05.

Sebesta, S.; T. Scullion e T. Saarenketo (2013) *SHRP 2 S2-R06C-RR-1: Using Infrared and High-speed Ground-penetrating Radar for Uniformity Measurements on New HMA layers*. Washington: Transportation Research Board.

Sihvola, A. (1999) *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. London: The Institution of Electrical Engineers.

Suzuki, C.Y.; A.M. Azevedo e F.I. Kabbach Jr. (2013) *Drenagem Subsuperficial de Pavimentos: Conceitos e Dimensionamento*. São Paulo: Oficina de Textos.

Venmans, A.A.M.; R. van de Ven e J. Kollen (2016) Rapid and non-intrusive measurements of moisture in road constructions using passive microwave radiometry and GPR – Full Scale Test. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 1244-51. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.111.