



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**HELOISA MORAES TREIBER**

**AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS DO *GROUND*  
*PENETRATING RADAR* ÀS MUDANÇAS NAS  
CARACTERÍSTICAS DE BRITAS GRADUADAS PARA  
CAMADAS DO PAVIMENTO**

**CAMPINAS**

**2020**

**HELOISA MORAES TREIBER**

**AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS DO *GROUND*  
*PENETRATING RADAR* ÀS MUDANÇAS NAS  
CARACTERÍSTICAS DE BRITAS GRADUADAS PARA  
CAMADAS DO PAVIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Transportes.

**Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Françoso**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA HELOISA MORAES TREIBER E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. MARIA TERESA FRANÇOSO.

ASSINATURA DA ORIENTADORA



---

**CAMPINAS**

**2020**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

T717a Treiber, Heloisa Moraes, 1980-  
Avaliação das respostas do *ground penetrating radar* às mudanças nas características de britas graduadas para camadas do pavimento / Heloisa Moraes Treiber. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Maria Teresa Françoso.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Pavimentos. 2. Radar de penetração no solo. 3. Análise no domínio do tempo. I. Françoso, Maria Teresa, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Evaluation of ground penetrating radar responses to changes in graded rocks pavement layers characteristics

**Palavras-chave em inglês:**

Pavements

Ground penetrating radar

Time-domain analysis

**Área de concentração:** Transportes

**Titulação:** Mestra em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Maria Teresa Françoso [Orientador]

Cassio Eduardo Lima de Paiva

Marcos Antonio Garcia Ferreira

**Data de defesa:** 30-01-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-4859-5213>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9640152744885414>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS DO *GROUND  
PENETRATING RADAR* ÀS MUDANÇAS NAS  
CARACTERÍSTICAS DE BRITAS GRADUADAS PARA  
CAMADAS DO PAVIMENTO**

**Heloisa Moraes Treiber**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

**Profa. Dra. Maria Teresa Françoso  
Presidente e Orientadora/ FEC / UNICAMP**

**Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP**

**Prof. Dr. Marcos Antonio Garcia Ferreira  
Universidade Federal de São Carlos**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 30 de janeiro de 2020.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à Rosemira, *in memoriam*, à Rosemeyre e ao Marcos, meus grandes amores.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (01-P-03713/2017).

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Maria Teresa Françoso, pela orientação, pela reiterada confiança, pelas preciosas oportunidades, pela enorme paciência, pelo carinho maternal e por todos os bons momentos dentro e fora da universidade.

Agradeço aos membros das bancas de defesa e qualificação, Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva; Prof. Dr. Jorge Luis Porsani; Prof. Dr. Luiz Carlos de Almeida e Prof. Dr. Marcos Antonio Garcia Ferreira, pelas contribuições ao desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Investigação Não Destrutiva, Felipe e Paulo, pela companhia, pelas trocas de experiências e pelo incentivo. Agradeço especialmente ao Irving pela companhia diária, pelas trocas de experiências, pelas valiosas contribuições e pelo incentivo ao longo desta jornada.

Agradeço ao técnico do Laboratório de Investigação Não Destrutiva, Rubens Morandi Filho, pela companhia diária e pelo grande auxílio na execução do experimento.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Mecânica de Solos, José Benedito Cipriano; Reinaldo Benedito Leite da Silva e Leonardo Oriole, pela companhia diária, pelos ensinamentos e pelo apoio na execução dos ensaios de caracterização.

Agradeço a todos os técnicos do Laboratório de Materiais de Construção pela gentileza com que me receberam e pelo apoio na execução das análises granulométricas.

Agradeço à Profa. Dra. Raquel Gonçalves e ao Me. Paulo Gustavo Krejci Nunes pela gentileza com que me receberam no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da FEAGRI/Unicamp e pelo apoio na preparação das amostras.

Agradeço ao Prof. Saulo José de Castro Almeida por ceder o material para confecção do gabarito utilizado no levantamento.

Agradeço ao técnico do Laboratório de Modelos e Maquetes, Rafael Corrêa Remédio, pela gentileza com que me recebeu, pelas contribuições e pela confecção do gabarito utilizado no levantamento.

Agradeço à Pedreira Julio & Julio por fornecer os agregados utilizados neste trabalho e em especial ao Eng. Angelo Nogueira pela gentileza, pelo apoio na execução dos ensaios de caracterização, pelas contribuições e pelo incentivo.

Agradeço ao Departamento de Soldagem da Escola e Faculdade SENAI "Nadir Dias de Figueiredo", em especial ao Prof. Marcos Roberto Victorini, pela confecção da placa compactadora.

Agradeço ao meu cunhado Marcelo pelo grande auxílio na execução do experimento.

Agradeço à querida amiga Soraya pela revisão do *abstract* e por todo o apoio e incentivo ao longo desta jornada.

Agradeço ao amigo Guttemberg pelo apoio no transporte dos materiais utilizados neste trabalho.

Agradeço à colega de FEC e amiga Gianina pelas contribuições, pela companhia e apoio e pelas muitas risadas que demos juntas.

Agradeço à equipe da Secretaria de Pós-Graduação da FEC, Eduardo Estevam da Silva; Raquel Andreoni e Rosana Kelly Pedro Silva, por toda a gentileza e apoio.

Agradeço a todos os familiares e amigos que acompanharam esta jornada pelo apoio, pelos incentivos e por compreenderem as ausências prolongadas.

Finalmente, não há palavras suficientes para agradecer ao meu marido, Marcos, e a minha mãe, Rosemeyre, por tudo que vocês fizeram por mim ao longo desta jornada. Sem vocês nada seria possível ou teria razão de existir.

“Nada é maravilhoso demais para ser verdade se estiver de acordo com as Leis da Natureza”. (Michael Faraday)



## RESUMO

Esta dissertação 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. Comparou-se 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, as quais foram compactadas em uma caixa de madeira de 40 × 40 × 15 cm confeccionada para este 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. A fim de avaliar a sensibilidade às variações da massa específica aparente foram realizados levantamentos com ambas as misturas nas seguintes condições: teor de umidade variando  $\pm 1,0\%$  em relação à umidade ótima; no estado solto e compactadas a 90%; 95%; 98% e 100% do Proctor Modificado. Visando auxiliar a interpretação dos resultados do levantamento realizado com GPR foram realizadas simulações numéricas 2D dos ensaios, nas quais se empregou o modelo CRIM e o método FDTD. Em todos os ensaios o objetivo foi detectar variações na permissividade dielétrica e relacioná-la 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. Os resultados também demonstram que o ground penetrating radar 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.

Palavras-chave: Pavimentos; Radar de penetração no solo; Análise no domínio do tempo.

## ABSTRACT

This dissertation aims to evaluate the sensitivity of ground penetrating radar to variations in particle size distribution and bulk density of graded rock mixtures used in pavement layers. Two types of mixture were compared, one dense graded and one open graded: respectively the simple graded gravel of the 141/2010 - ES specification from DNIT and the ET-DE-P00/008 drainage layer from DER/SP specification, which were compacted in a 40 × 40 × 15 cm wooden box made for this purpose. The equipment used for the execution of the tests was the GPR SIR 3000 system, from GSSI, with a ground coupled, shielded antenna, with 1.6 GHz central frequency. In order to evaluate the sensitivity to the bulk density variations, surveys were performed with both mixtures in the following conditions: moisture content varying  $\pm 1.0\%$  in relation to the optimal moisture content; in the loose state and compacted at 90%; 95%; 98% and 100% of the modified Proctor test. In order to help the interpretation of the results of the survey carried out with GPR, 2D numerical simulations of the tests were performed, in which the CRIM model and the FDTD method were used. In all tests, the objective was to detect variations in dielectric permittivity and relate it to the particle size distribution and compaction conditions of the mixtures. The results obtained shows that, due to the low contrast between the physical properties of the two mixtures, the ground penetrating radar was not able to differentiate them. The results also show that the ground penetrating radar is sensitive to variations in the apparent bulk density, but not sufficient to replace the traditional methods of quality control and acceptance in the execution of granular layers, but can be used to identify heterogeneity in them.

Keywords: Pavements; Ground penetrating radar; Time-domain analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama conceitual que ilustra o processo de armazenamento / liberação de energia, polarização de carga e o desenvolvimento de um momento dipolo que ocorre quando uma onda eletromagnética se propaga através do material. Fonte: adaptado de Cassidy (2009). .....	31
Figura 2.2 – Fenômeno de relaxação dielétrica associado a um material dielétrico dispersivo idealizado. A região A representa as polarizações associadas às cargas livres e interações materiais enquanto a região B representa polarizações moleculares e atômicas associadas às cargas vinculadas. Fonte: adaptado de Cassidy (2009)..	33
Figura 2.3 – Estrutura d'água aprisionada no solo. Fonte: adaptado de Saarenketo . .....	36
Figura 2.4 – Diagrama conceitual que ilustra o processo de condução em um material contendo cargas livres tais como ânions e cátions. Fonte: adaptado de Cassidy (2009). .....	38
Figura 2.5 – Reflexão e transmissão em um sistema de n+1 camadas com ondas de incidência normal. Fonte: adaptado de Lahouar (2003). .....	45
Figura 2.6 – Célula de Yee mostrando componentes do campo elétrico (E) e magnético (H). Fonte: Warren; Giannopoulos; Giannakis (2016). .....	47
Figura 2.7 – Exemplo de veículo equipado com sistema GPR para aplicações em pavimentos. Fonte: adaptado de Morey (1998b). .....	49
Figura 2.8 – Ilustração esquemática de um sistema de transmissão pelo solo. Fonte: adaptado de ASTM (2015b). .....	50
Figura 2.9 – Ilustração esquemática de um traço típico do GPR. Fonte: adaptado de ASTM (2011). .....	51
Figura 2.10 – Exemplo de uma série de traços do GPR empilhados. Fonte: adaptado de ASTM (2015b). .....	52
Figura 2.11 – Exemplos de <i>time slices</i> de três camadas asfálticas de uma pista de aeroporto finlandesa. Fonte: adaptado de Saarenketo (2006). .....	53
Figura 3.1 – Faixas granulométricas de referência. Fonte: DER/SP (2005) e DNIT (2010). .....	55
Figura 3.2 – Caixa utilizada na avaliação da sensibilidade às variações da massa específica aparente. .....	56

Figura 3.3 – Localização da pedreira em relação ao espaço urbano de Sorocaba e à rodovia BR-272/SP-270. Fonte: Google Earth (2019).....	57
Figura 3.4 – Afloramento granítico do qual se originaram as amostras utilizadas nesta pesquisa. Fonte: adaptado de Luque (2015).....	57
Figura 3.5 – Onda Ricker: sinal no domínio do tempo e espectro de frequência para $f_c = 1,6$ GHz. ....	62
Figura 3.6 – Pegada simplificada da antena. A região hachurada mostra a área iluminada à profundidade $d$ . Fonte: adaptado de Annan (2001).....	64
Figura 3.7 – Dimensionamento da caixa utilizando pegadas da antena para delimitar a área útil para aquisição dos dados. ....	65
Figura 3.8 – Croqui com as dimensões da caixa. Dimensões em [mm]. ....	66
Figura 3.9 – Conjunto martetele e placa compactadora.....	67
Figura 3.10 – Placa compactadora em aço carbono. ....	67
Figura 3.11 – Gabarito em acrílico transparente confeccionado para garantir o espaçamento constante entre as linhas de levantamento e o alinhamento da antena quando da execução do ensaio.....	68
Figura 3.12 – À esquerda, o sistema SIR-3000; à direita, antena modelo 5100 fixada em um “mini-carro” ( <i>minicart</i> ); ao fundo, caixa de controle da antena. ....	69
Figura 3.13 – Procedimento de aquisição dos dados para avaliação da sensibilidade à variação na massa específica. ....	70
Figura 3.14 – Detalhe das linhas de levantamento e espessura das camadas. Dimensões em [mm]. ....	70
Figura 3.15 – Procedimento de processamento dos dados adquiridos com o GPR. ....	71
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica dos materiais.....	74
Figura 4.2 – Amostras de material fracionado com auxílio de um agitador mecânico de peneiras.....	74
Figura 4.3 – Curva granulométrica composta para a BGS.....	75
Figura 4.4 – Curva granulométrica composta para o Mistura Drenante. ....	76
Figura 4.5 – Comparação das curvas compostas para BGS e para o Mistura Drenante. ....	77
Figura 4.6 – Valores de $\epsilon_{teórica}$ obtidos para a variação de valores de $\gamma_s$ . ....	80
Figura 4.7 – Valores de $v$ obtidos para a variação de valores de $\gamma_s$ . ....	80
Figura 4.8 – Relação entre $S$ e $\epsilon_{teórica}$ para a variação de valores de $\gamma_s$ . ....	81
Figura 4.9 – Geometria do modelo simulado. Dimensões em [mm]. ....	82

Figura 4.10 – Traços obtidos para a BGS para a variação de $\gamma_s$ .	84
Figura 4.11 – Traços obtidos para a Mistura Drenante para a variação de $\gamma_s$ .	84
Figura 4.12 – Espectros de frequência obtidos para a BGS para a variação de $\gamma_s$ .	85
Figura 4.13 – Espectros de frequência obtidos para a Mistura Drenante para a variação de $\gamma_s$ .	85
Figura 4.14 – Traços obtidos para a BGS e para Mistura Drenante na condição $h = h_{ót.}$ e $\gamma_s = \gamma_{Smáx.}$ .	86
Figura 4.15 – Espectros de frequência obtidos para a BGS e para Mistura Drenante na condição $h = h_{ót.}$ e $\gamma_s = \gamma_{Smáx.}$ .	87
Figura 4.16 – Traços médios gerados para a BGS nas condições GC = 60,89% (condição solta); GC = 95% e CG = 99,97%.	92
Figura 4.17 – Traços médios gerados para a MD nas condições GC = 75,48% (condição solta); GC = 95,11% e CG = 99,68%.	93
Figura 4.18 – Espectros de frequência médios gerados para a BGS nas condições GC = 60,89% (condição solta); GC = 95% e CG = 99,97%.	94
Figura 4.19 – Espectros de frequência médios gerados para a MD nas condições GC = 75,48% (condição solta); GC = 95,11% e CG = 99,68%.	94
Figura 4.20 – Síntese dos dados obtidos por meio de modelagem numérica e em laboratório para a BGS.	95
Figura 4.21 – Síntese dos dados obtidos por meio de modelagem numérica e em laboratório para a Mistura Drenante.	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de permissividade dielétrica do ar, da água e de diferentes materiais para frequência de antena de 100 MHz. Fonte: adaptado de Cassidy (2009). .....	34
Tabela 2.2 – Valores de permissividade dielétrica do ar, da água, de diferentes materiais utilizados em pavimentação e de solos de subleito comumente utilizados em levantamentos feitos na Escandinávia. Fonte: adaptado de Saarenketo (2006).....	35
Tabela 2.3 - Valores típicos de condutividade de materiais comuns da subsuperfície para frequência de 100 MHz. Fonte: adaptado de Cassidy (2009). ....	39
Tabela 2.4 – Valores de coeficientes de reflexão e transmissão para interfaces comuns em pavimentos. Fonte: a autora, a partir de valores de permissividade apresentados por Saarenketo (2006). ....	46
Tabela 3.1 – Faixas granulométricas de referência. Fonte: DER/SP (2005) e DNIT (2010). ....	54
Tabela 3.2 – Parâmetros constitutivos dos materiais das camadas. ....	60
Tabela 3.3 – Dimensões calculadas para as pegadas da antena. ....	65
Tabela 4.1 – Distribuição granulométrica dos materiais. ....	73
Tabela 4.2 – Curvas granulométricas compostas para a BGS e Mistura Drenante. ....	75
Tabela 4.3 – Valores obtidos de $\gamma_d$ para os agregados graúdos e miúdos. ....	77
Tabela 4.4 – Resultados obtidos nos ensaios de compactação. ....	78
Tabela 4.5 – Valores de $\epsilon_{teórica}$ obtidos para variação de $\gamma_s$ da BGS. ....	78
Tabela 4.6 – Valores de $\epsilon_{teórica}$ obtidos para variação de $\gamma_s$ da Mistura Drenante. ....	79
Tabela 4.7 – Controle de execução do experimento em laboratório. ....	88
Tabela 4.8 – Valores de $\epsilon_{teórico}$ obtidos para as misturas produzidas em laboratório. ....	88
Tabela 4.9 – Valores de $\epsilon_{mat.}$ obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para BGS produzida em laboratório. ....	89
Tabela 4.10 – Valores de $\epsilon_{mat.}$ obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para Mistura Drenante produzida em laboratório. ....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\mu$	permeabilidade magnética [H/m]
$\mu_r$	permeabilidade magnética relativa. Para materiais não-ferrosos $\mu_r = 1$ (adimensional).
A	dimensão paralela ao eixo maior da elipse [m]
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABC	<i>absorbing boundary conditions</i> ou condições de fronteiras de absorção
ALC	afundamento por consolidação local
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATC	afundamento de consolidação da trilha de roda
B	densidade de fluxo magnético [T]
B	dimensão paralela ao eixo menor da elipse [m].
c	velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço livre (velocidade da luz), $c = 2,997 \times 10^8$ m/s $\approx 0,3$ m/ns $\approx 300$ mm/ns;
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CRIM	<i>complex refractive index model</i> ou modelo de índice de refração complexo
D	densidade de fluxo elétrico [C/m <sup>2</sup> ]
d	espessura da camada [m];
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
e	índice de vazios (adimensional)
E	intensidade de campo elétrico [V/m]
$E_x$	componente do campo elétrico na direção x [V/m]
$E_y$	componente do campo elétrico na direção y [V/m]
$E_z$	componente do campo elétrico na direção z [V/m]
$f_c$	frequência central [MHz]
FDTD	<i>finite-difference time-domain</i> ou método das diferenças finitas no domínio do tempo
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
$f_{\text{máx.}}$	frequência máxima [MHz]
GC	grau de compactação [%]
GPR	<i>ground penetrating radar</i> ou radar de subsuperfície

GSSI	<i>Geophysical Survey Systems Inc.</i>
H	intensidade de campo magnético [A/m]
h	teor de umidade [%]
h <sub>ót.</sub>	umidade ótima [%]
H <sub>x</sub>	componente do campo magnético na direção x [A/m]
H <sub>y</sub>	componente do campo magnético na direção y [A/m]
H <sub>z</sub>	componente do campo magnético na direção z [A/m]
J	densidade de corrente [A/m <sup>2</sup> ]
jσ''	componente imaginário condutividade elétrica complexa
LCPC	<i>Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées</i>
m	massa [g]
N	porosidade [%];
P	panela ou buraco
P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , ..., P <sub>n</sub>	porcentagens retidas individuais, em massa, das frações granulométricas nas misturas
R	coeficiente de reflexão nas interfaces (adimensional);
Rx	receptor
S	saturação [%]
S <sub>e</sub>	saturação efetiva [%]
SHRP 2	<i>The Second Strategic Highway Research Program</i>
T	coeficiente de transmissão nas interfaces (adimensional).
T	tempo de ida e volta do sinal entre as reflexões que correspondem ao topo e a base da camada [ns].
T <sub>0</sub>	tempo correspondente à interface ar/superfície investigada.
tan δ	tangente de perdas (adimensional)
Tx	transmissor
v	velocidade de propagação da onda eletromagnética [m/ns]
W	<i>time window</i> ou janela temporal [ns]
Z	impedância de onda [Ω];
Z <sub>0</sub>	impedância do espaço livre, Z <sub>0</sub> = 377 Ω
α	atenuação da onda [dB/m]
γ <sub>d</sub>	massa específica dos grãos [g/cm <sup>3</sup> ]
γ <sub>d1</sub> , γ <sub>d2</sub> , ..., γ <sub>dn</sub>	valores de massa específica dos agregados [g/cm <sup>3</sup> ]
γ <sub>h</sub>	massa específica da água, γ <sub>h</sub> = 1 g/cm <sup>3</sup>



$\gamma_s$	massa específica aparente seca [g/cm <sup>3</sup> ]
$\gamma_{s\text{máx}}$	massa específica aparente seca máxima [g/cm <sup>3</sup> ]
$\delta$	fator de atenuação [m]
$\Delta l$	<i>spatial sampling interval</i> ou intervalo de amostragem espacial [m]
$\Delta t$	passo de discretização temporal [ns]
$\Delta x$	passo de discretização espacial na direção x [mm]
$\Delta y$	passo de discretização espacial na direção y [mm]
$\Delta z$	passo de discretização espacial na direção z [mm]
$\epsilon$	permissividade dielétrica [F/m]
$\epsilon$	permissividade dielétrica com o termo “relativa” omitido (adimensional)
$\epsilon^*$	permissividade dielétrica complexa
$\epsilon'$	componente real da permissividade dielétrica complexa
$\epsilon''$	componente imaginário da permissividade dielétrica complexa
$\epsilon_0$	permissividade dielétrica do espaço livre, $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m
$\epsilon_{\text{agreg.}}$	permissividade da matriz granular (adimensional);
$\epsilon_{\text{água}}$	permissividade dielétrica da água (adimensional);
$\epsilon_{\text{el}}$	permissividade do espaço livre (adimensional).
$\epsilon_{\text{mat.}}$	permissividade dielétrica efetiva da mistura (adimensional);
$\epsilon_r$	permissividade dielétrica relativa (adimensional)
$\epsilon_{\text{teórica}}$	valores teóricos de permissividade dielétrica relativa, calculados por meio do CRIM
$\lambda$	comprimento de onda do campo eletromagnético propagado [m]
$\lambda_{\text{min.}}$	menor comprimento de onda do campo eletromagnético propagado [m]
$\sigma$	condutividade elétrica [S/m]
$\sigma^*$	condutividade elétrica complexa;
$\sigma'$	componente real da condutividade elétrica complexa
$\sigma''$	componente imaginário condutividade elétrica complexa
$\chi_m$	suscetibilidade magnética
$\omega$	frequência angular

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	21
1.1.	JUSTIFICATIVA .....	23
1.2.	OBJETIVO.....	23
1.3.	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	23
2.	REVISÃO DA LITERATURA .....	25
2.1.	HISTÓRICO.....	25
2.2.	PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS E PROPAGAÇÃO DE ONDAS .....	29
2.2.1.	Introdução.....	29
2.2.2.	Permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ).....	30
2.2.3.	Condutividade elétrica ( $\sigma$ ).....	37
2.2.4.	Permeabilidade magnética ( $\mu$ ).....	40
2.2.5.	Propagação de ondas eletromagnéticas em materiais dielétricos.....	41
2.3.	MODELAGEM DE PROPRIEDADES E FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS.....	43
2.3.1.	Propriedades eletromagnéticas de materiais compostos .....	43
2.3.2.	Propagação, reflexão e transmissão e de ondas eletromagnéticas .....	44
2.3.3.	O método FDTD .....	46
2.3.4.	Programas para modelagem do uso do GPR.....	48
2.4.	SISTEMAS GPR.....	48
2.4.1.	Componentes de um sistema GPR .....	48
2.4.2.	Sistemas de transmissão pelo solo ( <i>ground-coupled systems</i> ).....	50
2.4.3.	Construção de imagens com o GPR .....	51
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1.	CONCEPÇÃO DO EXPERIMENTO .....	54
3.2.	MATERIAL GRANULAR.....	56

3.2.1.	Origem dos materiais .....	56
3.2.2.	Ensaio de caracterização.....	57
3.3.	MODELAGEM NUMÉRICA .....	59
3.3.1.	Cálculo das permissividades dielétricas teóricas ( $\epsilon_{teórica}$ ) .....	59
3.4.	Simulação da propagação do sinal do GPR.....	60
3.5.	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E FERRAMENTAS DE APOIO 63	
3.5.1.	Caixa para avaliação da sensibilidade do GPR a variações na massa específica aparente .....	63
3.5.2.	Martetele e placa compactadora .....	66
3.5.3.	Gabarito.....	68
3.6.	SISTEMA GPR .....	68
3.7.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	69
3.8.	PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	69
3.9.	PROCESSAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS COM O GPR.....	71
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	73
4.1.	MATERIAL GRANULAR.....	73
4.1.1.	Ensaio de caracterização.....	73
4.2.	MODELAGEM NUMÉRICA .....	78
4.2.1.	Cálculo das permissividades dielétricas teóricas ( $\epsilon_{teórica}$ ) .....	78
4.3.	SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DO GPR .....	81
4.3.1.	Definição do domínio computacional.....	82
4.3.2.	Definição dos passos de discretização espacial ( $\Delta x$ ; $\Delta y$ ; $\Delta z$ ) janela temporal (W) e intervalo de amostragem espacial ( $\Delta l$ ).....	82
4.3.3.	Resultados das simulações .....	83
4.4.	EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO .....	87
5.	CONCLUSÕES .....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98

APÊNDICE 1: Arquivos de entrada da simulação da propagação do sinal do GPR  
107

## 1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária desempenha um papel econômico e social fundamental perante a sociedade brasileira, uma vez que aproximadamente 61% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros no país é feita por meio do modal rodoviário. Mesmo com sua importância, 78,5% de sua extensão não é pavimentada e dos 12,5% de extensão pavimentada, 52,4% apresentam algum tipo de defeito (CNT; SEST; SENAT, 2019).

Embora seja a 9ª maior economia mundial, em termos de densidade de malha pavimentada o Brasil é superado por países como o Equador e o Uruguai, respectivamente 60ª e 79ª economias (CNT; SEST; SENAT, 2019; THE WORLD BANK, 2019). Segundo estimativa do Plano CNT de Transporte e Logística 2018 (CNT, 2018) o investimento mínimo necessário para ampliação da extensão da malha pavimentada (construção e pavimentação) e ampliação da capacidade da malha existente (duplicação) é de R\$403,1 bilhões.

A distribuição da infraestrutura existente não é equilibrada: os estados da região sul apresentam uma densidade de malha pavimentada de 20,5 km/1.000 km<sup>2</sup> enquanto os estados da região norte apresentam uma densidade de 2,5 km/1.000 km<sup>2</sup>. A região sudeste apresenta densidade de 13,1 km/1.000 km<sup>2</sup>. Tal desequilíbrio impacta negativamente no desenvolvimento das regiões menos favorecidas. (CNT; SEST; SENAT, 2019).

Os indicadores negativos são persistentes: a extensão da malha rodoviária federal pavimentada cresceu apenas 6,7% no período entre 2009 e 2019 e a extensão pavimentada com problemas cresceu em relação a 2018, quando correspondia a 50,9% (CNT; SEST; SENAT, 2019). Por outro lado, o licenciamento de caminhões, caminhões-tratores, reboque e semirreboques cresceu 78,9% no período entre 2007 e 2017 (CNT, 2018).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o surgimento prematuro de defeitos superficiais em pavimentos pode ser atribuído, entre outros fatores, à falhas construtivas como a “falta de compactação apropriada das camadas, causando deformações e afundamentos excessivos ou rupturas localizadas”. Entre os defeitos que podem ter a sua gênese atribuída à compactação inadequada de camadas subjacentes ao revestimento estão o afundamento por consolidação local (ALC); afundamento de consolidação da trilha de roda (ATC) e panela ou buraco (P) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Pérez; Medina; Romana (2006) camadas granulares, utilizadas como suporte para camadas asfálticas em pavimentos flexíveis e que em certos casos também podem ser utilizadas como base para pavimentos rígidos, desempenham um papel muito importante no comportamento dos pavimentos, cuja vida de projeto tem muito a ver com a qualidade e a resposta das camadas granulares.

O *ground penetrating radar* (GPR) ou radar de subsuperfície (PORSANI, 1999) 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 para buscar contrastes nas propriedades eletromagnéticas dos materiais – permissividade dielétrica ( $\epsilon$ )<sup>1</sup>; condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ) – objetivando “mapear estruturas e características ocultas no solo ou em estruturas feitas pelo homem” (ANNAN, 2001, p. 1, tradução nossa).

O GPR tem sido utilizado em pavimentos rodoviários desde a década de 1980, inicialmente para a determinação da espessura das camadas e, posteriormente, para a investigação da gênese de defeitos e de sua presença em camadas subsuperficiais. Na década de 1990 foram realizados os primeiros estudos sobre a utilização do GPR para avaliação *in situ* da massa específica aparente de misturas asfálticas. Desde então diversos autores desenvolveram trabalhos sobre o tema e a aplicação foi sendo reconhecida como ferramenta para o controle de execução por órgãos rodoviários de vários países, o que resultou na publicação de normas e especificações para esta finalidade.

No tocante a camadas granulares de pavimentos, desde a década de 1990 foram vários os trabalhos que consideraram as propriedades eletromagnéticas dos materiais empregados como meio de prever seu desempenho em campo. Cabe destacar que há ausência de trabalhos que tratem do uso do GPR como ferramenta para o controle de execução das mesmas.

---

<sup>1</sup> Permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) é uma propriedade dos materiais, medida em farads por metro [F/m], enquanto permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) é um valor adimensional que relaciona a permissividade dielétrica do material de interesse a permissividade dielétrica do espaço livre ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m).  $\epsilon$  e  $\epsilon_r$ , bem como seus usos, serão discutidas adiante.

## **1.1. JUSTIFICATIVA**

O uso extensivo de misturas de britas graduadas em camadas de pavimento na malha rodoviária nacional e a necessidade de ampliação dessa malha justificam o desenvolvimento de pesquisas que busquem dar subsídios para o aprimoramento do controle de execução e evitem o surgimento de defeitos precoces no pavimento.

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 ocorrências e informações importantes podem deixar de ser levadas em consideração, e – no caso de abertura de poços – um método destrutivo de custo considerável e execução demorada, que impacta na operação da via.

O GPR pode ser utilizado para avaliar de modo não-destrutivo as condições das camadas, prever desempenho e diagnosticar a gênese de defeitos existentes (SAARENKETO; SCULLION, 1996; SCULLION; SAARENKETO, 1997), e também para controlar a qualidade na execução das camadas de base e sub-base (MARA NORD PROJECT, 2011a). Para tanto é necessário avaliar previamente a influência da granulometria e da densidade aparente na permissividade dielétrica, contribuição pretendida por este trabalho.

## **1.2. OBJETIVO**

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

## **1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação será dividida em cinco capítulos. No Capítulo 1 será feita a introdução sobre a pesquisa, justificando o tema e apresentando os objetivos gerais e específicos. No Capítulo 2 será feita a revisão da literatura, seção em que serão apresentadas as teorias eletromagnéticas pertinentes. No Capítulo 3 será apresentada a metodologia aplicada para que esta pesquisa atinja seus objetivos. No

Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos, bem como suas análises e discussões. No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. HISTÓRICO

O uso do GPR na investigação de elementos de infraestrutura de transportes teve início na metade da década de 1970, quando a *Federal Highway Administration* (FHWA) conduziu nos Estados Unidos os primeiros testes de viabilidade de sua aplicação em túneis e, posteriormente, para a avaliação de patologias em tabuleiros de pontes (MOREY, 1998a).

Solla; Lorenzo; Pérez-Garcia (2016) citam os trabalhos de Hironaka; Hitchcock; Forrest (1976) e Kovacs e Morey (1983) como algumas das primeiras aplicações em pavimentos descritas. Um dos primeiros sistemas para inspeção de rodovias montados em veículos foi desenvolvido pela FHWA em 1985 (CLEMEÑA; SPRINKEL; LONG, 1986)

Segundo Saarenketo (2006), nos Estados Unidos – entre o final da década de 1980 e o início da de 1990 – e na Europa – na primeira metade da década de 1990 – as aplicações do GPR concentravam-se na estimativa das espessuras das camadas, na detecção de vazios sob placas de concreto e na detecção de áreas deterioradas em tabuleiros de pontes.

A consolidação das aplicações rodoviárias e a síntese da prática entre o final da década de 1990 e a metade da década de 2000 são apresentadas nos trabalhos de Maser (1996); Cariou *et al.* (1997); Morey (1998a); Saarenketo e Scullion (2000); Al-Qadi e Lahouar (2005); Benedetto e Pensa (2007) e Loizos e Plati (2007).

A estimativa das espessuras das camadas, ainda uma das principais aplicações em pavimentos, é um tema ao qual diversos autores têm se dedicado. Citam-se os trabalhos de Fauchard *et al.* (2003); Solla *et al.* (2013); Varela-González *et al.* (2014); Zhao; Shangguan; Al-Qadi (2015) e Zhao e Al-Qadi (2016) como exemplos estudos dedicados à esta aplicação.

Como o tipo de antena mais comum utiliza a técnica de radar de impulso (*impulse radar technique*) (MARA NORD PROJECT, 2011b), que limita a frequência central máxima a aproximadamente 2 GHz e, uma vez que a dimensão mínima detectável de um alvo é função da frequência da antena, o *Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées* (LCPC) desenvolveu pesquisas entre o fim da década de 1980 e o início da década de 2000 – assim como outras instituições e pesquisadores, até os dias de hoje – sobre o uso da técnica de radar de frequência escalonada (*step frequency radar technique*), objetivando suprir a necessidade de antenas com

tecnologia adequada para frequências centrais superiores para aplicação em um cenário de uso extensivo de camadas delgadas<sup>2</sup>. Parte destas pesquisas são apresentadas no trabalho de Dérobert *et al.* (2001).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) publicou no final da década de 1990 normas sobre o uso do GPR para a avaliação de tabuleiros de pontes revestidos em concreto asfáltico (ASTM, 2015a), determinação da espessura de camadas do pavimento (ASTM, 2015b) 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 a *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, p. R 33-1, tradução nossa).

Como exemplos de especificações e manuais europeus para estimativa das espessuras das camadas e para investigação das condições do pavimento para projetos de restauração, cita-se o do Reino Unido (HIGHWAYS ENGLAND, 2008); conjunto entre Finlândia, Suécia e Noruega (MARA NORD PROJECT, 2011b); Bélgica (GRÉGOIRE *et al.*, 2016) e o da *European GPR Association* (EUROGPR, 2016).

Uma vez que o GPR busca contrastes nas propriedades eletromagnéticas, simultaneamente aos estudos que objetivam o aprimoramento do método e a ampliação do emprego, autores têm se dedicado à caracterização da resposta dos materiais. Citam-se trabalhos sobre as respostas das misturas asfálticas em laboratório (SHANG *et al.*, 1999) e em campo (AL-QADI; LAHOUAR; LOULIZI, 2001); agregados (SAARENKETO; SCULLION, 1996; SCULLION; SAARENKETO, 1997) e solos (SAARENKETO, 1998b).

A maioria das aplicações do método baseia-se na análise do sinal obtido no domínio do tempo – avaliação do tempo de ida e volta do sinal. Outra abordagem,

---

<sup>2</sup> Têm-se utilizado na França, desde o final da década de 1970, técnicas de manutenção baseadas na aplicação de camadas delgadas de revestimento, cujas espessuras variam de menos de 4 cm – *béton bitumineux mince* (BBM) ou concreto asfáltico delgado – a menos de 2 cm – *béton bitumineux ultra-mince* (BBUM) ou concreto asfáltico ultradelgado (BERNUCCI *et al.*, 2008).

cuja adoção é crescente, é a análise do sinal obtido no domínio da frequência – simplificada, análise espectral – porque a variação do espectro de frequências fornece “informações adicionais que podem ser usadas para determinar as condições e características internas dos materiais” (PEDRET RODÉS; PÉREZ-GRACIA; MARTÍNEZ-REGUERO, 2015, p. 181, tradução nossa).

Por sua capacidade de detectar mudanças nas propriedades dos materiais o método tem sido usado com sucesso na detecção de patologias, o que é perceptível pela vasta bibliografia disponível. Cita-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 (CHEN *et al.*, 2006; GROTE *et al.*, 2005; VENMANS; VAN DE VEN; KOLLEN, 2016); na previsão de bombeamento de finos do subleito (TOSTI; BENEDETTO, 2012) e na detecção de trincas (DIAMANTI; REDMAN, 2012; KRYSIŃSKI; SUDYKA, 2013; SOLLA *et al.*, 2014). Observa-se, no entanto, que seu uso deve ser apoiado em dados obtidos por meio de outras técnicas.

Segundo Narbro *et al.* (2012), citando Roimela (1997), 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 o ar presentes nos vazios – foi utilizado para desenvolver um modelo de regressão que serviu de referência para o desenvolvimento da especificação finlandesa que trata da avaliação *in situ* da permissividade dielétrica das misturas asfálticas (PANK, 2008) e da que trata do método de cálculo do volume de vazios a partir da permissividade dielétrica (PELLINEN *et al.*, 2015).

Outros autores se dedicaram a pesquisar as contribuições do GPR para a avaliação da densificação de misturas asfálticas. Citam-se os trabalhos de Saarenketo e Scullion (2000); Al-Qadi *et al.* (2010); Leng; Al-Qadi; Lahouar (2011); Kassem *et al.* (2016) e Shagguan *et al.* (2016). Beaucamp; Fauchard; Laguerre (2013) relatam sucesso ao utilizar a técnica de radar de frequência escalonada, citada anteriormente, para avaliar a compactação de uma mistura a quente aplicada em uma rodovia no norte da França.

Por meio do projeto *Mara Nord*, Finlândia, Suécia e Noruega desenvolveram conjuntamente recomendações para manuais sobre o uso do GPR para medições do teor de vazios em misturas asfálticas (MARA NORD PROJECT,

2011c) e recomendações para manuais acerca do uso do GPR para controle qualidade de construção de rodovias (MARA NORD PROJECT, 2011a).

Um projeto piloto dentro do âmbito do *The Second Strategic Highway Research Program* (SHRP 2) avaliou o uso de câmeras de infravermelho (câmeras térmicas) e do GPR para “identificar a densidade *in situ* durante as operações de construção” (SEBESTA; SCULLION; SAARENKETO, 2013, cap. 1, tradução nossa) e problemas relacionados à execução, como por exemplo, a segregação da mistura. A conclusão foi que o GPR tem vantagem sobre a câmera de infravermelho porque “ele é usado no pano final após compactação”; no entanto, desenvolvimentos adicionais seriam necessários antes que uma implantação bem-sucedida pudesse ocorrer (SEBESTA; SCULLION; SAARENKETO, 2013, cap. 4, tradução nossa).

O trabalho de Hoegh e Dai (2017) descreve como a experiência e os resultados obtidos no SHRP 2 e em estudos em larga escala realizados no estado de Minnesota (EUA) foram utilizados na implementação do chamado teste de cobertura total, a partir do qual foram desenvolvidas 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).

O método também é reconhecido por autores nacionais como uma ferramenta para estimativa de espessuras para fins de inventário em nível de rede (GONÇALVES; CERATTI, 1998); avaliação estrutural (BALBO, 2007; GONÇALVES; CERATTI, 1998; MEDINA; MOTTA, 2005); controle executivo (GONÇALVES; 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 (FRANÇOSO *et al.*, 2013; LOPES, 2009; SILVA, 2014; TREIBER; FRANÇOSO; ALMEIDA, 2016; VIEIRA; GANDOLFO, 2013); pavimento rígido urbano (SANTOS *et al.*, 2015) e aeroportuário (SILVA *et al.*, 2011).

## 2.2. PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS E PROPAGAÇÃO DE ONDAS

### 2.2.1. Introdução

O embasamento teórico do método GPR, fundamentado pela teoria do eletromagnetismo, é amplamente descrito na literatura e não será discutido em detalhes neste trabalho. Para o aprofundamento no tema sugere-se consulta à literatura especializada, como os trabalhos de Porsani (1999); Annan (2001); Daniels (2004); Jol (2009) e Utsi (2017). Exceção será aberta para conceitos associados às propriedades que têm papel significativo no desempenho do método e que serão abordados neste capítulo.

Primeiramente, deve-se entender que os perfis obtidos com o GPR não são imagens propriamente ditas da subsuperfície e sim registros temporais das respostas dos materiais à propagação de pulsos curtos de energia eletromagnética (entre 1 e 20 ns) de alta frequência (entre 10 MHz e 2.5 GHz). A interação entre a energia eletromagnética propagada e o meio no qual ela se propaga é descrita – de modo geral – por meio de relações quantitativas (ANNAN, 2001), expressas pelas Equações 1 – 3:

$$D = \varepsilon E \quad (1)$$

$$J = \sigma D \text{ (Lei de Ohm)} \quad (2)$$

$$B = \mu H \quad (3)$$

Em que:

D: densidade de fluxo elétrico [coulombs por metro quadrado – C/m<sup>2</sup>];

E: intensidade de campo elétrico [volts por metro – V/m];

J: densidade de corrente [ampères por metro quadrado – A/m<sup>2</sup>];

B: densidade de fluxo magnético [teslas – T];

H: intensidade de campo magnético [ampères por metro – A/m];

$\varepsilon$ : permissividade dielétrica [farads por metro – F/m]

$\sigma$ : condutividade elétrica [siemens por metro – S/m];

$\mu$ : permeabilidade magnética [henries por metro – H/m].

Além de descrever a interação entre a energia eletromagnética e o meio, as relações constitutivas introduzem e quantificam as propriedades elétricas e

magnéticas dos materiais –  $\varepsilon$ ;  $\sigma$ ; e  $\mu$ . Uma vez que tais propriedades governam a propagação e a atenuação da energia eletromagnética, descontinuidades ou mudanças implicam em mudanças nas respostas registradas pelo GPR.

A forma como  $\varepsilon$ ;  $\sigma$ ; e  $\mu$  são apresentadas nas Equações 1 – 3 pode levar ao entendimento de que se trata de constantes simples de proporcionalidade. Seria assim no “caso ideal de um material uniforme, homogêneo, sem perdas, anisotropia ou dependência da frequência” (CASSIDY, 2009, p. 44, tradução nossa), mas materiais de pavimentação – solos; insumos e materiais preparados – apresentam maior ou menor nível de perda e suas propriedades elétricas são dependentes da frequência.

### 2.2.2. Permissividade dielétrica ( $\varepsilon$ )

A permissividade dielétrica é “a propriedade elétrica mais importante a afetar os resultados de levantamentos com o GPR” (SAARENKETO, 2006, p. 20, tradução nossa). Como será visto adiante neste capítulo,  $\varepsilon$  influencia na velocidade de propagação da energia eletromagnética, na sua atenuação, no comprimento de onda e na reflexão, refração e transmissão em interfaces.

É normalmente expressa como uma relação com a permissividade dielétrica do espaço livre<sup>3</sup>, denominada permissividade dielétrica relativa ( $\varepsilon_r$ ) (PORSANI, 1999), conforme Equação 4:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Em que:

$\varepsilon_r$ : permissividade dielétrica relativa (adimensional)<sup>4</sup>;

$\varepsilon$ : permissividade dielétrica do material [F/m];

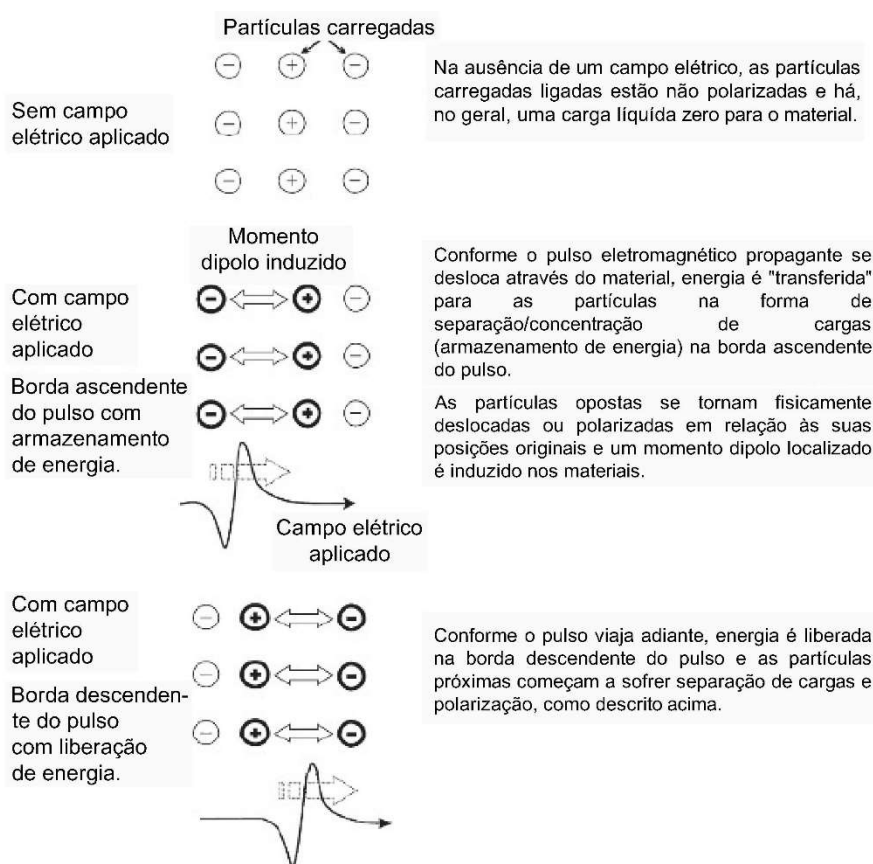
$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m, é a permissividade dielétrica do espaço livre.

<sup>3</sup> Espaço livre (*free space*), também conhecido como vácuo, é o meio de referência no eletromagnetismo. O termo tem origem na idéia de que o “espaço livre é desprovido de toda a matéria” (MACKAY; LAKHTAKIA, 2008, p. 143, tradução nossa), é de uso corrente em trabalhos relacionados ao eletromagnetismo e foi utilizado pelos autores da bibliografia consultada.

<sup>4</sup> Deste ponto em diante o termo “relativa” será omitido e  $\varepsilon_r$  será referida como “permissividade dielétrica” ( $\varepsilon$ ).

A permissividade dielétrica descreve a habilidade de um material em armazenar e liberar energia eletromagnética na forma de cargas elétricas – que se relacionam, classicamente, à habilidade de armazenamento dos capacitores – ou o grau de polarização (em F/m) exibido por um material sob a influência de um campo elétrico aplicado” (CASSIDY, 2009). O mecanismo de armazenamento e liberação de energia representado pelas correntes de deslocamento é explicado por Annan e ilustrado pela Figura 2.1:

As correntes de deslocamento estão associadas às cargas vinculadas que estão restritas à uma distância limitada de movimento. [...] quando um campo elétrico é aplicado, a carga vinculada move-se para outra configuração estática. Essa transição ocorre virtualmente de modo instantâneo, após a qual as cargas não se movem mais. Durante a transição, a energia é extraída do campo elétrico e é armazenada no material. Quando o campo é removido, a carga volta para a distribuição de equilíbrio original e a energia é liberada (ANNAN, 2001, p. 32, tradução nossa).



**Figura 2.1 – Diagrama conceitual que ilustra o processo de armazenamento / liberação de energia, polarização de carga e o desenvolvimento de um momento dipolo que ocorre quando uma onda eletromagnética se propaga através do material. Fonte: adaptado de Cassidy (2009).**

Como exposto anteriormente, o entendimento de que a permissividade é uma constante simples de proporcionalidade não corresponde à realidade. Cassidy (2009) descreve um processo análogo ao da condutividade – próxima propriedade a ser discutida – responsável por introduzir um componente de dissipação de energia no processo de polarização e que atua fora de fase com o mecanismo de armazenamento e liberação de energia:

Se as cargas em separação [Figura 2.1] estão livres para se mover e podem interagir fisicamente (como nas moléculas dipolares de água livre, por exemplo), então o processo de deslocamento e polarização converte parte da energia [eletromagnética] em calor durante as interações das partículas (CASSIDY, 2009, p. 46, tradução nossa).

Assim sendo,  $\varepsilon$  deve ser representada por um valor complexo, no qual o componente real representa o mecanismo “instantâneo” de armazenamento e liberação de energia; o componente imaginário representa a dissipação de energia e ambos os componentes são dependentes da frequência (CASSIDY, 2009). A permissividade dielétrica complexa é expressa pela Equação 5:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega) \quad (5)$$

Em que:

$\varepsilon^*$ : permissividade dielétrica complexa;

$\varepsilon'$ : componente real, representa o armazenamento e liberação de energia (polarização);

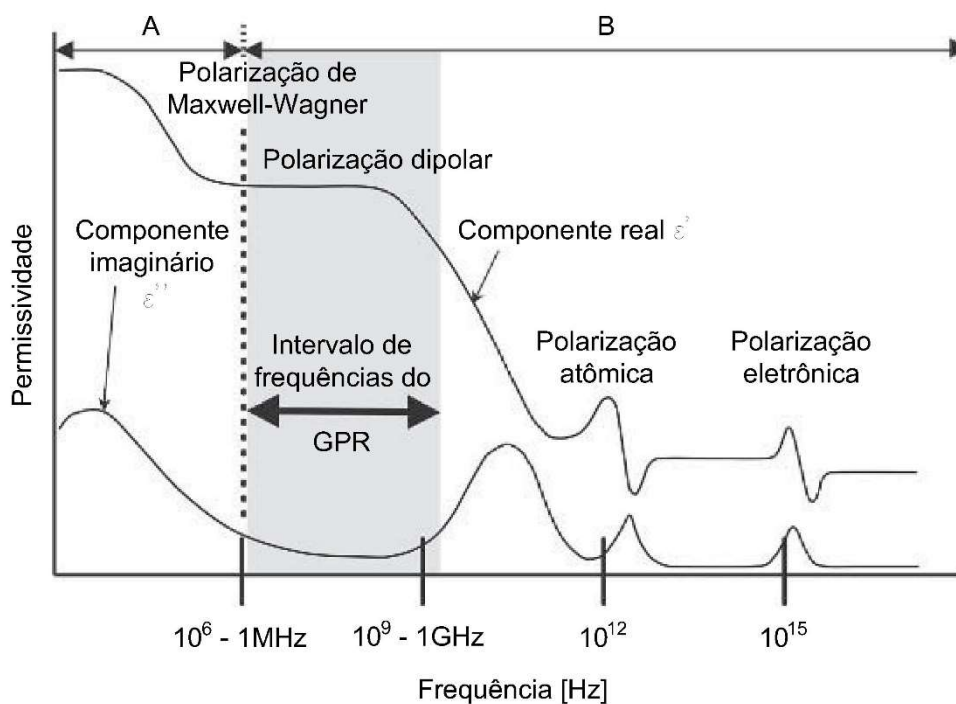
$\varepsilon''$ : componente imaginário, representa a dissipação de energia (condução);

$\omega$ : frequência angular.

Quando um material está sob a atuação de um campo elétrico num intervalo de frequências, que corresponde aproximadamente ao do GPR, a dependência da frequência pela permissividade dielétrica apresenta-se por meio do mecanismo de polarização dipolar ou orientacional. À reorientação das partículas, conforme a presença ou ausência do campo elétrico, dá-se o nome de relaxação, o tempo de reorientação das partículas é definido como tempo de relaxação e a frequência de relaxação é o inverso deste tempo. Segundo Cassidy (2009, p. 49, tradução nossa) tal mecanismo “ocorre em materiais nos quais as moléculas têm



momentos de dipolo elétrico permanentes”. Tais momentos são causados por desequilíbrios no compartilhamento de elétrons por átomos de uma molécula. A Figura 2.2 ilustra a relação entre frequência e permissividade e os diferentes mecanismos de polarização:



**Figura 2.2 – Fenômeno de relaxação dielétrica associado a um material dielétrico dispersivo idealizado. A região A representa as polarizações associadas às cargas livres e interações materiais enquanto a região B representa polarizações moleculares e atômicas associadas às cargas vinculadas. Fonte: adaptado de Cassidy (2009).**

À relação entre  $\epsilon''$  e  $\epsilon'$  dá-se o nome de tangente de perdas ( $\tan \delta$ ) ou fator de dissipação, que descreve o quão dispersivo é um material e “pode fornecer um guia para os efeitos físicos de atenuação na onda do GPR” (CASSIDY, 2009, p. 60, tradução nossa). A tangente de perdas é expressa pela Equação 6:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma' + \omega \epsilon''}{\omega \epsilon' - \sigma''} \quad (6)$$

Em que:

$\tan \delta$ : tangente de perdas (adimensional);

$\sigma'$ : componente real da condutividade elétrica complexa, representa a dissipação de energia (condução);

$\sigma''$ : componente imaginário condutividade elétrica complexa, representa a dissipação de energia armazenada (polarização).

Entretanto, por conveniência e para fins de cálculo de valores aproximados de velocidade e comprimento de onda, o valor da permissividade é simplificado para seu componente real e o componente imaginário é ignorado. Tal procedimento não deve ser adotado para análises detalhadas, pois é muito genérico (CASSIDY, 2009). A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam valores simplificados de  $\epsilon$ :

**Tabela 2.1 - Valores de permissividade dielétrica do ar, da água e de diferentes materiais para frequência de antena de 100 MHz. Fonte: adaptado de Cassidy (2009).**

<b>Material</b>	<b>Permissividade dielétrica (<math>\epsilon</math>)</b>	<b>Material</b>	<b>Permissividade dielétrica (<math>\epsilon</math>)</b>
Água do mar	81 – 88	Calcário – úmido	6 – 15
Água do mar – congelada	4 – 8	Concreto – seco	4 – 10
Água doce	78 – (25 °C) 88	Concreto – úmido	10 – 20
Água doce – congelada	3	Granito – fraturado e úmido	5 – 15
Ar	1	Granito – seco	5–8
Areia – marinha, seca	5 – 10	Solo – arenoso seco	4 – 6
Areia – seca	3 – 6	Solo – arenoso úmido	15 – 30
Areia – úmida	10 – 30	Solo – argiloso seco	4 – 6
Arenito – seco	4 – 7	Solo – argiloso úmido	10 – 15
Arenito – úmido	5 – 15	Solo – média	16
Calcário – seco	4 – 8	-	-

**Tabela 2.2 – Valores de permissividade dielétrica do ar, da água, de diferentes materiais utilizados em pavimentação e de solos de subleito comumente utilizados em levantamentos feitos na Escandinávia. Fonte: adaptado de Saarenketo (2006).**

<b>Material</b>	<b>Permissividade dielétrica (<math>\epsilon</math>)</b>	<b>Material</b>	<b>Permissividade dielétrica (<math>\epsilon</math>)</b>
Ar	1	Concreto asfáltico/outras misturas asfálticas	4 – 8 (com adição de escória 8 – 15)
Água (doce)	81	Concreto hidráulico	8 – 10
Leito rochoso (granito)	5 – 7	Revestimento primário (brita)	12 – 14
Turfa (condição natural)	60	Base granulares	6 – 8
Turfa (subleito)	40	Bases asfáltica	6 – 7
Argila	25 – 40	Bases cimentadas	8 – 10
Silte	16 – 30	Pavimentos (novos/secos), em média	5
Areia siltosa	7 – 10	Pavimentos (normais), em média	6
Areia	4 – 6	Pavimentos (antigo/úmido), em média	7 – 8
Brita	4 – 7	Pavimentos com revestimento primário, em média	7 – 9

Segundo Saarenketo (2006, p. 24, tradução nossa), “o componente mais importante a afetar a permissividade dielétrica de solos e materiais granulares é a água”. O referido autor classifica a água presente em solos e agregados, de acordo com suas propriedades elétrica, como: “ (1) água adsorvida, também chamada de água higroscópica; (2) água viscosa ou capilar e (3) água livre” (SAARENKETO,

1998b, p. 74, tradução nossa). A Figura 2.3 ilustra a distribuição d'água aprisionada no solo:

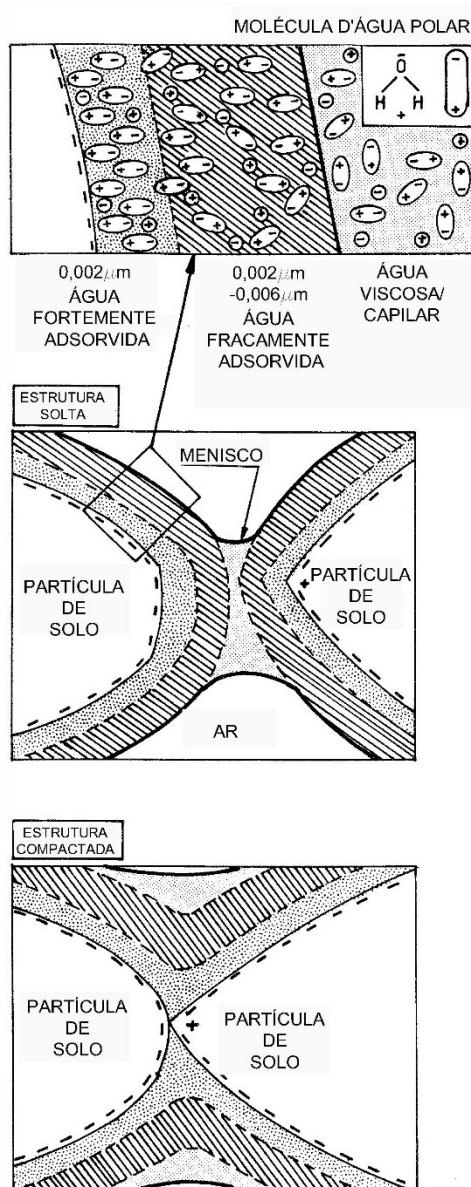


Figura 2.3 – Estrutura d'água aprisionada no solo. Fonte: adaptado de Saarenketo .

Água higroscópica ou adsorvida é aquela aprisionada a partir do ar em forma de película delgada em torno da superfície negativamente carregada dos minerais. Essa película se divide em duas camadas: a primeira, chamada de água fortemente adsorvida, com espessura de  $0,002 \mu\text{m}$ , está diretamente ligada à superfície dos minerais; a segunda, chamada de água fracamente adsorvida, tem espessura variando entre  $0,002 \mu\text{m}$  e  $0,006 \mu\text{m}$ . As forças de ligação diminuem com a distância da superfície do mineral e as camadas externas são muito sensíveis às

mudanças na pressão e temperatura. (SAARENKETO, 1998b; SCULLION; SAARENKETO, 1997)

Água viscosa ou capilar é aquela que se situa entre a água adsorvida e a água livre; ela 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. Também se divide em duas camadas: a interna, em contato direto com a água adsorvida, funciona como uma zona de transição entre esta e a água capilar externa e é controlada por forças de interação entre as superfícies das partículas coloidais; a externa tem sido denominada de fracamente aprisionada e é controlada por forças de interação entre as superfícies das partículas coloidais e por forças de tensão superficial (SAARENKETO; SCULLION, 1996; SAARENKETO, 1998b)

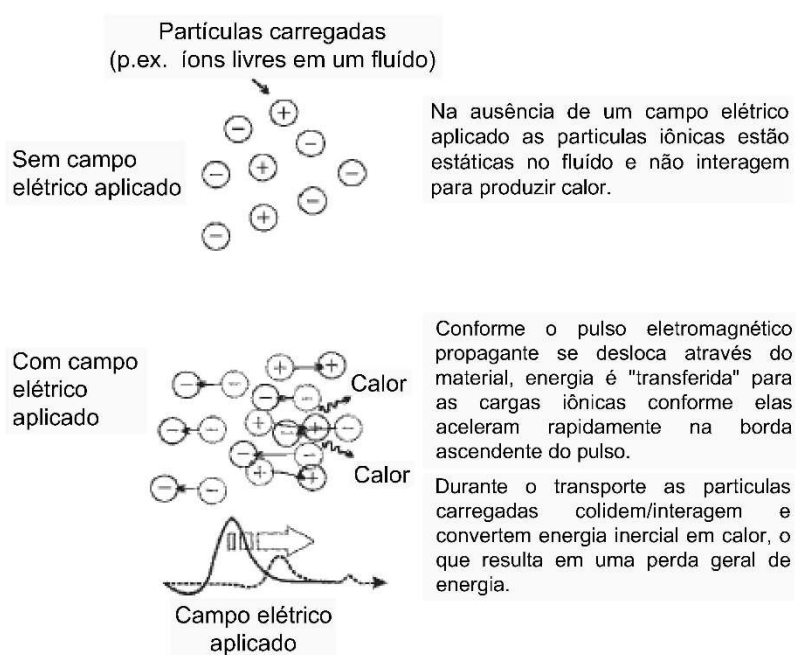
A permissividade dielétrica em solos e materiais granulares depende do grau de ligação das moléculas de água em torno dos grãos. Como a atração da água livre aos solos e materiais granulares é tão fraca que ela pode responder à ação da gravidade, sua presença tem um grande impacto na permissividade dielétrica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

### **2.2.3. Condutividade elétrica ( $\sigma$ )**

A condutividade elétrica descreve a habilidade de um material em conduzir corrente sob a ação de um campo elétrico. É expressa em siemens por metro [S/m] ou milisiemens por metro [mS/m], no caso de aplicações do GPR (PORSANI, 1999).

Quanto maior a quantidade de cargas elétricas livres, mais condutivo é o material, maior o valor de  $\sigma$  e mais energia eletromagnética é dissipada em forma de energia térmica (calor). O mecanismo de dissipação de energia representado pelas correntes de condução é explicado por Annan e ilustrado pela Figura 2.4:

Quando um campo elétrico é aplicado, cargas elétricas livres aceleram até uma velocidade final. Depois da aceleração inicial, a velocidade se torna constante e uma transferência contínua de energia para o material circundante em forma de calor ocorre. [...] A carga em movimento colide [aleatoriamente] contra [átomos, íons ou elétrons] em repouso e transfere energia mecânica que aparece em forma de calor no meio (ANNAN, 2001, p. 31, tradução nossa).



**Figura 2.4 – Diagrama conceitual que ilustra o processo de condução em um material contendo cargas livres tais como ânions e cátions. Fonte: adaptado de Cassidy (2009).**

A maioria dos minerais presentes nos agregados utilizados em pavimentação, como quartzo e feldspato, são não condutores (SAARENKETO, 1998a). A condução de corrente elétrica em camadas granulares se dá pela presença de água contendo íons diluídos de sódio ( $\text{Na}^+$ ); cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ); cloreto ( $\text{Cl}^-$ ); carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), por exemplo (CASSIDY, 2009) e também pelas soluções condutivas de corrente elétrica (eletrólitos) formadas pelo contato da água com impurezas na superfície dos grãos.

Como exposto anteriormente, a forma como  $\sigma$  é apresentada na Equação 2 pode levar ao entendimento de que se trata de constante simples de proporcionalidade, o que não corresponde à realidade. Cassidy (apud TURNER; SIGGINS, 1994) explica que “em frequências baixas do GPR a resposta da carga [à ação do campo elétrico] é efetivamente instantânea e a corrente de condução está em fase com o campo elétrico” (2009, p. 54, tradução nossa). Ele prossegue explicando que “neste caso a condutividade pode ser representada por um valor real [...] e é usualmente a quantidade citada em textos publicados” (CASSIDY, 2009, p. 54, tradução nossa).

Ainda, segundo o autor, “em frequências mais altas, o efeito inercial das cargas aceleradas produz um atraso na resposta física e uma corrente de condução

que está fora de fase com as variações do campo elétrico” (CASSIDY, 2009, p. 55, tradução nossa). Neste caso  $\sigma$  deve ser representada por um valor complexo, no qual a parte imaginária representa o componente fora de fase da corrente. A condutividade elétrica complexa é expressa pela Equação 7:

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' \quad (7)$$

Em que:

$\sigma^*$ : condutividade elétrica complexa;

$\sigma'$ : componente real, representa a dissipação de energia (condução);

$j\sigma''$ : componente imaginário, representa a dissipação de energia armazenada (polarização).

Finalmente, Cassidy (2009) esclarece que apesar da complexidade de muitos materiais, a hipótese de um valor de condutividade estática é adequado em muitos casos porque, citando King e Smith (1981), “o grau de armazenamento de energia associado ao componente imaginário é provavelmente bastante menor do que o grau de perda de energia representado pelo componente real” (2009, p. 55, tradução nossa). A Tabela 2.3 apresenta diversos valores típicos de condutividade para a frequência de 100 MHz:

**Tabela 2.3 - Valores típicos de condutividade de materiais comuns da subsuperfície para frequência de 100 MHz. Fonte: adaptado de Cassidy (2009).**

<b>Material</b>	<b>Condutividade elétrica (<math>\sigma</math>) [mS/m]</b>	<b>Material</b>	<b>Condutividade elétrica (<math>\sigma</math>) [mS/m]</b>
Água do mar	$4 \times 10^3$	Calcário – úmido	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^2$
Água do mar – congelada	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^2$	Concreto – seco	$1 \times 10^0 - 1 \times 10^1$
Água doce	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^1$	Concreto – úmido	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^2$
Água doce – congelada	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^0$	Granito – fraturado e úmido	$1 \times 10^0 - 1 \times 10^1$
Ar	$0 \times 10^0$	Granito – seco	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$

Continuação - Tabela 2.3 - Valores típicos de condutividade de materiais comuns da subsuperfície para frequência de 100 MHz. Fonte: adaptado de Cassidy (2009).

Material	Condutividade elétrica ( $\sigma$ ) [mS/m]	Material	Condutividade elétrica ( $\sigma$ ) [mS/m]
Areia – marinha, seca	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^0$	Solo – arenoso seco	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^2$
Areia – seca	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^0$	Solo – arenoso úmido	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^2$
Areia – úmida	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^1$	Solo – argiloso seco	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^2$
Arenito – seco	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	Solo – argiloso úmido	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^3$
Arenito – úmido	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$	Solo – média	$5 \times 10^0$
Calcário – seco	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	-	-

O efeito prático de materiais com baixos valores de permissividade dielétrica –  $\epsilon_{\text{granito seco}} = 5 - 8$  – e condutividade elétrica –  $\sigma_{\text{granito seco}} = 1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$  mS/m – é percebido ao observar que as ondas eletromagnéticas propagam-se com velocidades maiores e a energia leva mais tempo para se dissipar, implicando uma maior profundidade de penetração. Já em materiais com elevados valores de permissividade dielétrica –  $\epsilon_{\text{solo argiloso úmido}} = 10 - 15$  – e condutividade elétrica –  $\sigma_{\text{solo argiloso úmido}} = 1 \times 10^2 - 1 \times 10^3$  mS/m – as ondas eletromagnéticas propagam-se com velocidades menores e a energia se dissipa mais rápido, implicando uma menor profundidade de penetração e, por consequência, na dificuldade de detectar alvos não superficiais.

#### 2.2.4. Permeabilidade magnética ( $\mu$ )

No tocante à permeabilidade magnética, Annan afirma:

[...] na maioria das aplicações geológicas e em ensaios não destrutivos (END), propriedades elétricas tendem a ser o fator dominante controlando as respostas do GPR [e que] variações magnéticas são usualmente fracas. Ocasionalmente propriedades magnéticas podem afetar as respostas do radar e usuários do GPR deveriam ser



conhecedores dos efeitos magnéticos (ANNAN, 2001, p. 30, tradução nossa).

Ainda sobre  $\mu$ , Saarenketo (2006, p. 20, tradução nossa) afirma que “a suscetibilidade<sup>5</sup> magnética de um solo ou material rodoviário é considerada como igual ao valor do vácuo [ $\mu_0 = 1,26 \times 10^6$  H/m] e portanto não afeta a propagação do pulso do GPR”. No entanto o referido autor (2006) indica os trabalhos de Olhoeft e Capron (1994) e Goodman; Nishimura; Tobita (1994) como fontes de casos nos quais a permeabilidade magnética afetou as propriedades elétricas dos solos. Segundo Daniels (2004), materiais não ricos em óxido de ferro – caso do material estudado neste trabalho – têm valores de permeabilidade magnética insignificantes, o que implica em  $\mu_r = 1$ .

### 2.2.5. Propagação de ondas eletromagnéticas em materiais dielétricos

Segundo Annan (2001, p. 52, tradução nossa) “em altas frequências, os campos eletromagnéticos propagam-se como ondas através do meio”. Da teoria de propagação de ondas eletromagnéticas originam-se as Equações 8-14 apresentadas a seguir, transcritas e adaptadas de Porsani (1999); Annan (2001); Daniels (2004); Saarenketo (2006) e Cassidy (2009). Além de descrever a resposta dos materiais à propagação de ondas eletromagnéticas, estas equações são utilizadas em aplicações práticas com o GPR (SAARENKETO, 2006).

A velocidade de propagação  $v$  está relacionada à  $\varepsilon$  e  $\mu$ , expressa pela Equação 8:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (8)$$

Em que:

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

---

<sup>5</sup> Encontrou-se na literatura consultada os termos “permeabilidade magnética” e “suscetibilidade magnética” para a propriedade representada por  $\mu$ . Cabe reforçar que permeabilidade magnética ( $\mu$ ) é a propriedade do meio que relaciona B e H e esclarecer que suscetibilidade magnética ( $\chi_m$ ) é um parâmetro adimensional relacionado à permeabilidade magnética por meio da permeabilidade magnética relativa e que, “quando multiplicada por H, fornece a magnetização por unidade de volume (metro cúbico) do material” (CALISTER, JR.; RETHWISCH, 2013). Nas citações diretas serão mantidas os termos utilizados pelos autores.

$c = 2,997 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 0,3 \text{ m/ns}$ , é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no espaço livre (velocidade da luz);

$\mu_r$ : permeabilidade magnética relativa. Para materiais não-ferrosos  $\mu_r = 1$  (adimensional).

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 9:

$$v = \frac{2d}{T} \quad (9)$$

Em que:

$d$ : 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 10:

$$d = v \frac{T}{2} \quad (10)$$

A partir da Equação 8 e da Equação 9 é possível estimar praticamente a permissividade dielétrica do material por meio da Equação 11:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (11)$$

A impedância ( $Z$ ) relaciona a intensidade do campo elétrico ( $E$ ) e a intensidade do campo magnético ( $H$ ) por meio das propriedades dielétricas  $\varepsilon$  e  $\mu$ . Para valores de permeabilidade magnética insignificantes,  $Z$  é expressa pela Equação 12:

$$Z = \sqrt{\frac{Z_0}{\epsilon_r}} = \frac{377}{\epsilon_r} \quad (12)$$

Em que:

Z: impedância de onda [ohms –  $\Omega$ ];

$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$ , é a impedância do espaço livre.

A atenuação ( $\alpha$ ) descreve a perda contínua de amplitude que uma onda eletromagnética sofre ao se propagar através de um meio, expressa pela Equação 13:

$$\alpha = 1,636 \times \frac{\sigma}{\epsilon_r} \quad (13)$$

Em que:

$\alpha$ : atenuação da onda [decibéis por metro – dB/m];

O inverso de  $\alpha$  é o fator de atenuação ( $\delta$ ), definido por Cassidy (*apud* REYNOLDS, 1997) – como “a distância em metros que uma onda deve percorrer antes que sua amplitude seja reduzida por um fator de  $1/e$  ou aproximadamente 37%” (2009, p. 60, tradução nossa), expresso pela Equação 14:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (14)$$

Em que:

$\delta$ : fator de atenuação [m].

## 2.3. MODELAGEM DE PROPRIEDADES E FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

### 2.3.1. Propriedades eletromagnéticas de materiais compostos

Quando estudados sob a luz da teoria eletromagnética, os materiais granulares são considerados materiais compostos ou multifásicos, constituídos por três fases heterogêneas e com propriedades eletromagnéticas distintas: o esqueleto mineral; o ar e a água presentes nos vazios.

A permissividade dielétrica de materiais granulares é sensível a variações nos teores de vazios preenchidos por ar e, principalmente, por água. Encontra-se na literatura 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; SHIVOLA, 1999).

Shivola (1999) descreve uma classe de modelos baseada na relação potencial entre a permissividade da mistura e a permissividade de cada fração, à qual pertence o modelo de mistura refrativa (*refractive mixing model*). Cassidy (2009) se refere a ele como modelo de índice de refração complexo (*complex refractive index model* – CRIM) e o descreve como:

[...] um modelo de meio estritamente unidimensional, [que considera cada das fases como uma camada distinta] e que tem se mostrado efetivo para misturas multifásicas envolvendo materiais granulares simples de granulometria média a grossa [...] e fluídos de viscosidade média a baixa. [...] para a maioria das aplicações práticas fornece uma boa analogia com a resposta de materiais reais. (CASSIDY, 2009, p. 64, tradução nossa)

Para materiais granulares o modelo é expresso pela Equação 15:

$$\varepsilon_{mat.} = [(N_e S \sqrt{\varepsilon_{\acute{a}gua}}) + ((1 - N_e) \sqrt{\varepsilon_{agreg.}}) + (N_e (1 - S) \sqrt{\varepsilon_{el}})]^2 \quad (15)$$

Em que:

$N_e$ : porosidade efetiva [%];

$S$ : saturação [%]

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

$\varepsilon_{\acute{a}gua}$ : permissividade dielétrica da água (adimensional);

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

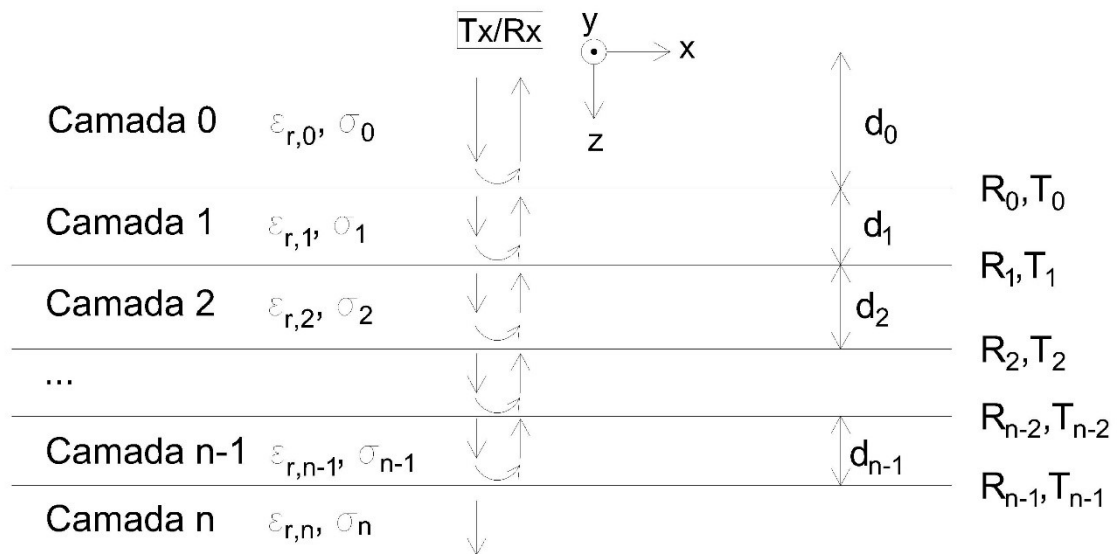
$\varepsilon_{el}$ : permissividade do espaço livre (adimensional).

### 2.3.2. Propagação, reflexão e transmissão e de ondas eletromagnéticas

O GPR é um método que busca contrastes nas propriedades eletromagnéticas dos materiais para mapear estruturas ocultas na subsuperfície. Quando a energia eletromagnética, propagada na forma de onda, encontra uma descontinuidade – como as que ocorrem nas interfaces entre camadas do pavimento

ou na presença de patologias – parte da energia é refletida para as camadas anteriores em direção à superfície e é detectada pelo receptor do sistema e parte continua sendo transmitida para as camadas inferiores.

Para compreensão dos fenômenos de propagação, reflexão e transmissão, modela-se o pavimento como um sistema de  $n+1$  camadas planas, paralelas, com espessura finita ( $d_i$ ) – exceção para o subleito, enésima camada, semi-infinita e com a camada superficial ( $n = 0$ ) correspondendo à superfície do pavimento (para o caso um sistema de transmissão pelo solo, como o utilizado neste trabalho) e ondas com incidência normal (LAHOUAR, 2003). Como em meios homogêneos, isotrópicos e lineares  $\epsilon_r$  é constante, considera-se as camadas homogêneas, isotrópicas e lineares, os parâmetros constitutivos independentes da frequência e  $\mu_r = 1$  para todas as camadas. Tx e Rx são, respectivamente, o transmissor e o receptor. A Figura 2.5 ilustra o modelo descrito:



**Figura 2.5 – Reflexão e transmissão em um sistema de  $n+1$  camadas com ondas de incidência normal. Fonte: adaptado de Lahouar (2003).**

Para o modelo descrito acima os coeficientes de reflexão ( $R$ ) e transmissão ( $T$ ) nas interfaces são expressos pelas Equação 16 e Equação 17, respectivamente:

$$R \cong \frac{\sqrt{\epsilon_{r,n}} - \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}}{\sqrt{\epsilon_{r,n}} + \sqrt{\epsilon_{r,n+1}}} \quad (16)$$

$$T \cong 1 - R = \frac{2\sqrt{\varepsilon_{r,n+1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r,n}} + \sqrt{\varepsilon_{r,n+1}}} \quad (17)$$

Em que:

R: coeficiente de reflexão nas interfaces (adimensional);

T: coeficiente de transmissão nas interfaces (adimensional).

A Tabela 2.4 apresenta valores de R e T para interfaces comuns em pavimentos, com valores de  $\varepsilon$  extraídos da Tabela 2.2:

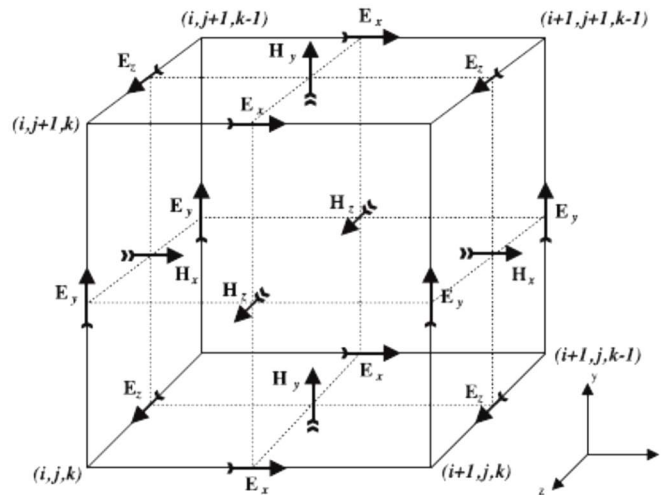
**Tabela 2.4 – Valores de coeficientes de reflexão e transmissão para interfaces comuns em pavimentos. Fonte: a autora, a partir de valores de permissividade apresentados por Saarenketo (2006).**

Interface	$\varepsilon_{r,n}$	$\varepsilon_{r,n+1}$	R	T
Ar - pavimento	1	6	-0,420	1,420
Ar - pavimento antigo/úmido	1	8	-0,478	1,478
Água - pavimento antigo/úmido	81	8	0,522	0,478
Concreto asfáltico - ar	6	1	0,420	0,580
Concreto asfáltico - água	6	81	-0,572	1,572
Concreto asfáltico - base granular	6	7	-0,039	1,039
Base granular - ar	7	1	0,451	0,549
Base granular - água	7	81	-0,546	1,546
Base granular - areia siltosa	7	9	-0,063	1,063
Concreto asfáltico - concreto hidráulico	6	9	-0,101	1,101
Concreto hidráulico - concreto asfáltico	9	6	0,101	0,899

### 2.3.3. O método FDTD

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (*finite-difference time-domain* – FDTD) é uma técnica de modelagem numérica utilizada para simular a propagação, reflexão e transmissão de ondas eletromagnéticas nos meios de interesse e apresentar os resultados obtidos no domínio do tempo. A vantagem de se trabalhar no domínio no tempo é abranger um maior espectro de frequências por simulação. Para o aprofundamento no tema sugere-se consulta à literatura especializada, como os trabalhos de Taflove e Hagness (2005) e Sevgi (2010).

Os meios de interesse são caracterizados pelas três propriedades retromencionadas: permissividade dielétrica; condutividade elétrica e permeabilidade magnética (SEVGI, 2010). O espaço e o tempo devem ser discretizados: a discretização espacial  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  é feita por meio de unidades conhecidas como células de Yee<sup>6</sup> (SEVGI, 2010; WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016). A Figura 2.6 apresenta a estrutura de uma célula:



**Figura 2.6 – Célula de Yee mostrando componentes do campo elétrico (E) e magnético (H). Fonte: Warren; Giannopoulos; Giannakis (2016).**

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 18, que deve ser satisfeita para que o problema proposto seja solucionado corretamente (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016):

$$\Delta t = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (18)$$

Em que:

$\Delta t$ : passo de discretização temporal [ns];

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

<sup>6</sup> Foi Kane Yee (1966) quem desenvolveu as bases do método FDTD ao publicar um artigo no qual descrevia discretizações de espaço e tempo necessárias para resolver as equações diferenciais de Maxwell diretamente no domínio do tempo.

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

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).

Como produto da modelagem, as três componentes do campo elétrico  $E_x$ ;  $E_y$  e  $E_z$  e as três componentes do campo magnético  $H_x$ ;  $H_y$  e  $H_z$  são calculados em diferentes posições de cada célula (SEVGI, 2010). Como exemplos de aplicação de método FDTD para a simulação do uso do GPR em pavimentos citam-se os trabalhos de Benedetto *et al.* (2014); Tosti; Umiliaco (2014); Shangguan; Al-Qadi (2015); Fernandes; Pais (2017); Liu *et al.* (2017); Wang; Zhao; Al-Qadi (2019) e Françoso *et al.*(2020).

#### **2.3.4. Programas para modelagem do uso do GPR**

Entre os programas para modelagem do uso do GPR pode-se citar: GPRSIM (GOODMAN, 1994, 2018), de uso comercial e que se baseia nas teorias eletromagnética e sísmica; gprMax (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016), de uso livre e que se baseia na teoria eletromagnética e no método FDTD e REFLEXW (SANDMEIER, 2017), de uso comercial, utilizado para processamento e análise de dados de campo e que possui um módulo para simulação que se baseia na teoria eletromagnética e no método FDTD.

### **2.4. SISTEMAS GPR**

#### **2.4.1. Componentes de um sistema GPR**

A composição básica de uma unidade de sistema GPR sofre pequenas variações conforme a fonte consultada, mas é consenso que o sistema básico consiste em:

- unidade de transmissão e recepção, para geração do sinal transmitido e recepção do sinal refletido, que conta também com um



dispositivo temporizador para sincronização do transmissor e receptor;

- unidade de controle, que é a interface do usuário e dá a ele o controle global da operação e permite-lhe acompanhar o levantamento por meio de uma tela.
- unidade para armazenamento dos dados levantados.

Unidades de sistema GPR para aplicações em pavimentos devem contar com dispositivos de medição de distâncias percorridas, garantindo que o sistema faça registros em intervalos constantes de distância – para evitar que o levantamento seja influenciado por alterações de velocidade – e serem compatíveis com sistemas GPS, para garantir o correto georreferenciamento dos levantamentos e o deslocamento retilíneo do equipamento. A Figura 2.7 ilustra um exemplo de veículo equipado com sistema GPR para aplicações em pavimentos:

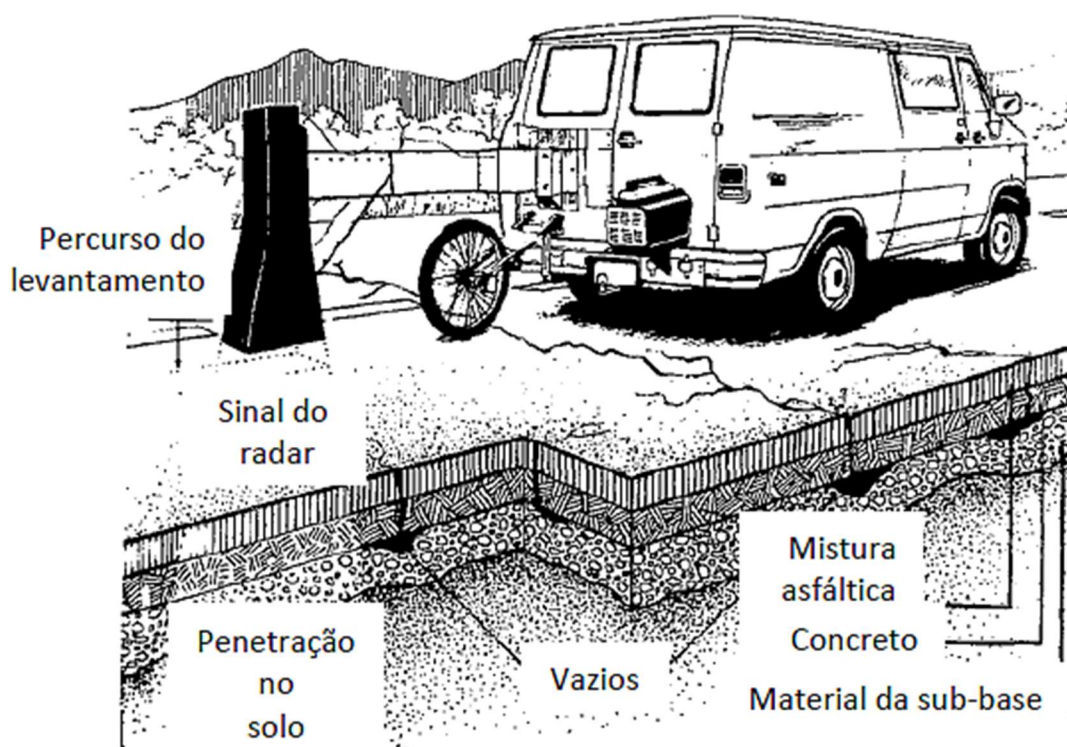
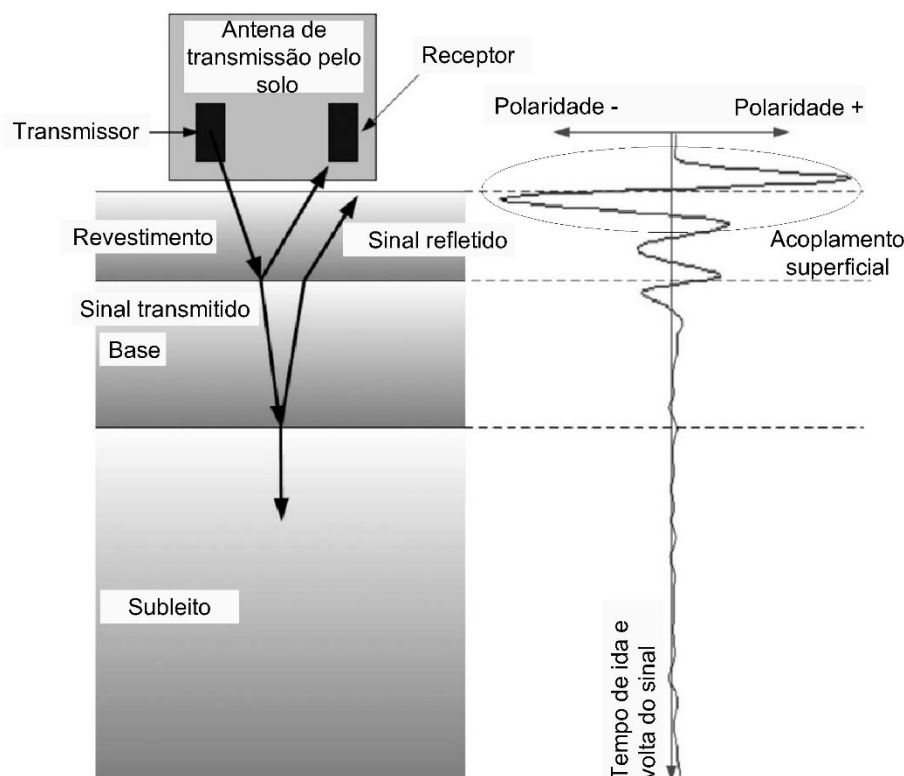


Figura 2.7 – Exemplo de veículo equipado com sistema GPR para aplicações em pavimentos. Fonte: adaptado de Morey (1998b).

### 2.4.2. Sistemas de transmissão pelo solo (*ground-coupled systems*)

Sistemas de transmissão pelo solo trabalham com antenas em contato direto com a superfície do pavimento ou suspensas a uma pequena distância. Caso não haja contato direto, a distância em relação à superfície do pavimento deve ser mantida constante porque o acoplamento muda em função da distância. A Figura 2.8 ilustra esquematicamente um sistema de transmissão pelo solo:



**Figura 2.8 – Ilustração esquemática de um sistema de transmissão pelo solo. Fonte: adaptado de ASTM (2015b).**

As vantagens dos sistemas de transmissão pelo solo em comparação com os de transmissão pelo ar são a maior penetração do sinal e melhor resolução vertical. No entanto, em função da ocorrência de acoplamento superficial (*surface coupling*) – causada pela sobreposição dos sinais transmitidos refletidos na superfície – e da reverberação, é necessário processamento para determinar quando o pulso transmitido atingiu a superfície do pavimento (LENG, 2011; SAARENKETO, 2009).

### 2.4.3. Construção de imagens com o GPR

Os perfis obtidos com o GPR não são imagens propriamente ditas da subsuperfície e sim registros temporais das respostas dos materiais à propagação de pulsos 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. A Figura 2.9 ilustra esquematicamente um traço típico do GPR:

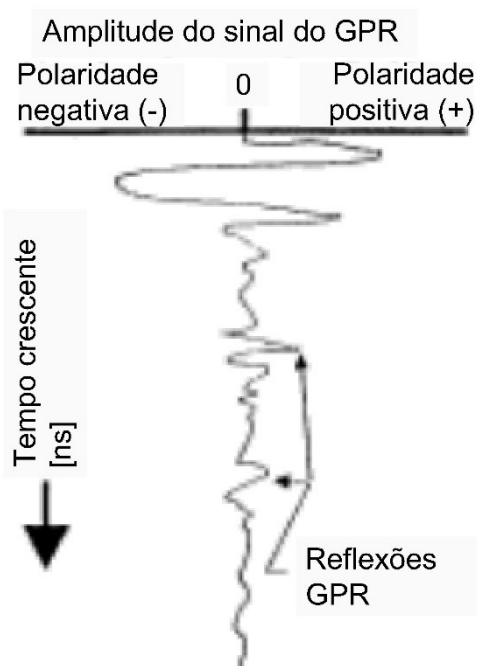
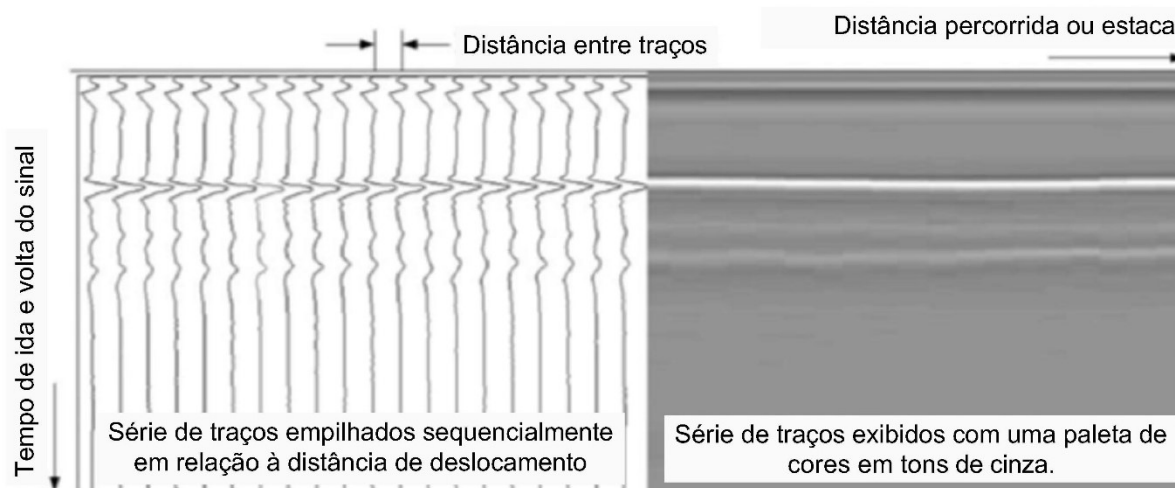


Figura 2.9 – Ilustração esquemática de um traço típico do GPR. Fonte: adaptado de ASTM (2011).

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*. Na Figura 2.10 aplica-se aos traços

dispostos uma paleta de tons de cinza, que atribui o preto à amplitude mínima; branco à amplitude máxima e diferentes tons de cinza aos valores intermediários.



**Figura 2.10 – Exemplo de uma série de traços do GPR empilhados. Fonte: adaptado de ASTM (2015b).**

Finalmente, a coleta de dados ao longo de linhas paralelas e malhas quadradas ou retangulares permite a elaboração de modelos tridimensionais das estruturas levantadas, a partir dos quais é possível elaborar imagens da amplitude em função do tempo (*time slices*) ou da profundidade (*depth slices*), também denominadas *C-scans*, que permitem a visualização no plano horizontal de ocorrências na estrutura do pavimento. A Figura 2.11 demonstra um exemplo de avaliação da condição do pavimento de uma pista de aeroporto finlandesa, no qual *time slices* obtidas a partir de modelos tridimensionais apresentam diferentes tipos de defeitos (SAARENKETO, 2006):

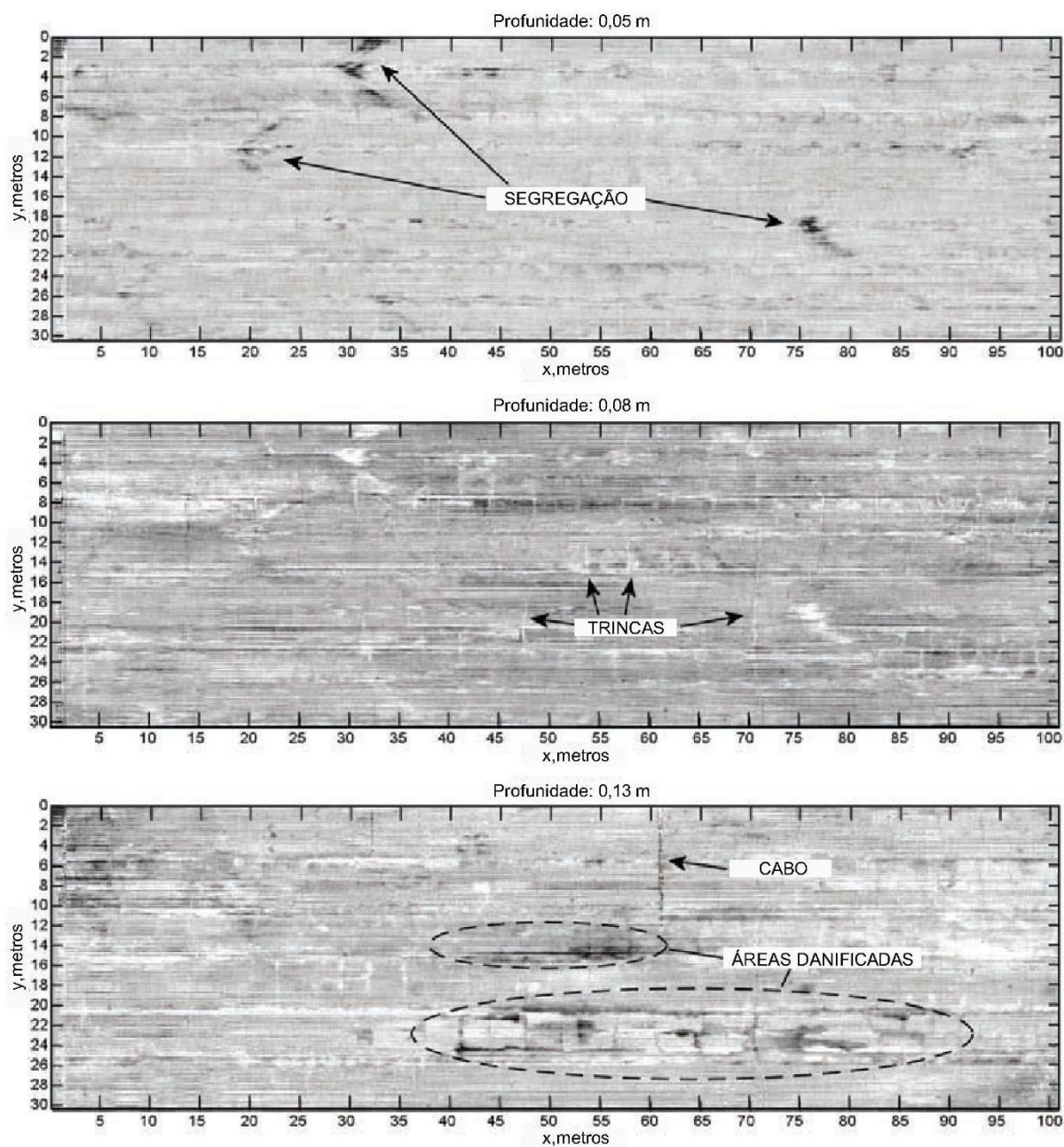


Figura 2.11 – Exemplos de *time slices* de três camadas asfálticas de uma pista de aeroporto finlandesa. Fonte: adaptado de Saarenketo (2006).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. CONCEPÇÃO DO EXPERIMENTO

Este trabalho é um estudo de caso aplicado que, conforme declarado em 1.2, tem por objetivo avaliar a sensibilidade do GPR às variações na granulometria e na massa específica aparente de misturas de britas graduadas utilizadas em camadas de pavimentos.

A fim de alcançar este objetivo optou-se por comparar dois tipos de misturas de britas graduadas: uma de graduação densa e uma de graduação aberta. Bernucci *et al.* (2008, p. 122) definem o agregado de graduação densa como “aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima” e agregado de graduação aberta como “aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores”.

Como referência para a mistura de graduação densa escolheu-se uma BGS da Faixa B da especificação 141/2010 – ES (DNIT, 2010) e como referência 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 Tabela 3.1 e na Figura 3.1:

Tabela 3.1 – Faixas granulométricas de referência. Fonte: DER/SP (2005) e DNIT (2010).

Abertura nominal das peneiras			Material passante			
[mm]	["]	nº	DNIT Faixa B		DER/SP Faixa drenante	
50	2	-	100%	100%	-	-
37,5	1,5	-	-	-	100%	100%
25	1	-	75%	90%	90%	100%
19	0,75	-	-	-	75%	99%
9,5	0,375	-	40%	75%	45%	64%
4,75	0,187	4	30%	60%	30%	45%
2,36	0,0937	8	-	-	-	-
2	0,0789	10	20%	45%	18%	33%
1,18	0,0469	16	-	-	-	-
0,6	0,0234	30	-	-	-	-
0,425	0,0168	40	15%	30%	7%	17%
0,3	0,0117	50	-	-	-	-
0,18	0,0071	80	-	-	1%	11%

Continuação - Tabela 3.1 – Faixas granulométricas de referência. Fonte: DER/SP (2005) e DNIT (2010).

Abertura nominal das peneiras			Material passante			
			DNIT Faixa B		DER/SP Faixa drenante	
[mm]	["]	nº				
0,15	0,0059	100	-	-	-	-
0,075	0,0029	200	5%	15%	0%	8%

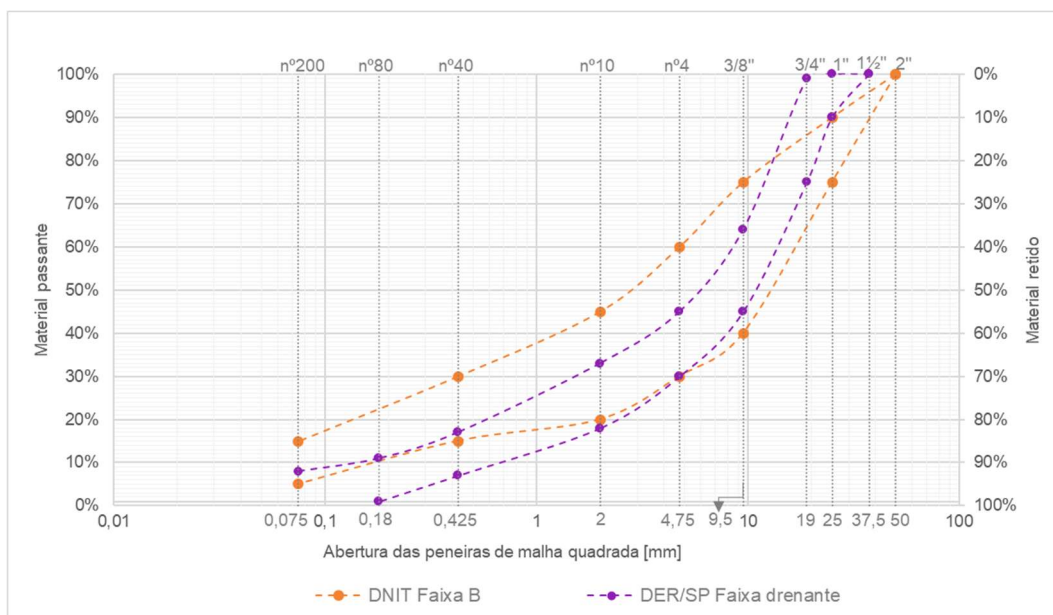


Figura 3.1 – Faixas granulométricas de referência. Fonte: DER/SP (2005) e DNIT (2010).

Para avaliar a sensibilidade às variações na massa específica aparente concebeu-se um experimento no qual os dois tipos de mistura foram compactados em uma caixa de madeira, apresentada na Figura 3.2, com o uso de martelo vibratório e placa compactadora e utilizando 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 que os valores de  $\epsilon$  fossem relacionados aos valores de massa específica aparente seca ( $\gamma_s$ ).



**Figura 3.2 – Caixa utilizada na avaliação da sensibilidade às variações da massa específica aparente.**

Paralelamente, como apoio e validação, utilizaram-se as técnicas de modelagem descritas em 2.3 para simular o experimento descrito acima. Empregou-se o modelo expresso pela Equação 15 para calcular os valores teóricos de permissividade dielétrica ( $\epsilon_{\text{teórica}}$ )<sup>7</sup> que foram utilizados na modelagem da aquisição dos dados com o GPR, para a qual optou-se pelo gprMax.

Serão detalhados a seguir os materiais e métodos utilizados para realizar os experimentos, cálculos e simulações descritos acima.

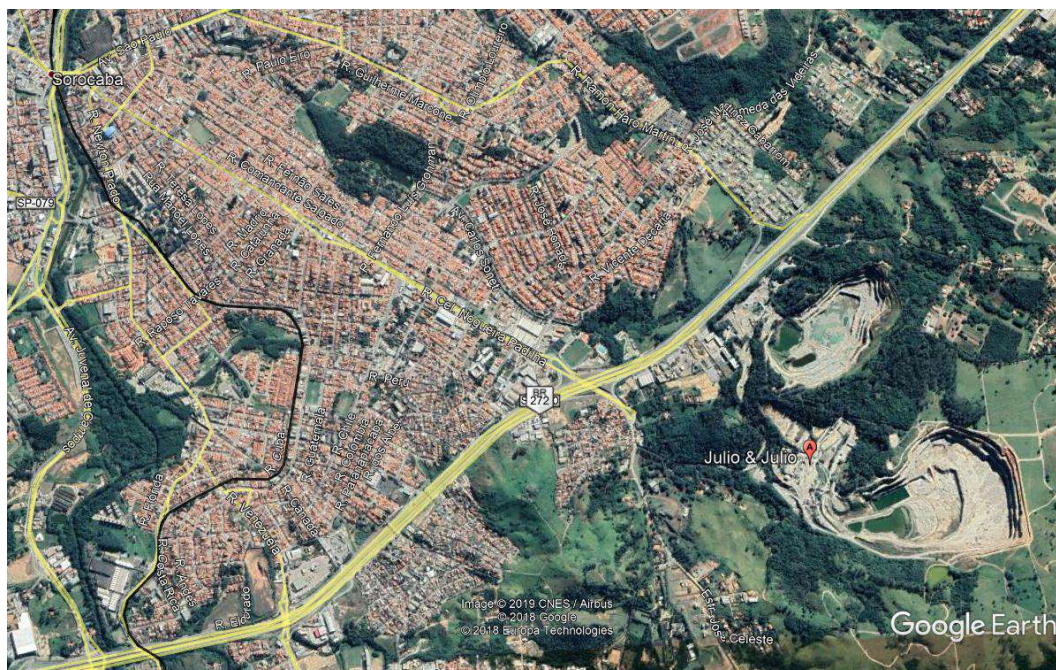
## **3.2. MATERIAL GRANULAR**

### **3.2.1. Origem dos materiais**

As quatro amostras de agregados utilizados nesta pesquisa, denominadas Material 1; Material 2; Material 3 e Material 4, foram fornecidas pela Pedreira Julio & Julio, situada no município de Sorocaba (como pode ser observado na Figura 3.3), região sudoeste do Estado de São Paulo. A unidade de mineração de agregados está instalada em um afloramento do Maciço Granítico Sorocaba (LUQUE, 2015), ilustrado pela Figura 3.4:

<sup>7</sup> Deste ponto em diante optou-se por referir ao valor obtido pela Equação 15 como  $\epsilon_{\text{teórica}}$  para evitar o risco de confusão com  $\epsilon$ .





**Figura 3.3 – Localização da pedreira em relação ao espaço urbano de Sorocaba e à rodovia BR-272/SP-270. Fonte: Google Earth (2019).**



**Figura 3.4 – Afloramento granítico do qual se originaram as amostras utilizadas nesta pesquisa. Fonte: adaptado de Luque (2015).**

### **3.2.2. Ensaio de caracterização**

#### **3.2.2.1. Análises granulométricas**

A análise granulométrica do Material 1; Material 2; Material 3 e Material 4 foi executada conforme método prescrito pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). As amostras foram secas em estufa e, após esfriarem ao ar, foram colocadas na peneira de maior abertura do conjunto, já fixado no agitador mecânico. O conjunto utilizado foi composto pelas peneiras de abertura 50 mm; 37,5 mm; 25 mm; 19 mm; 9,5 mm e pelas peneiras nº 4; nº 10; nº 40; nº 80 e nº 200. Após testes preliminares padronizou-se o tempo de agitação do conjunto de peneiras em 10 minutos.

### 3.2.2.2. Determinação das massas específicas ( $\gamma_d$ ) do agregado graúdo e miúdo e das misturas

A porosidade efetiva ( $N_e$ ), definida como “uma indicação da quantidade de água que realmente pode ser drenada do material saturado” (SUZUKI; MARTINS; KABBACH JÚNIOR, 2013) e a saturação ( $S$ ), definida como uma “medida da quantidade de água existente num solo ou material granular” (SUZUKI; MARTINS; KABBACH JÚNIOR, 2013), são alguns dos dados de entrada do modelo representado pela Equação 15 e são expressas, respectivamente, pela Equação 19 e pela Equação 20:

$$N_e = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_h \times \gamma_d} \times (1 + \gamma_d \times h) \quad (19)$$

$$S = \frac{N - (N_e \times U)}{N} \quad (20)^8$$

Em que:

$\gamma_s$  = massa específica aparente seca [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

$\gamma_d$  = massa específica dos grãos [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

$\gamma_h = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ , é massa específica da água;

h: teor de umidade [%];

N: porosidade [%];

U: porcentagem de drenagem = 50%.

N, por sua vez, é expresso pela Equação (21):

$$N = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \quad (21)$$

Os valores de  $\gamma_d$  que são dados de entrada na Equação 19 e na Equação 21 são características das misturas. Para calculá-los foi necessário conhecer os valores de  $\gamma_d$  dos grãos de agregado que compuseram as misturas. A determinação

---

<sup>8</sup> A Equação 20 foi deduzida a partir de equações para o cálculo de volume de água remanescente e saturação apresentadas por Suzuki; Martins; Kabbach Júnior (2013, p. 86-87).

de  $\gamma_d$  dos agregados graúdos foi executada por fração, para a condição seca, conforme método prescrito pelo ME 195/97 (DNER, 1997). A determinação de  $\gamma_d$  dos agregados miúdos foi executada conforme método prescrito pela ME 194/98 (DNER, 1998), também por fração e para a condição seca.

Após a definição de curvas granulométricas que se enquadravam nas faixas apresentadas em 3.1 e dos valores de  $\gamma_d$  de cada fração, os valores de  $\gamma_d$  de das misturas foram calculados por meio da Equação 22 (DNER, 1997):

$$\gamma_d = \frac{1}{\frac{P_1}{\gamma_{d1}} + \frac{P_2}{\gamma_{d2}} + \dots + \frac{P_n}{\gamma_{dn}}} \times 100 \quad (22)$$

Em que:

$P_1, P_2, \dots, P_n$ : porcentagens retidas individuais, em massa, das frações granulométricas nas misturas;

$\gamma_{d1}, \gamma_{d2}, \dots, \gamma_{dn}$ : valores de massa específica dos agregados [g/cm<sup>3</sup>].

### 3.2.2.3. Determinação da umidade ótima ( $h_{ót.}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{smáx}$ )

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).

## 3.3. MODELAGEM NUMÉRICA

### 3.3.1. Cálculo das permissividades dielétricas teóricas ( $\epsilon_{teórica}$ )

Conforme descrito em 3.1, utilizou-se o modelo expresso pela Equação 15, reproduzida abaixo, para calcular os valores de  $\epsilon_{teórica}$ <sup>9</sup>, que serviriam como dados de entrada nos modelos que simularam a propagação do sinal do GPR:

$$\epsilon_{teórica} = \left[ (N_e S \sqrt{\epsilon_{água}}) + \left( (1 - N_e) \sqrt{\epsilon_{agreg.}} \right) + (N_e (1 - S) \sqrt{\epsilon_{el}}) \right]^2 \quad (15)$$

<sup>9</sup> Deste ponto em diante optou-se por referir ao valor obtido pela Equação 15 como  $\epsilon_{teórica}$  para evitar o risco de confusão com  $\epsilon$ .

Os valores de  $N$  e  $S_e$  foram calculados conforme descrito em 3.2.2.2. Adotaram-se os seguintes valores para as permissividades de cada fração:  $\epsilon_{el} = 1$ ;  $\epsilon_{\text{água}} = 81$ , em concordância com a Tabela 2.1 e a Tabela 2.2, e  $\epsilon_{\text{agreg.}} = 5$ , menor valor para granito apresentado por Porsani (1999, p. 30).

A fim de estabelecer curvas de referência foram calculados valores de  $\epsilon_{\text{teórica}}$  para as seguintes condições: para avaliação da sensibilidade à variação na massa específica aparente, GC = 50%; 60%; 70%, 80%; 90%; 95%; 96%; 97%; 98%; 99% e 100%.

### 3.4. Simulação da propagação do sinal do GPR

Para a simulação do experimento utilizou-se o programa de uso livre gprMax (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016). Como exposto em 2.3.4, o programa baseia-se na teoria eletromagnética e no método FDTD e, assim sendo, o modelo criado deveria conter informações sobre as propriedades eletromagnéticas dos materiais empregados; sobre as discretizações espacial e temporal e deveria se levar em consideração as condições de fronteiras de absorção.

As propriedades eletromagnéticas dos materiais empregados, cujos valores são compatíveis com os encontrados na literatura citada ao longo deste trabalho, são apresentados na Tabela 3.2:

**Tabela 3.2 – Parâmetros constitutivos dos materiais das camadas.**

<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math> (adimensional)</b>	<b><math>\sigma</math> [S/m]</b>	<b><math>\mu_r</math> (adimensional)</b>
Concreto	6,0	$1 \times 10^{-6}$	1
Madeira	2,2	$1 \times 10^{-6}$	1
Material granular	$\epsilon_{\text{teórica}}$	$1 \times 10^{-6}$	1

As propriedades eletromagnéticas do espaço livre são predefinidas no gprMax e não podem ser alteradas:  $\epsilon = 1$ ;  $\sigma = 0$  S/m (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016). Consideraram-se os diferentes materiais como homogêneos, isotrópicos e lineares – condição para  $\epsilon$  constante – e as propriedades eletromagnéticas independentes da frequência.

Para a discretização espacial adotou-se o critério de que os passos deveriam ser pelo menos dez vezes menores do que o menor comprimento de onda do campo eletromagnético propagado ( $\lambda_{\min.}$ ) (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016). Os passos de discretização espacial são expressos pela Equação 23:

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \frac{\lambda_{\min.}}{10} \quad (23)$$

Em que:

$\lambda_{\min.}$ : menor comprimento de onda do campo eletromagnético propagado [m].

O  $\lambda_{\min.}$  corresponde à frequência máxima ( $f_{\max.}$ ), relação expressa pela Equação 24:

$$\lambda_{\min.} = \frac{c}{f_{\max.} \sqrt{\varepsilon_{teórica}}} \quad (24)$$

Em que:

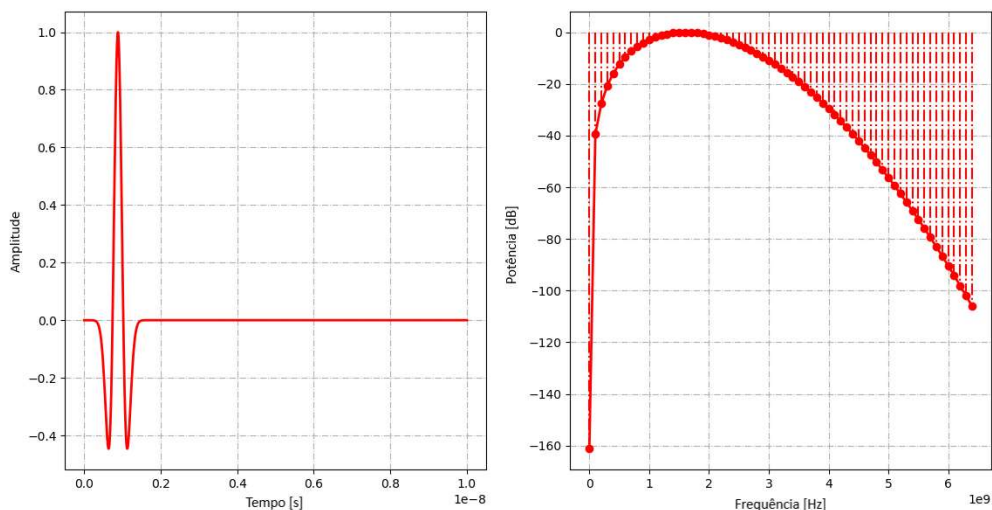
$f_{\max.}$ : frequência máxima do campo eletromagnético propagado [MHz].

Quanto à discretização temporal, uma vez que o gprMax calcula automaticamente o valor de  $\Delta t$  (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016), não foi necessário informá-lo e o próprio programa garantiu a satisfação da condição de estabilidade discutida em 2.3.3.

O programa dá suporte à geração de modelos 3D, mas em função da capacidade e do tempo de processamento requeridos e uma vez que as características dos materiais foram consideradas constantes em todas as dimensões, optou-se por gerar modelos 2D dos experimentos. Os modelos 2D foram obtidos ao adotar-se um domínio computacional que, na dimensão considerada constante, tivesse o tamanho de uma única célula, definida como o elemento de discretização.

Modelou-se, para fins de simplificação, Tx como uma fonte linear (dipolo), não blindada. Utilizou-se para Tx o valor de frequência central ( $f_c$ ) = 1,6 GHz e

separação biestática<sup>10</sup> de 58 mm, características do equipamento utilizado na aquisição dos dados. Adotou-se a forma de onda denominada Ricker (ver Figura 3.5) – que é a segunda derivada normalizada negativa de uma função gaussiana.



**Figura 3.5 – Onda Ricker: sinal no domínio do tempo e espectro de frequência para  $f_c = 1,6$  GHz.**

É necessário também definir os parâmetros de aquisição de dados: janela temporal (*time window* –  $W$ ) e intervalo de amostragem espacial (*spatial sampling interval* –  $\Delta l$ ), descritos a seguir:

Janela temporal é o intervalo de tempo dentro do qual o sinal gerado é transmitido, refletido e recepcionado, ou seja, é o tempo de duração do traço e relaciona-se diretamente com a profundidade de investigação. Annan (2001) sugere que a janela temporal seja calculada pela Equação 25, levando em consideração a maior velocidade prevista e a máxima profundidade investigada. Observa-se que a Equação 25 relaciona-se com a Equação 9 e a Equação 10, com um acréscimo de 30% no valor de  $T$ .

$$W = 1,3 \frac{2d}{v} \quad (25)$$

Em que:

$W$ : janela temporal [ns];

<sup>10</sup> Separação biestática é a distância entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx). No caso específico do equipamento utilizado este valor é fixo.

Segundo Annan (2001) o intervalo de amostragem espacial (*spatial sampling interval*), utilizado na formação dos *B-scans*, é intimamente relacionado à frequência central da antena utilizada e às propriedades dielétricas do material de interesse. O critério proposto por Nyquist (ANNAN, 2001) é que o intervalo de amostragem espacial seja 1/4 do comprimento de onda no material de interesse, conforme expresso pela Equação 26:

$$\Delta l = \frac{c}{4fc\sqrt{\varepsilon}} = \frac{75}{fc\sqrt{\varepsilon}} \quad (26)$$

Em que:

$\Delta l$ : intervalo de amostragem espacial [m];

$f_c$ : frequência central [MHz];

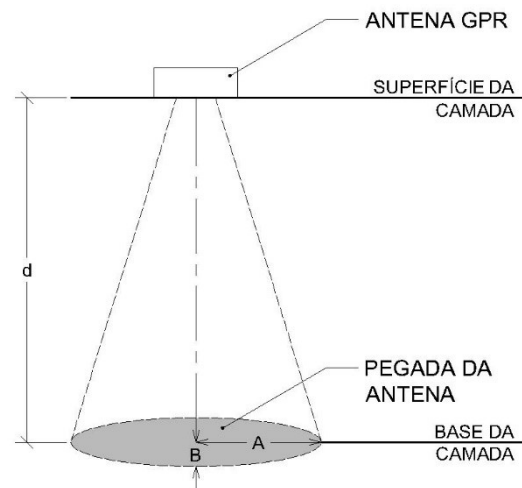
### 3.5. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E FERRAMENTAS DE APOIO

#### 3.5.1. Caixa para avaliação da sensibilidade do GPR a variações na massa específica aparente

Conforme descrito em 3.1, a aquisição de dados para a avaliação da sensibilidade do GPR às variações na massa específica aparente foi feita em uma caixa de madeira confeccionada para este fim. A primeira dimensão a ser definida foi a altura interna da caixa, 150 mm, estabelecida pelo Método de projeto de pavimentos flexíveis (SOUZA, 1981) como espessura mínima para camadas granulares.

As próximas dimensões a serem definidas foram as da base interna da caixa, com base nas seguintes condições: o tamanho da caixa deveria ser tal que permitisse a movimentação da antena em cima do material depositado; permitisse que a autora pudesse manuseá-la com independência e garantisse a aquisição de um número suficiente de traços.

Tendo as condições estabelecidas acima como ponto de partida utilizou-se o conceito de pegada (*footprint*) da antena, que é a área “iluminada” pelo sinal à profundidade de interesse (ANNAN, 2001) (no caso deste trabalho a base da camada granular) como base para o dimensionamento. Para podermos calcular suas dimensões o formato da pegada é simplificado para uma elipse (ANNAN, 2001), como ilustrado pela Figura 3.6. O valor de A é expresso pela Equação 27 e o valor de B pela Equação 29:



**Figura 3.6 – Pegada simplificada da antena. A região hachurada mostra a área iluminada à profundidade d. Fonte: adaptado de Annan (2001).**

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_{teórica} - 1}} \quad (27)$$

Em que:

A: dimensão paralela ao eixo maior da elipse [m];

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

O  $\lambda$  corresponde à  $f_c$ , relação expressa pela Equação 28:

$$\lambda = \frac{c}{f_c \sqrt{\epsilon_{teórica}}} \quad (28)$$

$$B = \frac{A}{2} \quad (29)$$

Em que:

B: dimensão paralela ao eixo menor da elipse [m].

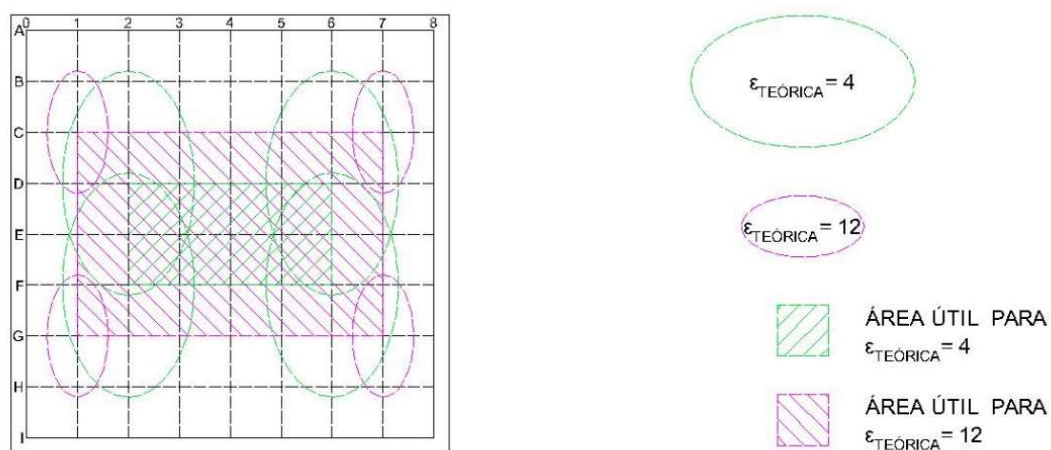
Em seguida calcularam-se os valores de A e B para os valores de  $\epsilon_{teórica}$  iguais a 4 e 12, apresentados na Tabela 3.3:



**Tabela 3.3 – Dimensões calculadas para as pegadas da antena.**

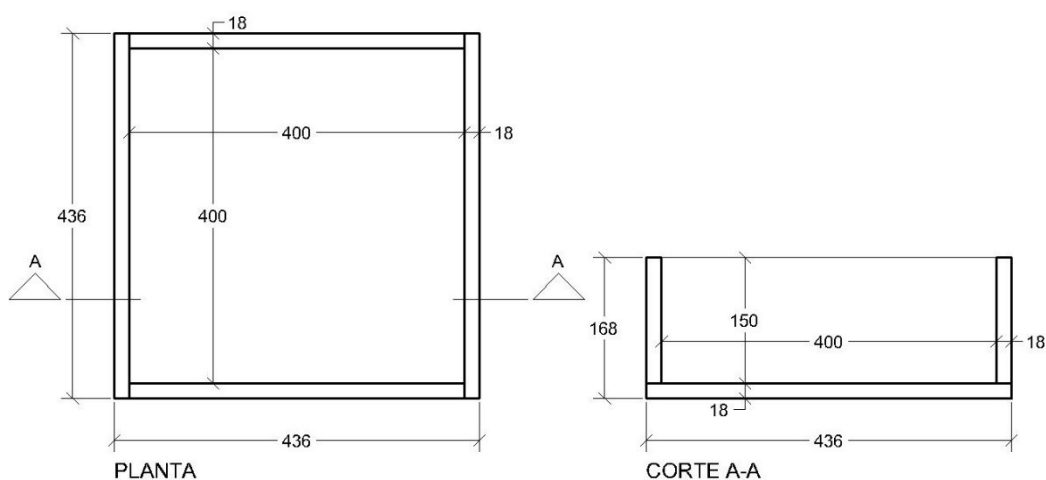
<b><math>\epsilon_{\text{TEÓRICA}}</math> (adimensional)</b>	<b>A [mm]</b>	<b>B [mm]</b>
4	110	55
12	60	30

Posteriormente realizaram-se testes como o apresentado na Figura 3.7, nos quais se justapuseram as elipses com o objetivo de delimitar a área útil para aquisição dos dados.



**Figura 3.7 – Dimensionamento da caixa utilizando pegadas da antena para delimitar a área útil para aquisição dos dados.**

Concluiu-se que uma caixa com dimensões internas da base de 400 × 400 mm atenderia às condições estabelecidas. As dimensões da caixa são apresentadas na Figura 3.8:



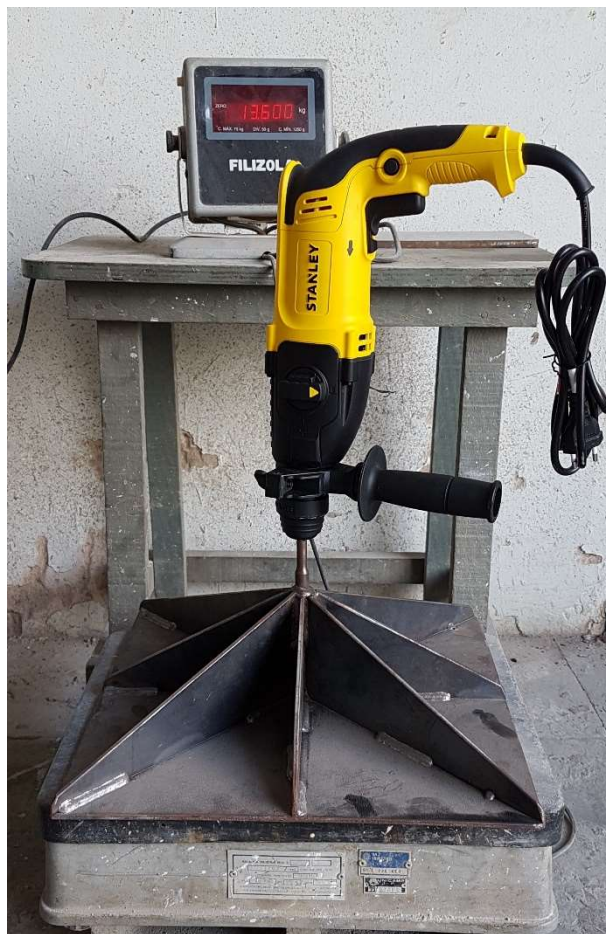
**Figura 3.8 – Croqui com as dimensões da caixa. Dimensões em [mm].**

Confeccionou-se um colarinho para auxiliar no preenchimento da caixa, também em MDF e com as mesmas dimensões internas. O colarinho é mantido imóvel durante o preenchimento e a compactação com o auxílio de 8 anteparos metálicos em forma de L fixados na superfície externa de suas paredes.

### 3.5.2. Martelete e placa compactadora

A compactação dos corpos de prova 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. 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 a autora pudesse executar as compactações com independência.

As dimensões da placa compactadora foram definidas após o dimensionamento da caixa: 394 × 394 mm, com massa de 10,6 kg. Justificam-se as dimensões reduzidas pela necessidade de a placa penetrar no espaço interno da caixa para operação de compactação. O conjunto martelete e placa compactadora é apresentado na Figura 3.9 e placa é apresentada em detalhe na Figura 3.10:



**Figura 3.9 – Conjunto martetele e placa compactadora.**



**Figura 3.10 – Placa compactadora em aço carbono.**

### 3.5.3. Gabarito

Com o objetivo de garantir o espaçamento constante entre as linhas de levantamento e o alinhamento da antena quando da execução do ensaio, confeccionou-se um gabarito em acrílico transparente, com malha de referência composta por linhas espaçadas entre si 50 mm. Após o dimensionamento da caixa definiram-se as dimensões do gabarito em 446 × 446 mm. Justificam-se as dimensões aumentadas pela necessidade de o 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.

A Figura 3.11 apresenta o gabarito posicionado em cima da caixa. É possível visualizar as linhas de referência impressas à laser. As linhas vermelhas evidenciam as bordas do gabarito.



**Figura 3.11 – Gabarito em acrílico transparente confeccionado para garantir o espaçamento constante entre as linhas de levantamento e o alinhamento da antena quando da execução do ensaio.**

### 3.6. SISTEMA GPR

Para a execução dos ensaios foi utilizada a antena blindada modelo 5100, de transmissão pelo solo, com  $f_c = 1,6$  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 3.12:



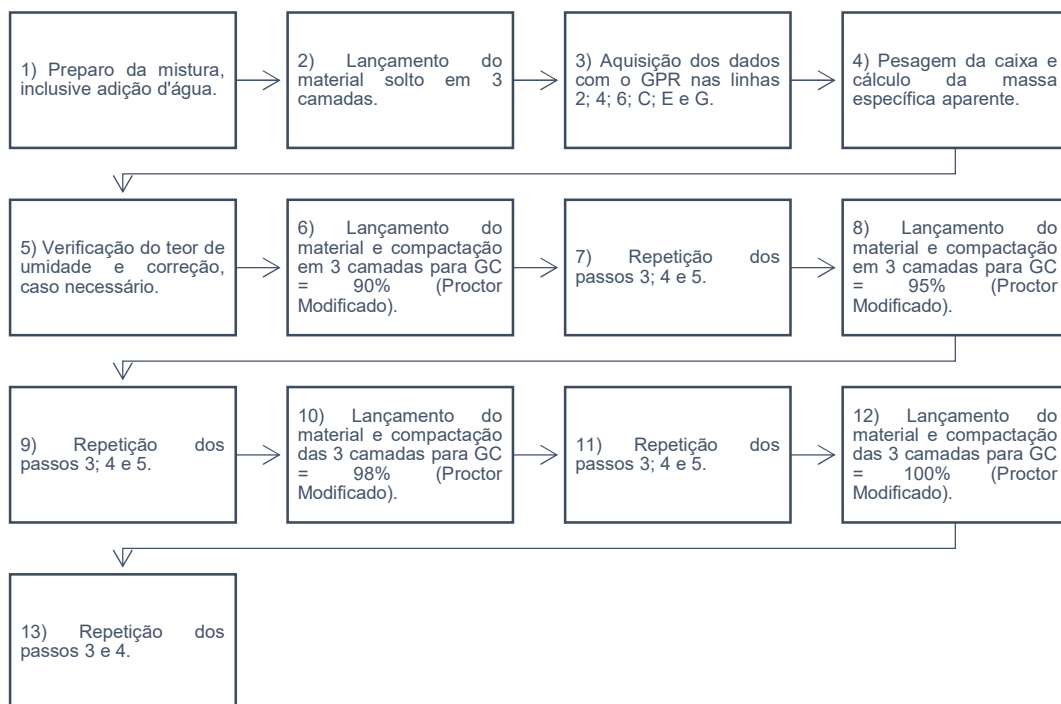
Figura 3.12 – À esquerda, o sistema SIR-3000; à direita, antena modelo 5100 fixada em um “mini-carro” (*minicart*); ao fundo, caixa de controle da antena.

### 3.7. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS

Utilizou-se o conjunto de configurações pré-definidas denominado pelo fabricante como *1500/1600 BlueCart*, salvo os parâmetros *RANGE*, para o qual se utilizou o valor calculado de  $W$ ; *DIEL*, que é o valor de permissividade utilizado como referência para a aquisição dos dados, para o qual adotou-se  $\epsilon = 10$  e *SCANS PER UNIT*, calculado a partir de  $\Delta l$ .

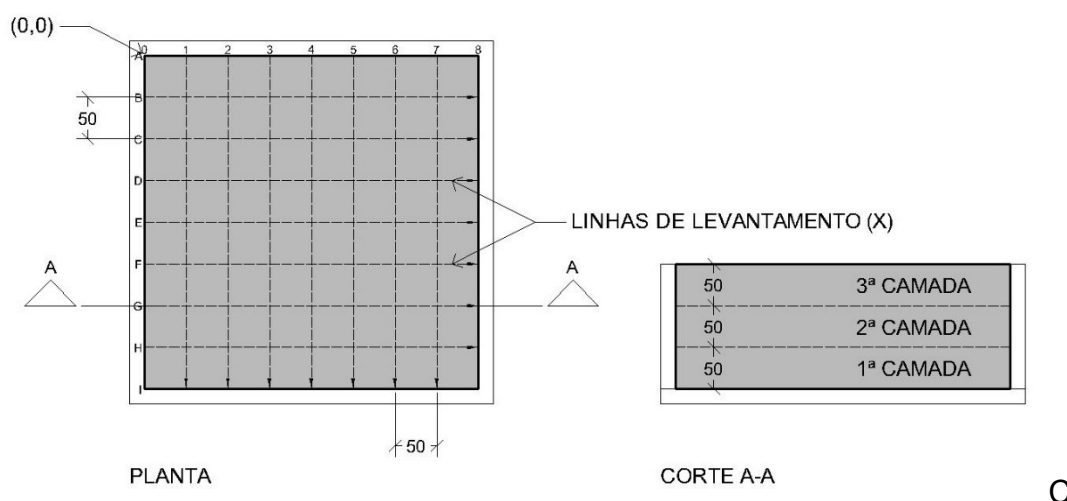
### 3.8. PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS

O procedimento utilizado na aquisição dos dados para avaliação da sensibilidade à variação na massa específica aparente consistiu em um ciclo composto pelos seguintes passos: preparo das mistura; lançamento e compactação da mistura na caixa (salvo quando o material foi avaliado na condição solta); aquisição dos dados com o GPR; pesagem da caixa e cálculo da massa específica aparente; verificação e correção do teor de umidade para repetição do ciclo. A Figura 3.13 apresenta o procedimento completo:



**Figura 3.13 – Procedimento de aquisição dos dados para avaliação da sensibilidade à variação na massa específica.**

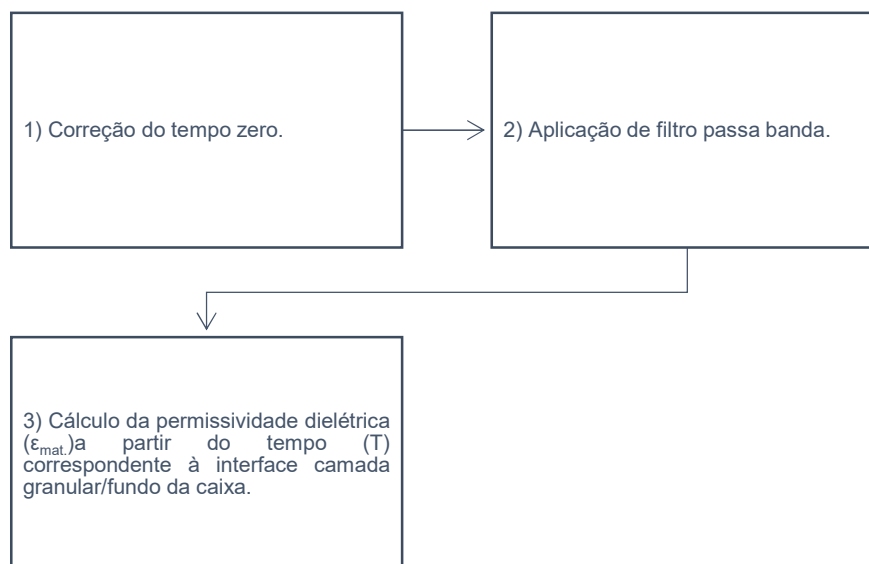
As linhas de levantamento e as espessuras das camadas são apresentadas na Figura 3.14:



**Figura 3.14 – Detalhe das linhas de levantamento e espessura das camadas. Dimensões em [mm].**

### 3.9. PROCESSAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS COM O GPR

Os dados adquiridos com o GPR foram processado por meio do programa REFLEXW (SANDMEIER, 2017), utilizando o procedimento apresentado na Figura 3.15:



**Figura 3.15 – Procedimento de processamento dos dados adquiridos com o GPR.**

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 este ponto no traço dá-se o nome de tempo zero ( $T_0$ ) e sua correção é uma operação que ajusta tal posição. É necessário corrigir todos traços que formam o radargramas antes que outros métodos de processamento sejam aplicados (JOL, 2009). O critério adotado para a correção de  $T_0$  foi cortar os traços no primeiro pico positivo.

O filtro passa-banda é um filtro de frequência que combina outros dois: o filtro passa-baixa e o filtro passa-alta. Define-se a faixa de frequência desejada para os dados, sendo os demais, com frequências inferiores ou superiores aos limites da faixa, removidos (JOL, 2009). Os limites da faixa de frequência foram definidos a partir da frequência central da antena utilizada,  $f_c = 1,6$  GHz:

- Frequência inferior de corte:  $0,1 \times f_c = 0,16$  GHz;
- Frequência inferior do platô:  $0,3 \times f_c = 0,48$  GHz;
- Frequência superior do platô:  $1,2 \times f_c = 1,92$  GHz;
- Frequência superior de corte:  $1,6 \times f_c = 2,56$  GHz.

Para o cálculo de  $\varepsilon_{\text{mat.}}$  a partir de T utilizou-se as Equações 10 e 11, considerando-se como valor de d a espessura da camada granular, igual a 150 mm.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. MATERIAL GRANULAR

#### 4.1.1. Ensaio de caracterização

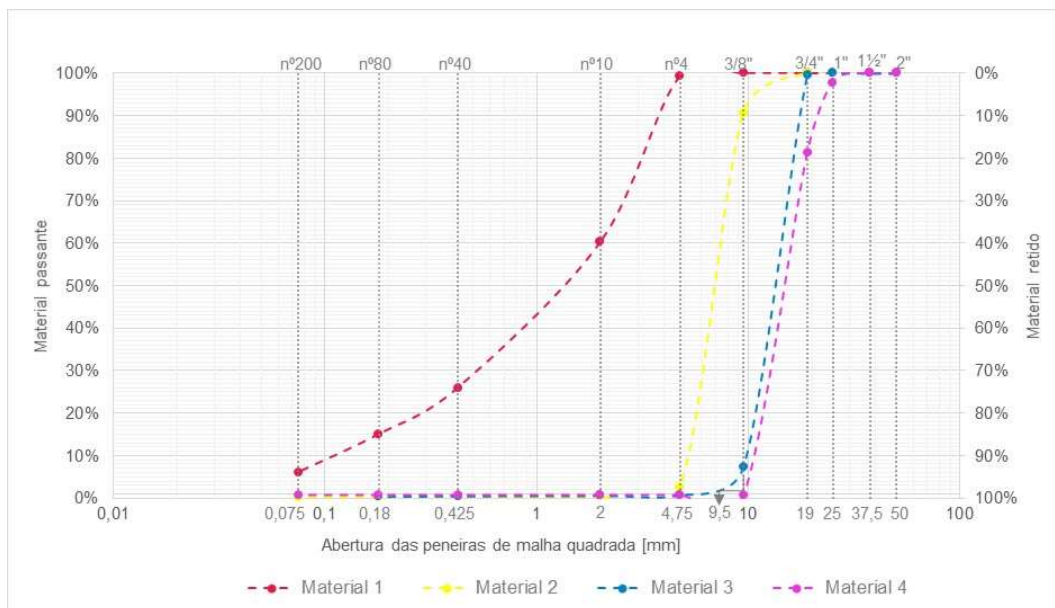
##### 4.1.1.1. Análises granulométricas

As distribuições granulométricas, determinadas por meio do método descrito em 3.2.2.1, serão apresentadas na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Distribuição granulométrica dos materiais.

Abertura nominal das peneiras			Material passante			
[mm]	["]	nº	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
50	2	-	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
37,5	1,5	-	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
25	1	-	100,0%	100,0%	100,0%	97,8%
19	0,75	-	100,0%	100,0%	99,6%	81,2%
9,5	0,375	-	100,0%	90,7%	7,4%	0,7%
4,75	0,187	4	99,2%	2,6%	0,7%	0,7%
2,36	0,0937	8	-	-	-	-
2	0,0789	10	60,2%	0,4%	0,6%	0,7%
1,18	0,0469	16	-	-	-	-
0,6	0,0234	30	-	-	-	-
0,425	0,0168	40	26,0%	0,3%	0,5%	0,7%
0,3	0,0117	50	-	-	-	-
0,18	0,0071	80	15,0%	0,3%	0,3%	0,7%
0,15	0,0059	100	-	-	-	-
0,075	0,0029	200	6,1%	0,2%	0,3%	0,7%

Ao analisar a Tabela 4.1 e a Figura 4.1 observa-se que o Material 1 é composto por apenas 6,1% de grãos com diâmetro inferior a 0,075 mm. Já os Materiais 2, 3 e 4 são compostos por menos de 1% de grãos com diâmetro inferior a 0,075 mm. Observa-se também que apenas 2,2% dos grãos do Material 4 tem diâmetro superior a 25 mm e inferior a 50 mm. Em função das distribuições granulométricas dos diferentes materiais não foi possível dosar duas misturas que se enquadrassem nas faixas de referência. A solução adotada foi fracionar os quatro materiais (Figura 4.2) com o auxílio de um agitador mecânico de peneiras e compor manualmente duas misturas que correspondessem às curvas médias das faixas.



**Figura 4.1 – Distribuição granulométrica dos materiais.**



**Figura 4.2 – Amostras de material fracionado com auxílio de um agitador mecânico de peneiras.**

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 Tabela 4.2; Figura 4.3 e Figura 4.4:

Tabela 4.2 – Curvas granulométricas compostas para a BGS e Mistura Drenante.

Abertura nominal das peneiras			BGS	MD
[mm]	["]	nº		
50	2		100,0%	
37,5	1,5			100,0%
25	1		100,0%	100,0%
19	0,75		75,0%	87,0%
9,5	0,375		57,5%	54,5%
4,75	0,187	4	45,0%	37,5%
2,36	0,0937	8		
2	0,0789	10	32,5%	25,5%
1,18	0,0469	16		
0,6	0,0234	30		
0,425	0,0168	40	22,5%	12,0%
0,3	0,0117	50		
0,18	0,0071	80		6,0%
0,15	0,0059	100		
0,075	0,0029	200	8,7%	4,0%

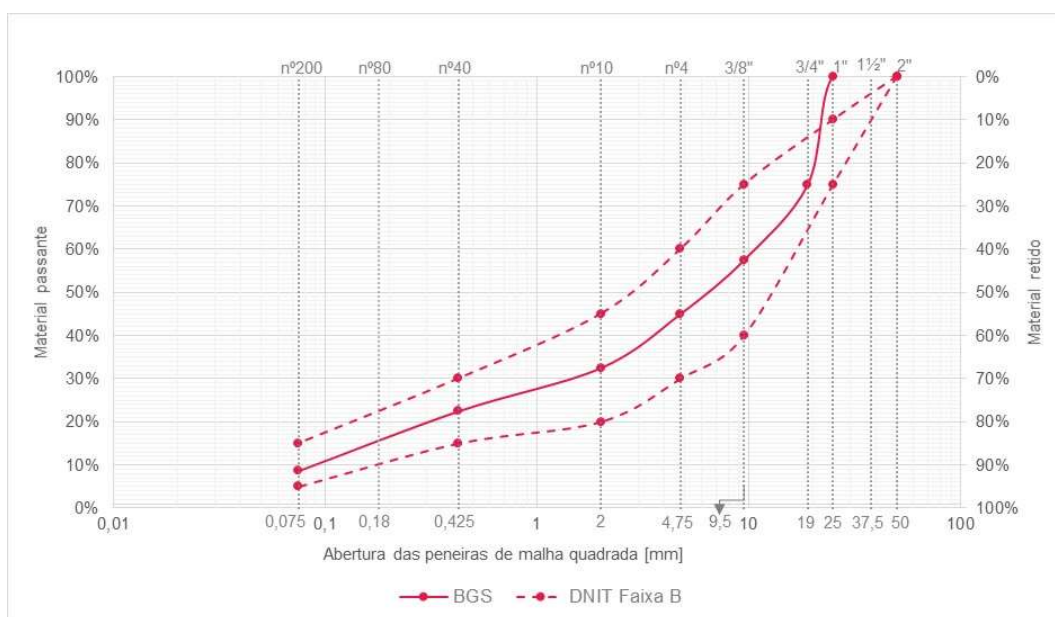
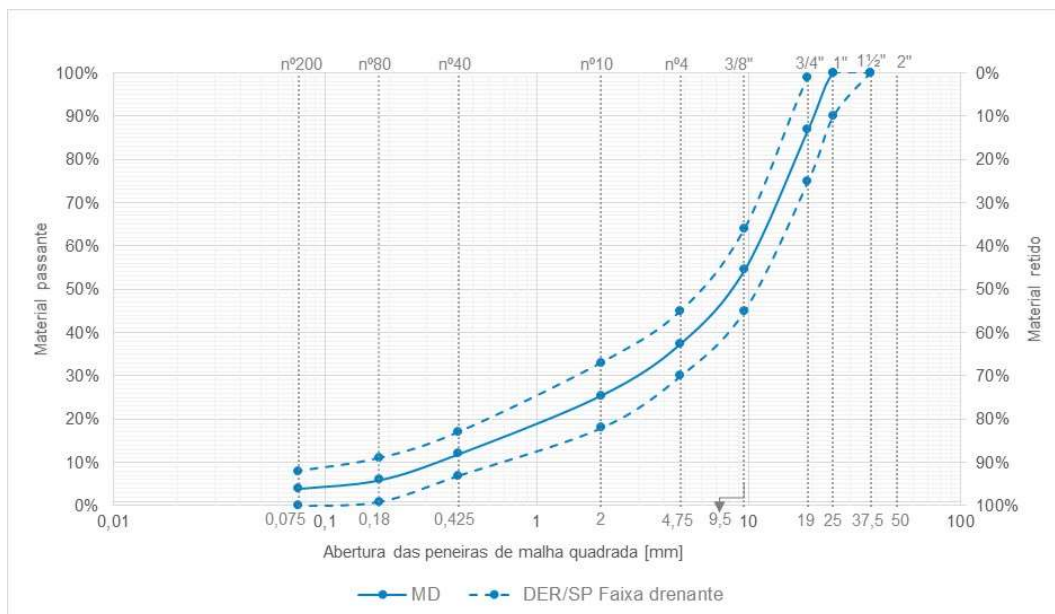


Figura 4.3 – Curva granulométrica composta para a BGS.



**Figura 4.4 – Curva granulométrica composta para o Mistura Drenante.**

Em consequência da distribuição granulométrica dos materiais descrita acima, a curva composta para a BGS ultrapassou o limite superior da faixa de referência a partir do trecho entre os pontos que correspondem aos grãos com diâmetros iguais a 19 mm e 25 mm até o ponto que corresponde aos grãos com diâmetros iguais a 37,5 mm e ficou abaixo da curva média no trecho entre os pontos que correspondem aos grãos com diâmetros iguais a 0,075 mm e 0,18 mm, aproximadamente. O Mistura Drenante, por sua vez, tangenciou o limite superior da faixa de referência no ponto que corresponde aos grãos com diâmetro igual a 25 mm. Nos demais pontos ambas as curvas corresponderam às curvas médias das faixas de referência. Uma comparação entre as curvas é apresentada na Figura 4.5:

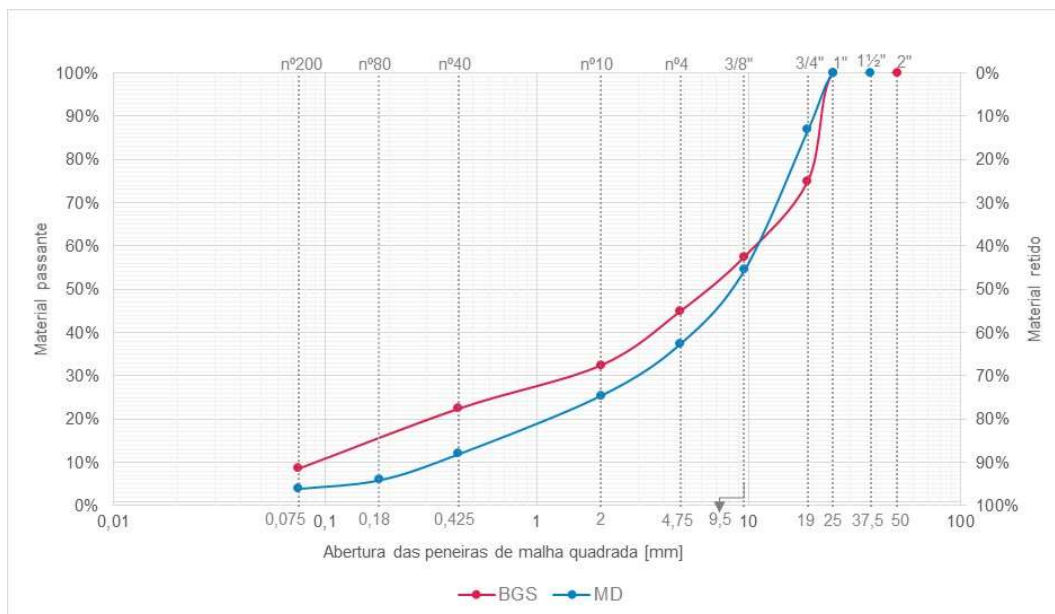


Figura 4.5 – Comparação das curvas compostas para BGS e para o Mistura Drenante.

#### 4.1.1.2. Determinação das massas específicas ( $\gamma_d$ ) do agregado graúdo e miúdo e das misturas

Os valores de  $\gamma_d$  dos agregados graúdos e miúdos, determinados por meio do método descrito em 3.2.2.2, são apresentados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Valores obtidos de  $\gamma_d$  para os agregados graúdos e miúdos.

Abertura nominal das peneiras			$\gamma_d$ -média [g/cm <sup>3</sup> ]
[mm]	["]	nº	
19	0,75	-	2,642
9,5	0,375	-	2,613
4,75	0,187	4	2,593
2	0,0789	10	2,625
0,425	0,0168	40	2,639
0,18	0,0071	80	2,625
0,075	0,0029	200	2,653

Após a definição da BGS e do Mistura Drenante substituíram-se os valores de  $\gamma_{dn}$  e  $P_n$  (apresentados na Tabela 4.3 e na Tabela 4.2, respectivamente) na Equação 22 e calculou-se  $\gamma_{d-BGS} = 2,628 \text{ g/cm}^3$  e  $\gamma_{d-MD} = 2,620 \text{ g/cm}^3$ .

#### 4.1.1.3. Determinação da umidade ótima ( $h_{ót.}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{smáx.}$ )

Os valores de umidade ótima ( $h_{ót.}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{smáx.}$ ), determinados por meio do método descrito em 3.2.2.3, são apresentados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 – Resultados obtidos nos ensaios de compactação.

Mistura	$h_{ót.}$	$\gamma_{smáx.}$ [g/cm <sup>3</sup> ]
BGS	5,82%	2,246
MD	6,70%	2,173

## 4.2. MODELAGEM NUMÉRICA

### 4.2.1. Cálculo das permissividades dielétricas teóricas ( $\epsilon_{teórica}$ )

Os valores de  $\epsilon_{teórica}$ , obtidos para BGS e para a Mistura Drenante para as condições descritas em 3.3.1, são apresentados na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6. Destaca-se que para os cálculos de  $\epsilon_{teórica}$  apresentados na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6 os valores de  $h$  são constantes e correspondem ao valor  $h_{ót.}$  de cada mistura, apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.5 – Valores de  $\epsilon_{teórica}$  obtidos para variação de  $\gamma_s$  da BGS.

GC	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	N	$N_e$	S	$\epsilon_{teórica}$ (adimensional)	V [m/ns]
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

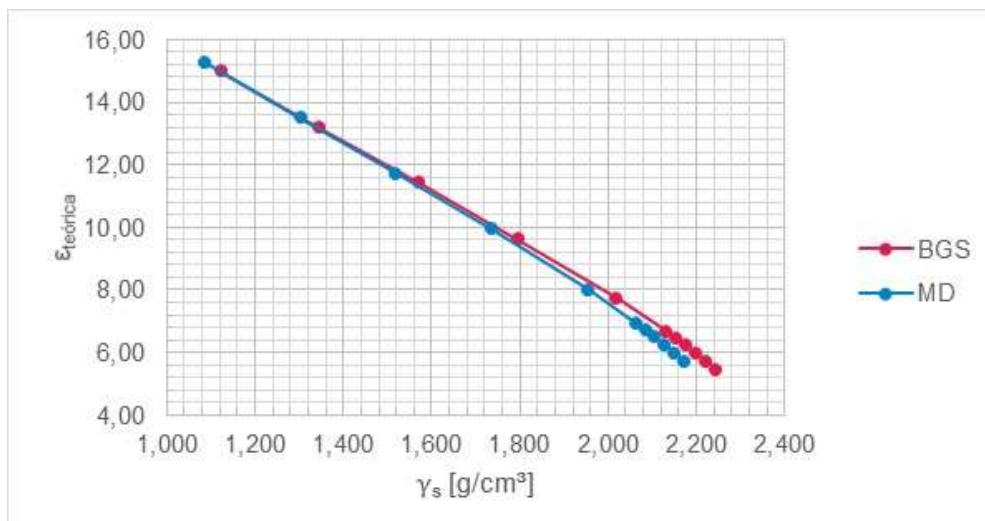
Continuação - Tabela 4.5 – Valores de  $\epsilon_{teórica}$  obtidos para variação de  $\gamma_s$  da BGS.

GC	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	N	N <sub>e</sub>	S	$\epsilon_{teórica}$ (adimensional)	V [m/ns]
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

Tabela 4.6 – Valores de  $\epsilon_{teórica}$  obtidos para variação de  $\gamma_s$  da Mistura Drenante.

GC	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	N	N <sub>e</sub>	S	$\epsilon_{teórica}$ (adimensional)	V [m/ns]
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

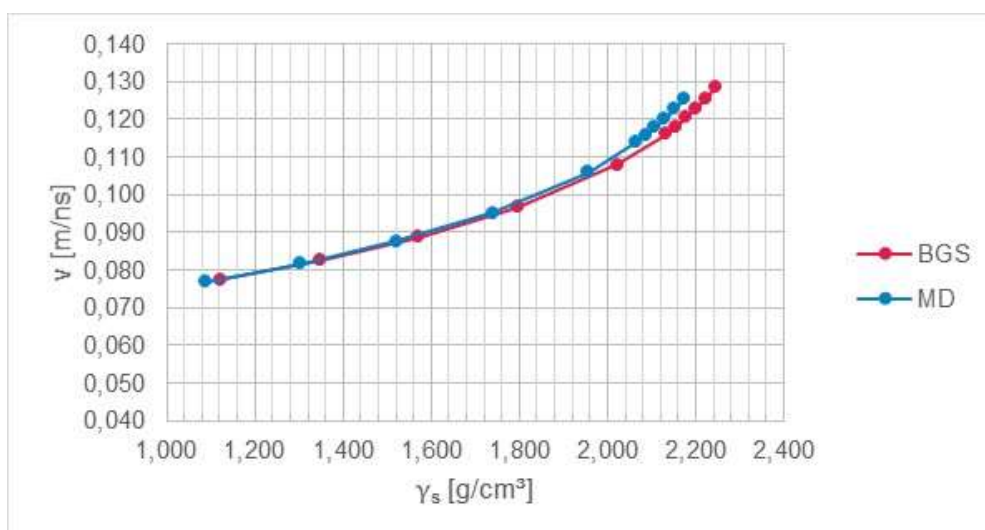
Elaborou-se gráficos a partir dos resultados relativos às variações de  $\gamma_s$  apresentados na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6, os quais podem ser vistos nas Figura 4.6; Figura 4.7 e Figura 4.8 e serão discutidos ao longo desta seção. Observa-se na Figura 4.6 que para ambas as misturas, uma vez que os valores de  $h$  são constantes,  $\epsilon_{teórica}$  respondeu de modo inversamente proporcional às mudanças nos valores de  $\gamma_s$ :



**Figura 4.6 – Valores de  $\epsilon_{teórica}$  obtidos para a variação de valores de  $\gamma_s$ .**

Justifica-se a relação entre o aumento de  $\gamma_s$  e a redução de  $\epsilon_{teórica}$  ao analisar-se o modelo expresso pela Equação 15: a medida em que  $\gamma_s$  aumenta, diminui a contribuição das parcelas correspondentes ao ar –  $\epsilon_{el} = 1 - e$  e à água –  $\epsilon_{água} = 81 - e$  e aumenta a contribuição da parcela correspondente ao esqueleto mineral –  $\epsilon_{agreg.} = 5$ .

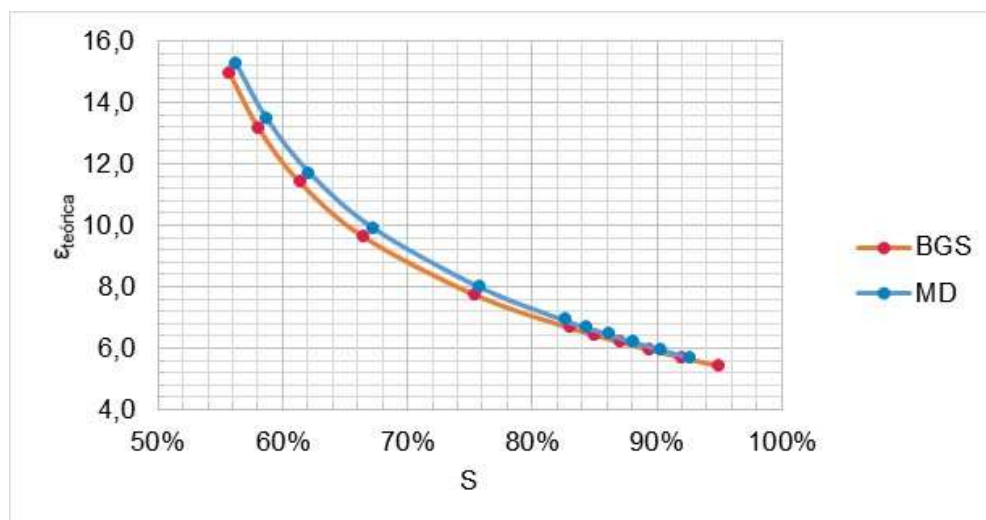
Outro modo de se avaliar a resposta do GPR foi obter a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nos meios de interesse. Observa-se na Figura 4.7 que, para ambas as misturas,  $v$  aumenta à medida em que  $\gamma_s$  aumenta, fato justificável pela relação inversamente proporcional entre  $\epsilon_{el}$  e  $v$  (Equação 11):



**Figura 4.7 – Valores de  $v$  obtidos para a variação de valores de  $\gamma_s$ .**



O aumento nos valores de  $\gamma_s$ , com a manutenção dos valores da unidade ( $h=h_{ót}$ ), representou a diminuição dos vazios por expulsão do ar e contribuiu no aumento de S e na conseqüente redução  $\epsilon_{teórica}$  (Figura 4.8), demonstrando o exposto até aqui:



**Figura 4.8 – Relação entre S e  $\epsilon_{teórica}$  para a variação de valores de  $\gamma_s$ .**

Finalmente, é possível observar, em todos os gráficos, uma concentração de pontos no fim (Figura 4.6; Figura 4.7 e Figura 4.8), os quais representaram os valores de  $\gamma_s$  correspondentes aos GC = 95%; 96%; 97%; 98%; 99% e 100% para ambas misturas. A proximidade dos valores de  $\epsilon_{teórica}$  e v obtidas para estes pontos pode ser um indicativo da baixa sensibilidade do GPR à pequenas variações nos valores de  $\gamma_s$ .

A composição granulométrica foi considerada no cálculo de  $\epsilon_{teórica}$  de modo indireto, por meio de  $\gamma_d$  das misturas (ver Equação 15; Equação 19 e Equação 21). Observou-se nos resultados apresentados na Figura 4.6 à Figura 4.8 que os valores de  $\epsilon_{teórica}$  e v obtidos variaram dentro das mesmas faixas de valores para a BGS e para a Mistura Drenante. Verificou-se, também, que as misturas tiveram comportamento similar e que as linhas eram paralelas, com maior ou menor afastamento dependendo da condição avaliada e que em alguns casos houve sobreposição.

### 4.3. SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DO GPR

Para a simulação do experimento utilizou-se o programa de uso livre gprMax, detalhado no item 3.4.

#### 4.3.1. Definição do domínio computacional

A fim de atender as condições de fronteiras de absorção, discutidas em 2.3.3, expandiu-se o domínio computacional para além das dimensões externas da caixa ( $436 \times 168$  mm, como definido em 3.5.1) em 100 mm para cada lado e acresceu-se uma “camada” de espaço livre de 100 mm acima da superfície da caixa, resultando num domínio de  $636 \times 368$  mm. Para aproximar o modelo das condições reais do experimento optou-se por atribuir à camada de 100 mm características do concreto, representando o piso do laboratório. A geometria do modelo simulado é apresentada na Figura 4.9:

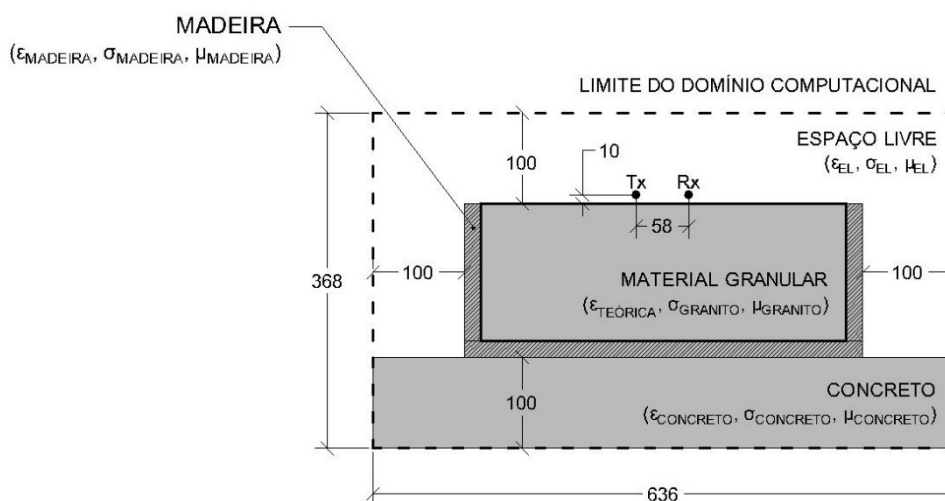


Figura 4.9 – Geometria do modelo simulado. Dimensões em [mm].

#### 4.3.2. Definição dos passos de discretização espacial ( $\Delta x$ ; $\Delta y$ ; $\Delta z$ ) janela temporal ( $W$ ) e intervalo de amostragem espacial ( $\Delta l$ )

Como discutido em 3.4, o menor comprimento de onda ( $\lambda_{\min.}$ ) corresponde à frequência máxima ( $f_{\max.}$ ), que para  $f_c = 1,6$  GHz, como foi possível observar na Figura 3.5, é  $f_{\max.} = 6,4$  GHz. Após um estudo paramétrico no qual calculou-se  $\lambda_{\min.}$  a partir dos valores de  $\epsilon_{\text{teórica}}$  apresentados na Tabela 4.5 e Tabela 4.6 chegou-se a  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$  mm.

Ao analisar a Equação 8 percebe-se que  $v$  é inversamente proporcional à  $\sqrt{\epsilon}$ . Sendo assim, obteve-se a maior velocidade prevista –  $v = 0,129$  m/ns – para o menor valor de  $\epsilon_{\text{teórico}} = 5,43$ , que correspondeu à BGS condição de  $GC = 100\%$  e  $h_{\text{ót.}} = 5,82\%$ . Adotou-se como valor de  $d$  a soma da espessura da camada granular – 150 mm – com a espessura das placas de MDF utilizada nos experimentos realizados

– 18 mm, o que resultou em  $d = 168$  mm. Ao substituir-se todos os valores na Equação 25, reproduzida abaixo, obteve-se  $W = 3,03$  ns; no entanto, adotou-se  $W = 5$  ns por ser o valor mínimo aceito pelo equipamento (GSSI, 2017).

$$W = 1,3 \frac{2d}{v} \quad (25)$$

Como apresentado no item 3.4, o valor de  $\Delta l$  está intimamente relacionado à frequência central da antena utilizada e às propriedades dielétricas do material de interesse. Ao substituir-se  $f_c = 1.600$  MHz e  $\epsilon = 5,43$ , na Equação 26, reproduzida abaixo, obteve-se  $\Delta l = 0,02$  m.

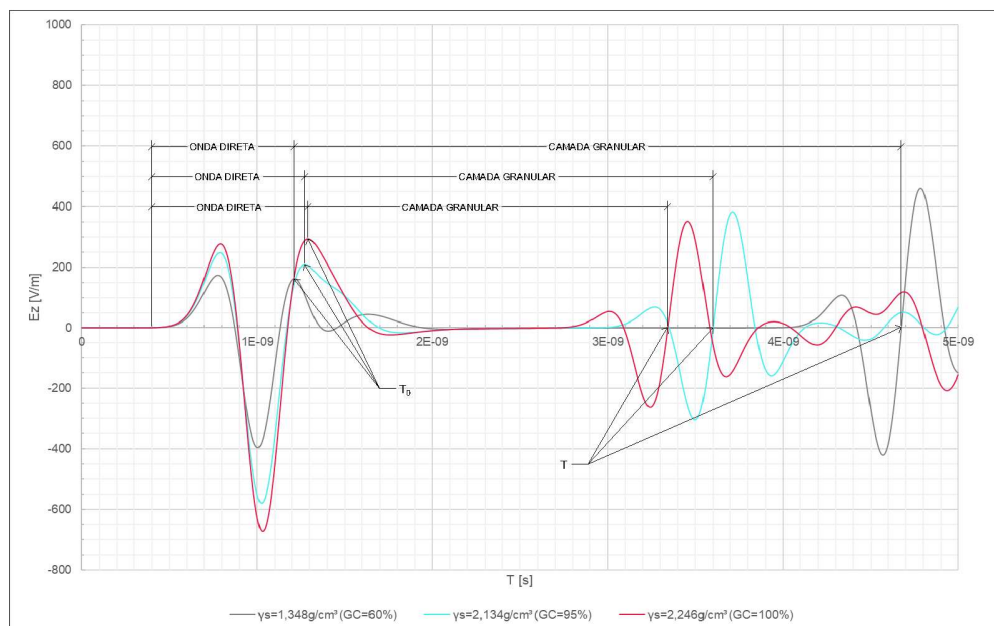
$$\Delta l = \frac{c}{4fc\sqrt{\epsilon}} = \frac{75}{fc\sqrt{\epsilon}} \quad (26)$$

#### 4.3.3. Resultados das simulações

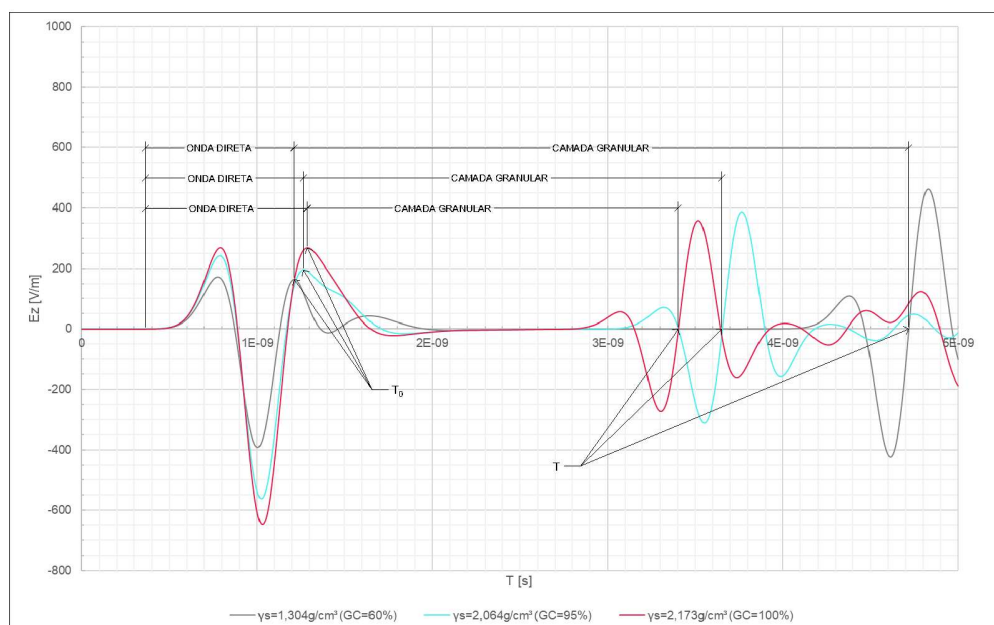
Optou-se por realizar as simulações da propagação do sinal do GPR, tanto para a BGS quanto para a Mistura Drenante, para as condições correspondentes ao GC = 60% (cujos valores de  $\gamma_s$  são próximos aos obtidos em laboratório para a condição solta); 95% e 100%. Os resultados, apresentados na forma de traços<sup>11</sup> (descritos em 2.4.3) e seus respectivos espectros de frequência, serão discutidos a seguir.

Os traços relativos às variações de  $\gamma_s$  foram apresentados na Figura 4.10 e na Figura 4.11. Nessas figuras, a parte inicial do sinal, localizada aproximadamente entre  $0,5E-09$  s e  $1,20E-09$  s representou a onda direta entre Tx e Rx. A superfície da camada granular correspondeu ao pico positivo de amplitude ( $T_0$ ) localizado aproximadamente entre  $1,20E-09$  s e  $1,5 E-09$  s. A base da camada granular correspondeu aos pontos de amplitude zero situados entre um pico positivo e um pico negativo, localizados aproximadamente entre  $3,3E-09$  s e  $4,8 E-09$  s. Justifica-se este deslocamento da base, ocorrido tanto para a BGS quanto para a Mistura Drenante, pelo aumento de  $\gamma_s$ , que resultou na redução de  $\epsilon_{teórica}$  e, por sua vez, no aumento de  $v$ , o que se traduziu na diminuição do tempo de ida e volta percorrido pelo sinal (T).

<sup>11</sup> Os traços apresentados foram obtidos por meio do gprMax e são o registro temporal dos valores de Ez para dada posição do receptor (WARREN; GIANNOPOULOS; GIANNAKIS, 2016).



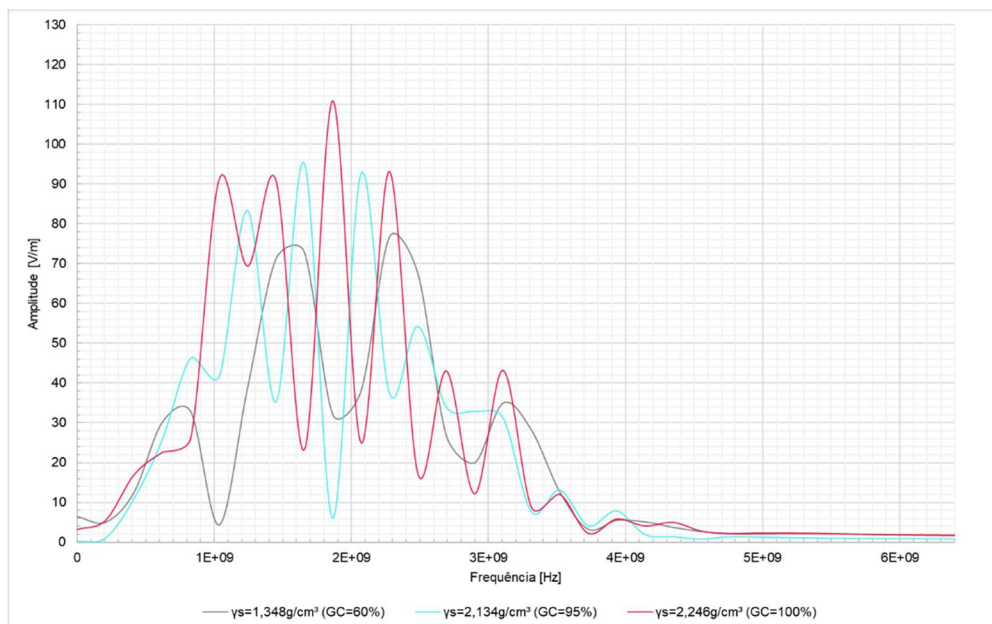
**Figura 4.10 – Traços obtidos para a BGS para a variação de  $\gamma_s$ .**



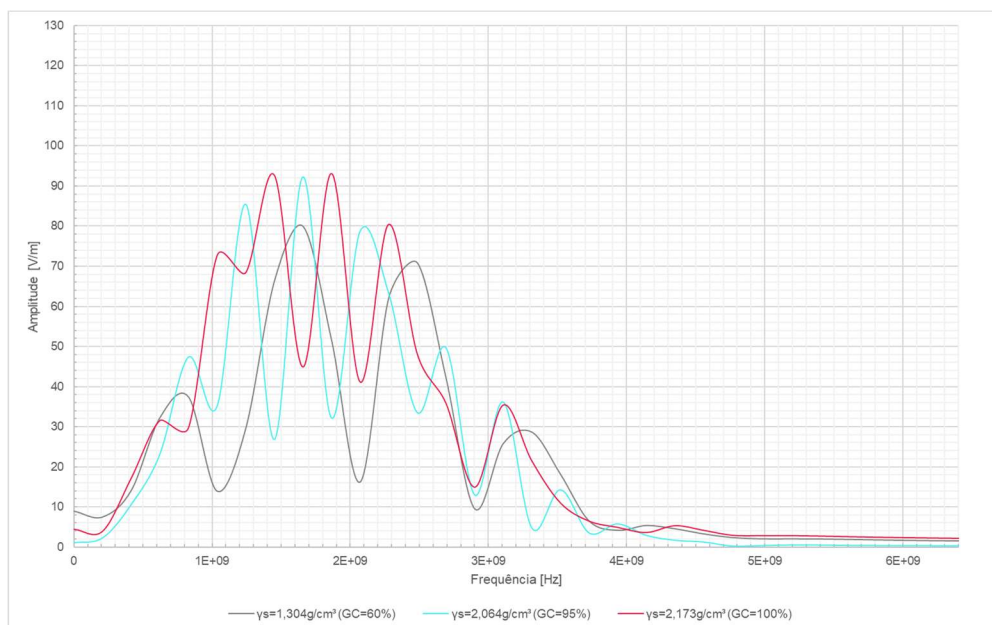
**Figura 4.11 – Traços obtidos para a Mistura Drenante para a variação de  $\gamma_s$ .**

Observa-se que quanto maior o contraste entre  $\epsilon_{\text{teórico}}$  e  $\epsilon_{\text{madeira}}$ , maior a variação na amplitude de  $E_z$  na interface entre o material granular e a madeira. Observa-se, também, que quanto mais próximos os valores de  $\gamma_s$ , menor a variação na amplitude de  $E_z$  e mais próximos os valores de  $T$ , o que reforça a hipótese apresentada em 4.2.1 de que o GPR seria pouco sensível à pequenas variações nos valores de  $\gamma_s$ .

Os espectros de frequência relativos às variações de  $\gamma_s$  foram apresentados na Figura 4.12 e Figura 4.13:



**Figura 4.12 – Espectros de frequência obtidos para a BGS para a variação de  $\gamma_s$ .**

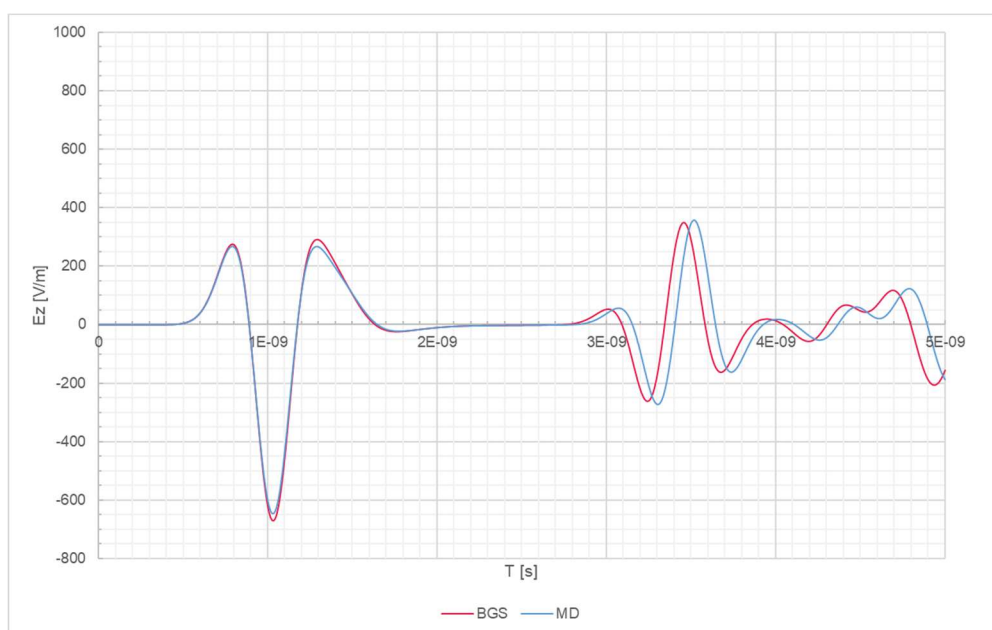


**Figura 4.13 – Espectros de frequência obtidos para a Mistura Drenante para a variação de  $\gamma_s$ .**

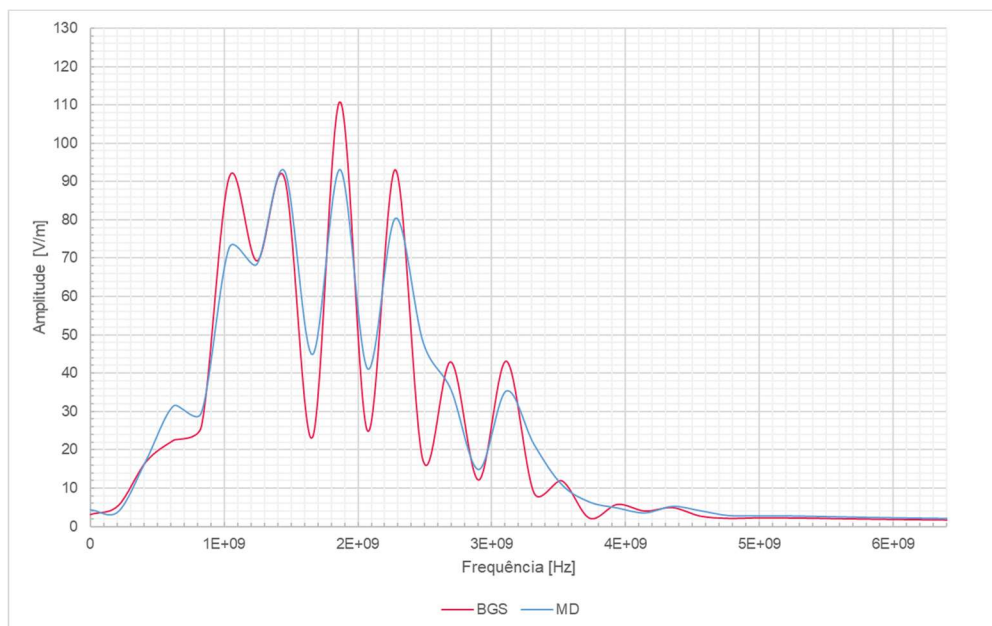
É possível observar que tanto para a BGS quanto para a Mistura Drenante o aumento de  $\gamma_s$  resultou no aumento da amplitude dos picos e em uma redistribuição dos mesmos por valor de frequência. Assim como ocorreu com os traços, observa-se

que quanto mais próximos os valores de  $\gamma_s$ , maior a semelhança entre os espectros, contribuindo para a hipótese apresentada em 4.2.1, de que o GPR seria pouco sensível à pequenas variações nos valores de  $\gamma_s$ .

Como discutido em 4.2.1, a composição granulométrica foi considerada no cálculo de  $\epsilon_{teórica}$  (único dado de entrada variável na simulação) de modo indireto, por meio de  $\gamma_d$  das misturas. Plotou-se na Figura 4.14 traços correspondentes aos valores de  $\epsilon_{teórica}$  para a condição  $h = h_{ót.}$  e  $\gamma_s = \gamma_{smáx.}$  de ambas as misturas e na Figura 4.15 os respectivos espectros de frequência:



**Figura 4.14 – Traços obtidos para a BGS e para Mistura Drenante na condição  $h = h_{ót.}$  e  $\gamma_s = \gamma_{smáx.}$ .**



**Figura 4.15 – Espectros de frequência obtidos para a BGS e para Mistura Drenante na condição  $h = h_{ót.}$  e  $\gamma_s = \gamma_{smáx.}$**

É possível observar em ambas as figuras que as misturas tiveram um comportamento similar e que as linhas plotadas quase se sobrepõem, também reforçando a hipótese apresentada em 4.2.1 de que o GPR seria pouco sensível à pequenas variações nos valores na granulometria.

#### 4.4. EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

A execução do experimento seguiu o procedimento descrito em 3.8. Foram levantados 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 radargramas, compostos cada por um número de traços que variou entre 16 e 20.

Para preparação das misturas e compactação admitiu-se teor de umidade variando  $\pm 1,0\%$  em relação à umidade ótima. O controle de execução é apresentado na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Controle de execução do experimento em laboratório.

Mistura	Condição pretendida	$\gamma$ [g/cm <sup>3</sup> ]	h	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	GC
BGS	Estado solto	1,46	6,82%	1,368	60,89%
BGS	GC = 90%	2,16	6,16%	2,030	90,39%
BGS	GC = 95%	2,26	6,09%	2,134	95,00%
BGS	GC = 98%	2,32	5,55%	2,200	97,97%
BGS	GC = 100%	2,37	5,55%	2,245	99,97%
MD	Estado solto	1,73	6,70%	1,621	74,58%
MD	GC = 90%	2,06	5,82%	1,944	89,48%
MD	GC = 95%	2,21	6,70%	2,067	95,12%
MD	GC = 98%	2,27	6,70%	2,130	98,01%
MD	GC = 100%	2,31	6,70%	2,166	99,68%

A fim de comparar as características das misturas produzidas em laboratório calculou-se os valores de  $\epsilon_{\text{teórico}}$  por meio da Equação 15 e utilizando os valores de  $\gamma_s$  e h apresentados na Tabela 4.7. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Valores de  $\epsilon_{\text{teórico}}$  obtidos para as misturas produzidas em laboratório.

Mistura	GC	$\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	S	$\epsilon_{\text{mat.}}$ (adimensional)	V [m/ns]
BGS	60,89%	1,37	59,72%	12,99	0,083
BGS	90,39%	2,03	77,49%	7,53	0,109
BGS	95,00%	2,13	84,55%	6,54	0,117
BGS	97,97%	2,20	87,53%	6,10	0,121
BGS	99,97%	2,25	92,80%	5,60	0,127
MD	74,58%	1,62	64,23%	10,90	0,091
MD	89,48%	1,94	71,75%	8,40	0,103
MD	95,12%	2,07	82,43%	6,96	0,114
MD	98,01%	2,13	87,64%	6,28	0,120
MD	99,68%	2,17	91,28%	5,87	0,124



Ao comparar os resultados é possível constatar a proximidade dos valores teóricos com os obtidos em laboratório. Pode-se atribuir tal proximidade ao controle da execução das misturas, que garantiram a proximidade com os valores adotados para a simulação.

Os dados adquiridos com o GPR para as condições apresentadas na Tabela 4.7 foram processados seguindo o procedimento descrito em 3.9 e estão sintetizados na Tabela 4.9, os quais serão discutidos em seguida.

**Tabela 4.9 – Valores de  $\epsilon_{mat.}$  obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para BGS produzida em laboratório.**

<b>Linha de levantamento</b>	<b>GC</b>	<b>S</b>	<b>T [ns]</b>	<b>v [m/ns]</b>	<b><math>\epsilon_{mat.}</math> (adimensional)</b>
2	60,89%	59,72%	-	-	-
<b>4</b>	<b>60,89%</b>	<b>59,72%</b>	-	-	-
6	60,89%	59,72%	-	-	-
C	60,89%	59,72%	-	-	-
E	60,89%	59,72%	-	-	-
G	60,89%	59,72%	-	-	-
2	90,39%	77,49%	-	-	-
4	90,39%	77,49%	2,56	0,117	6,55
6	90,39%	77,49%	2,69	0,112	7,21
C	90,39%	77,49%	2,62	0,114	6,86
E	90,39%	77,49%	2,36	0,127	5,58
G	90,39%	77,49%	2,58	0,116	6,66
2	95,00%	84,55%	2,50	0,120	6,22
<b>4</b>	<b>95,00%</b>	<b>84,55%</b>	<b>2,54</b>	<b>0,118</b>	<b>6,41</b>
6	95,00%	84,55%	2,47	0,122	6,08
C	95,00%	84,55%	2,50	0,120	6,26
E	95,00%	84,55%	2,47	0,121	6,10
G	95,00%	84,55%	2,55	0,118	6,49
2	97,97%	87,53%	2,53	0,118	6,40
4	97,97%	87,53%	2,53	0,119	6,38
6	97,97%	87,53%	2,38	0,126	5,67

Continuação – Tabela 4.9 – Valores de  $\epsilon_{mat.}$  obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para BGS produzida em laboratório.

Linha de levantamento	GC	S	T [ns]	v [m/ns]	$\epsilon_{mat.}$ (adimensional)
C	97,97%	87,53%	2,50	0,120	6,25
E	97,97%	87,53%	2,47	0,122	6,07
G	97,97%	87,53%	2,50	0,120	6,23
2	99,97%	92,80%	2,58	0,116	6,64
<b>4</b>	<b>99,97%</b>	<b>92,80%</b>	<b>2,50</b>	<b>0,120</b>	<b>6,24</b>
6	99,97%	92,80%	2,56	0,117	6,55
C	99,97%	92,80%	2,57	0,117	6,60
E	99,97%	92,80%	2,57	0,117	6,61
G	99,97%	92,80%	2,58	0,117	6,62

Tabela 4.10 – Valores de  $\epsilon_{mat.}$  obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para Mistura Drenante produzida em laboratório.

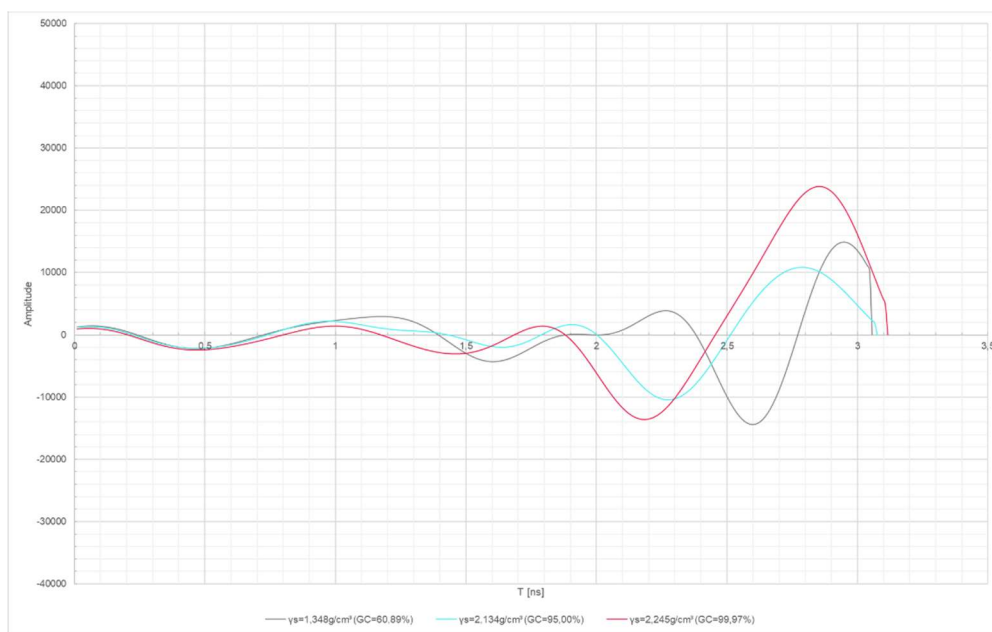
Linha de levantamento	GC	S	T [ns]	v [m/ns]	$\epsilon_{mat.}$ (adimensional)
2	74,58%	64,23%	-	-	-
<b>4</b>	<b>74,58%</b>	<b>64,23%</b>	-	-	-
6	74,58%	64,23%	-	-	-
C	74,58%	64,23%	-	-	-
E	74,58%	64,23%	-	-	-
G	74,58%	64,23%	-	-	-
2	89,48%	71,75%	-	-	-
4	89,48%	71,75%	-	-	-
6	89,48%	71,75%	-	-	-
C	89,48%	71,75%	-	-	-
E	89,48%	71,75%	-	-	-
G	89,48%	71,75%	-	-	-
2	95,12%	82,43%	2,58	0,116	6,65
<b>4</b>	<b>95,12%</b>	<b>82,43%</b>	<b>2,63</b>	<b>0,114</b>	<b>6,93</b>

Continuação – Tabela 4.10 – Valores de  $\epsilon_{mat}$  obtidos a partir dos levantamentos com o GPR para Mistura Drenante produzida em laboratório.

Linha de levantamento	GC	S	T [ns]	v [m/ns]	$\epsilon_{mat}$ (adimensional)
6	95,12%	82,43%	2,65	0,113	7,02
C	95,12%	82,43%	2,68	0,112	7,15
E	95,12%	82,43%	2,62	0,115	6,85
G	95,12%	82,43%	2,61	0,115	6,80
2	98,01%	87,64%	2,67	0,113	7,10
4	98,01%	87,64%	2,70	0,111	7,28
6	98,01%	87,64%	2,72	0,110	7,38
C	98,01%	87,64%	2,64	0,114	6,95
E	98,01%	87,64%	2,69	0,112	7,21
G	98,01%	87,64%	2,71	0,111	7,32
2	99,68%	91,28%	2,48	0,121	6,15
<b>4</b>	<b>99,68%</b>	<b>91,28%</b>	<b>2,51</b>	<b>0,119</b>	<b>6,30</b>
6	99,68%	91,28%	2,33	0,129	5,40
C	99,68%	91,28%	2,55	0,118	6,50
E	99,68%	91,28%	2,46	0,122	6,06
G	99,68%	91,28%	2,49	0,120	6,20

Observa-se nas tabelas acima a ausência de resultados para todas as linhas de levantamento que correspondem à condição solta (tanto para a BGS quanto para a Mistura Drenante); para linha 2 da BGS na condição GC = 90,39% e para todas as linhas que correspondem Mistura Drenante na condição GC = 89,48%. A linha de levantamento 2 não foi computada por conta da baixa qualidade dos dados adquiridos. Nos demais casos não foi possível aproveitar os dados porque, apesar do cuidado no cálculo da janela temporal ( $W = 5$  ns) e das simulações mostrarem que o valor adotado seria suficiente, o intervalo de tempo anterior ao  $T_0$  (o “salto” discutido em 3.9) fez com que o tempo T que corresponde à interface camada granular/madeira fosse superior ao valor de W.

A Figura 4.16 apresenta os traços médios<sup>12</sup> gerados pelo programa REFLEXW (SANDMEIER, 2017) correspondentes às linhas de levantamento 4 (escolhida por ser a seção central da caixa) para a BGS nas condições GC = 60,89% (condição solta); GC = 95,00% e CG = 99,97%:

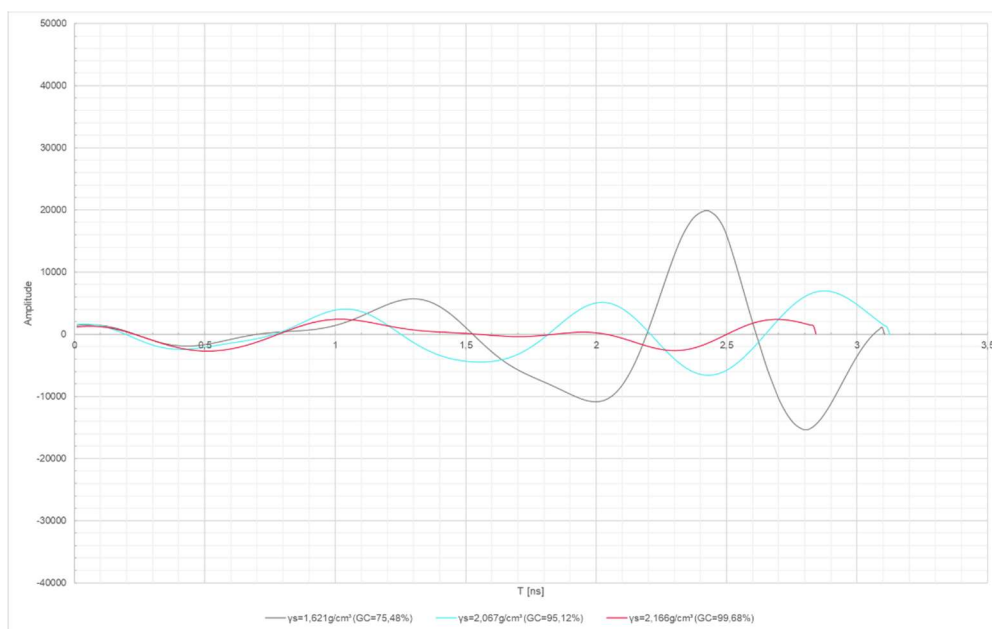


**Figura 4.16 – Traços médios gerados para a BGS nas condições GC = 60,89% (condição solta); GC = 95% e CG = 99,97%.**

Após o processamento o instante  $T_0$ , que corresponde à superfície da camada granular, ficou localizado exatamente em  $T = 0$ . Quando os traços apresentados na Figura 4.16 são comparados aos apresentados na Figura 4.10 é possível observar irregularidades nos valores das amplitudes ao longo do eixo horizontal. Tal fato é atribuível à heterogeneidade da mistura real pois, enquanto na simulação da propagação o material era uniforme, a mistura real não é naturalmente uniforme. Também é possível observar como os traços são similares e se sobrepõem em alguns trechos, especialmente os que correspondem à GC = 95,00% e CG = 99,97%, confirmando a hipótese apresentada em 4.2.1 de que o GPR seria pouco sensível à pequenas variações nos valores de  $\gamma_s$ .

<sup>12</sup> A finalidade da figura x y z é facilitar a visualização dos resultados e auxiliar nas discussões. Pequenas discrepâncias entre os valores de T apresentados nas figuras e na Tabela 4.9 devem se ao fato de que enquanto as figuras apresentam valores que foram calculados automaticamente, os valores da tabela foram calculados manualmente.

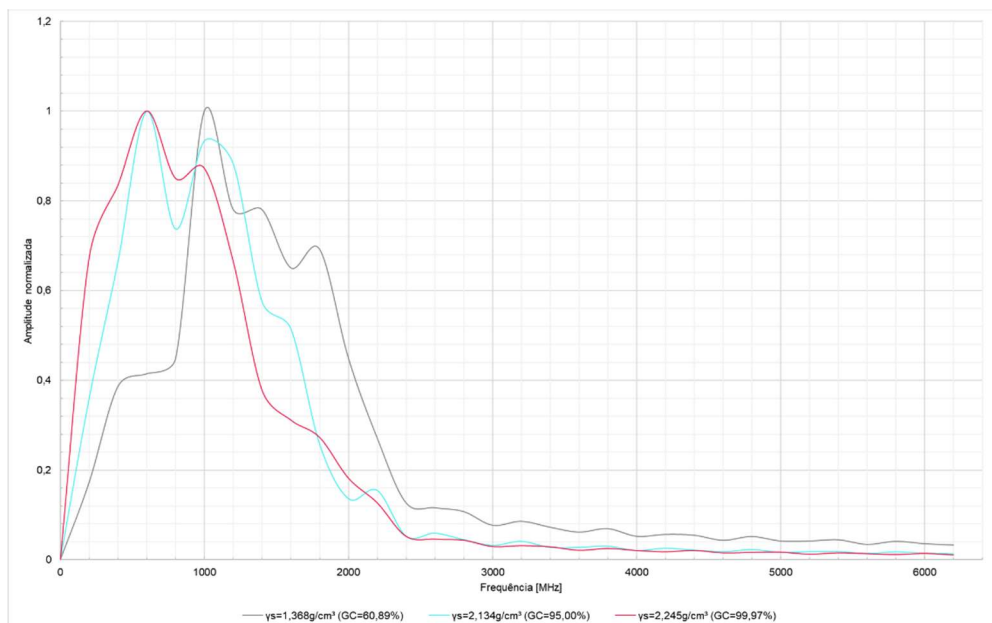
Seguindo os mesmos procedimentos, a Figura 4.17 apresenta os traços médios, também gerados pelo programa REFLEXW (SANDMEIER, 2017), correspondentes às linha 4 para a Mistura Drenante nas condições GC = 75,48% (condição solta); GC = 95,11% e CG = 99,68%:



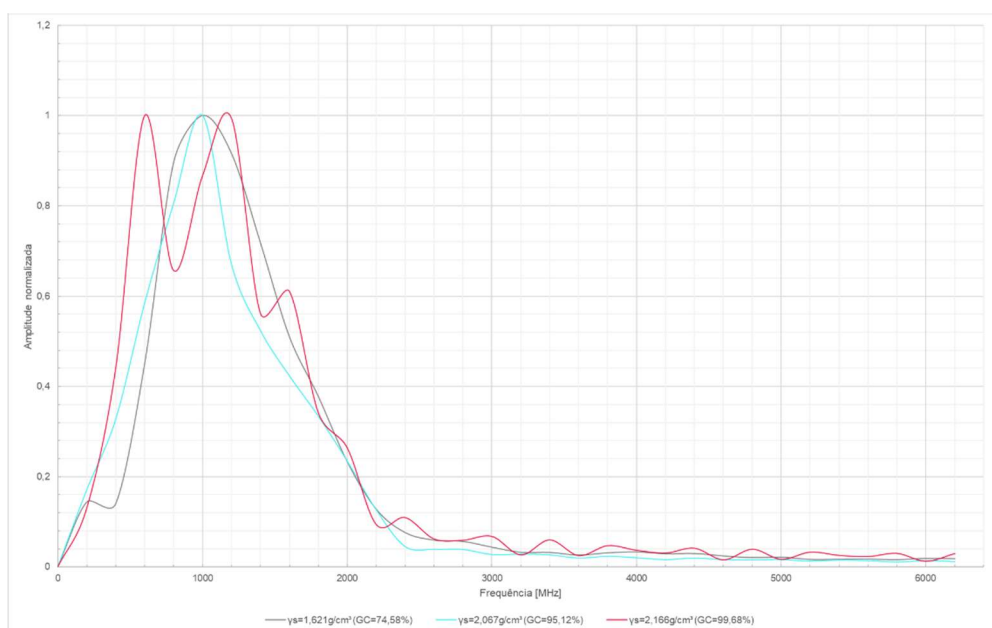
**Figura 4.17 – Traços médios gerados para a MD nas condições GC = 75,48% (condição solta); GC = 95,11% e CG = 99,68%.**

Como no caso anterior após o processamento, o instante  $T_0$  que corresponde à superfície da camada granular ficou localizado exatamente em  $T = 0$ . Quando os traços apresentados na Figura 4.17 são comparados aos apresentados na Figura 4.11 é possível observar irregularidades nos valores das amplitudes ao longo do eixo horizontal, atribuível à heterogeneidade da mistura real. Novamente é possível observar como os traços são similares e se sobrepõem em alguns trechos, reforçando a baixa sensibilidade à pequenas variações nos valores de  $\gamma_s$ .

A Figura 4.18 e a Figura 4.19 apresentam os espectros de frequência médios, também gerados pelo programa REFLEXW (SANDMEIER, 2017), correspondentes às linhas 4 para a para a BGS nas condições GC = 60,89% (condição solta); GC = 95,00% e CG = 99,97% e para a Mistura Drenante nas condições GC = 75,48% (condição solta); GC = 95,11% e CG = 99,68%:



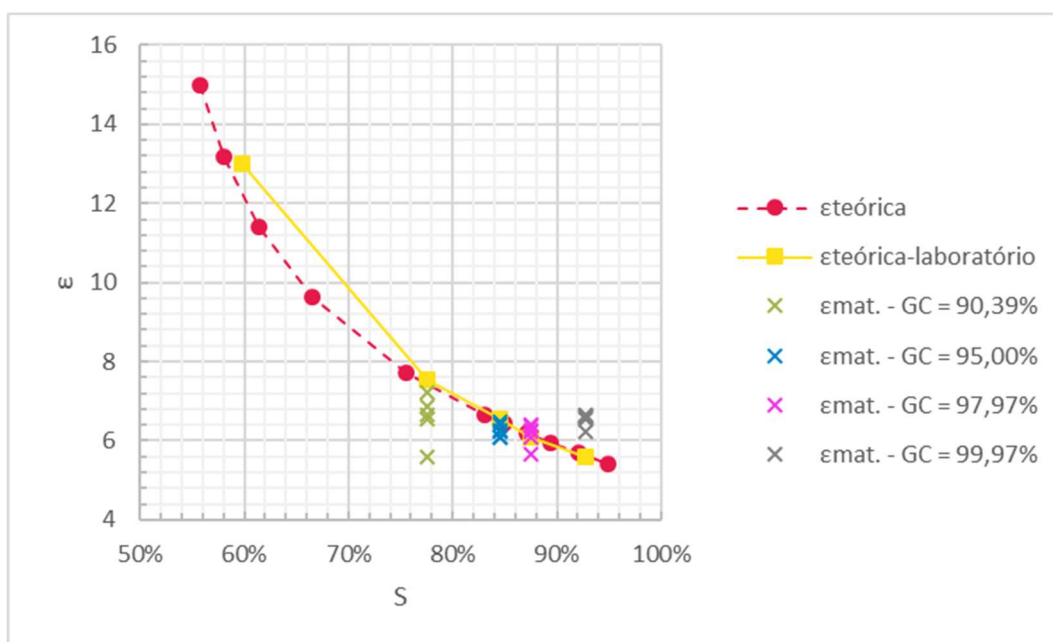
**Figura 4.18 – Espectros de frequência médios gerados para a BGS nas condições GC = 60,89% (condição solta); GC = 95% e CG = 99,97%.**



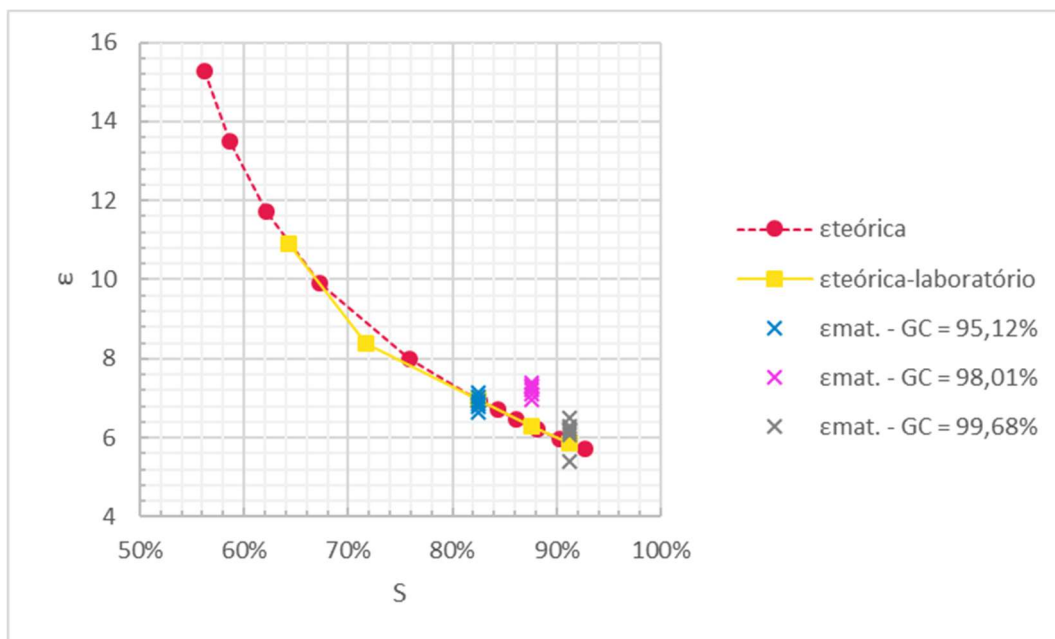
**Figura 4.19 – Espectros de frequência médios gerados para a MD nas condições GC = 75,48% (condição solta); GC = 95,11% e CG = 99,68%.**

Quando os espectros apresentados na Figura 4.18 e a Figura 4.19 são comparados aos apresentados na Figura 4.12 e Figura 4.13, é possível observar a que a redistribuição de picos se repete e que novamente há semelhanças entre os espectros.

É conhecida a sensibilidade do GPR à presença de água –  $\epsilon_{\text{água}} = 81$ . 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  $\pm 1\%$ , observou-se que este parâmetro tem um efeito importante no valor de  $\epsilon_{\text{mat.}}$ . 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  $\epsilon_{\text{mat.}}$ . Assim sendo, optou-se por adotar a saturação (S) como base para comparação entre os dados obtidos por meio do cálculo de  $\epsilon_{\text{teórico}}$  (Tabela 4.5 e Tabela 4.6); os valores de  $\epsilon_{\text{teórico}}$  obtidos para as misturas de laboratório (Tabela 4.8) e os valores de  $\epsilon_{\text{mat.}}$  obtidos a partir dos levantamentos com o GPR (Tabela 4.9) apresentadas na Figura 4.20 e na Figura 4.21:



**Figura 4.20 – Síntese dos dados obtidos por meio de modelagem numérica e em laboratório para a BGS.**



**Figura 4.21 – Síntese dos dados obtidos por meio de modelagem numérica e em laboratório para a Mistura Drenante.**

Tanto a Figura 4.20 quanto a Figura 4.21 demonstram o que foi observado até aqui. A concordância entre os resultados da modelagem numérica e os obtidos em laboratório (representados pelo símbolo “x”) e o baixo contraste entre as propriedades físicas das misturas (visível na faixa de valores de  $\omega$  na qual varia  $\epsilon_{mat.}$ , idêntica a para as duas misturas) explicam a baixa sensibilidade do GPR às variações nas características estudadas. No tocante à variação localizada dos valores de  $\epsilon_{mat.}$  a mesma é atribuída à heterogeneidade do material dentro da caixa. Finalmente, os valores obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura: vide valores de granito fraturado e úmido na Tabela 2.1 e bases granulares na Tabela 2.2.



## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho é um estudo de caso aplicado que teve por objetivo avaliar a sensibilidade do GPR às variações na granulometria e na massa específica aparente de misturas de britas graduadas utilizadas em camadas de pavimentos, visando seu uso como ferramenta para controle de qualidade de execução de camadas granulares.

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.

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 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 tanto o modelo CRIM quanto o método FDTD mostram-se eficazes. 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.

Como sugestões citam-se: a avaliação da sensibilidade do GPR à contaminação misturas de britas graduadas por diferentes tipos de solo e sua possível contribuição à avaliação da variação umidade nas misturas de britas graduadas estudadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 2004.

AASHTO. **PP 98-19: Standard specification for asphalt surface dielectric profiling system using ground penetrating radar**. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019.

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

ABNT. **NBR 7182:2016: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

AL-QADI, I. L. Using microwave measurements to detect moisture in asphaltic concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 43–50, 1992.

AL-QADI, I. L. *et al.* In-Place Hot-Mix Asphalt Density Estimation Using Ground-Penetrating Radar. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 2152, n. 1, p. 19–27, 2010.

AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S. Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice. **Construction and Building Materials**, Non Destructive Testing: Selected papers from Structural Faults and Repair 2003. [s. l.], v. 19, n. 10, p. 763–772, 2005.

AL-QADI, I. L.; LAHOUAR, S.; LOULIZI, A. In situ measurements of hot-mix asphalt dielectric properties. **NDT & E International**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 427–434, 2001.

ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar workshop notes**. Mississauga: Sensors & Software, 2001.

ASTM. **D6432 - 11: Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

ASTM. **D6087 - 08: Standard test method for evaluating asphalt-covered concrete bridge decks using ground penetrating radar**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. a.

ASTM. **ASTM D4748 - 10: Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015. b.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BEAUCAMP, B.; FAUCHARD, C.; LAGUERRE, L. Non destructive assessment of Hot Mix Asphalt compaction with a step frequency radar: case study. In: PROCEEDINGS

2013, **Anais...** . In: 7TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED GROUND PENETRATING RADAR. [s.l: s.n.].

BENEDETTO, A. *et al.* FDTD simulation of the GPR signal for effective inspection of pavement damages. In: PROCEEDINGS 2014, **Anais...** . In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR. [s.l: s.n.].

BENEDETTO, A.; PENSA, S. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. **Journal of Applied Geophysics**, [s. l.], v. 62, n. 2, p. 107–123, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras/Abeda, 2008.

BSI. **BS 1377-4:1990: Methods of test for soils for civil engineering purposes. Compaction-related tests**. United Kingdom: British Standards Instituiton, 1990.

CALISTER, JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CARIOU, J. *et al.* Application du radar géologique en génie civil. **BLPC - Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, [s. l.], v. 211, p. 117–131, 1997.

CASSIDY, Nigel J. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In: **Ground penetrating radar: theory and applications**. 1. ed. United Kingdom: Elsevier Science, 2009. p. 41–72.

CHEN, Dar Hao *et al.* Integration of field and laboratory testing to determine the causes of a premature pavement failure. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 1345–1358, 2006.

CLEMEÑA, G. G.; SPRINKEL, M. M.; LONG, R. **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, 1986.

CNT. **Plano CNT de transporte e logística 2018**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2018.

CNT; SEST; SENAT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Brasília: CNT SEST SENAT, 2019.

DANIELS, David J. (ED.). **Ground Penetrating Radar**. 2nd edition ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004.

DÉROBERT, X. *et al.* Step-frequency radar applied on thin road layers. **Journal of Applied Geophysics**, Ground Penetrating Radar. [s. l.], v. 47, n. 3, Ground Penetrating Radar, p. 317–325, 2001.

DER/SP. **ET-DE-P00/008: Sub-base ou base de brita graduada**. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem - São Paulo, 2005.

DIAMANTI, Nectaria; REDMAN, David. 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. [s. l.], v. 81, p. 106–116, 2012.

DNER. **ME 195/97: Agregados - determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

DNER. **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, 1998.

DNIT. **141/2010 - ES: Base estabilizada granulométricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

EUROGPR. **The European GPR Association guidelines for pavement structural surveys**. [s.l.]: 2016.

FAUCHARD, C. *et al.* GPR performances for thickness calibration on road test sites. **NDT & E International**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 67–75, 2003.

FERNANDES, Francisco M.; PAIS, Jorge C. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 154, p. 1130–1138, 2017.

FRANÇOSO, Maria Teresa *et al.* Nondestructive testing in asphalt pavements using ground penetrating radar (GPR). **Applied Mechanics and Materials**, [s. l.], v. 303–306, p. 525–528, 2013.

FRANÇOSO, Maria Teresa *et al.* Modelagem numérica do uso do ground penetrating radar na investigação de defeitos em pavimentos flexíveis. **Transportes**, [s. l.], v. no prelo, 2020.

GONÇALVES, Fernando Pugliero; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. Utilização do ground penetrating radar na avaliação de pavimentos. In: ANAIS 1998, São Paulo. **Anais...** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31. São Paulo: ABPv, 1998.

GOODMAN, D.; NISHIMURA, Y.; TOBITA, K. GPRSIM Forward modeling software and time slices in ground penetrating radar simulations. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR 1994, Kitchener, Ontario. **Anais...** Kitchener, Ontario: Waterloo Centre of Groundwater Research, 1994.

GOODMAN, Dean. Ground - penetrating radar simulation in engineering and archaeology. **GEOPHYSICS**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 224–232, 1994.

GOODMAN, Dean. **GPRSIM**. Woodland Hills, CA: 2018.

GOOGLE EARTH. **Localização da pedreira Julio & Julio, 23 K 251905.98 m E 7397573.93 m S elevação 590 m**, 2019.

GRÉGOIRE, C. *et al.* **BRRC Method of Measurement ME 91/16: Methodologies for the use of ground-penetrating radar in road condition surveys**. Brussels: Belgian Road Research Center, 2016.

GROTE, K. *et al.* Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. **Journal of Applied Geophysics**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 129–153, 2005.

GSSI. **MN72-433 Rev M: SIR 3000 Manual**. Nashua, NH: Geophysical Survey Systems Inc., 2017.

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**. London.

HIRONAKA, M. C.; HITCHCOCK, R. D.; FORREST, J. B. **Detection of voids underground and under pavements**. Port Hueneme, California: Naval Civil Engineering Laboratory, 1976.

HOEGH, Kyle; DAI, Shongtao. Asphalt pavement compaction assessment using ground penetrating radar-arrays. In: PROCEEDINGS 2017, Duluth, Minnesota. **Anais...** . In: FIRST CONGRESS ON TECHNICAL ADVANCEMENT. Duluth, Minnesota .

JOL, Harry M. (ED.). **Ground penetrating radar: theory and applications**. 1. ed. United Kingdom: Elsevier Science, 2009.

KANE YEE. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 302–307, 1966.

KASSEM, Emad *et al.* Application of ground-penetrating radar in measuring the density of asphalt pavements and its relationship to mechanical properties. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 503–516, 2016.

KING, R. W. P.; SMITH, G. S. **Antennas in matter: fundamentals, theory, and applications**. [s.l.] : MIT Press, 1981.

KOVACS, A.; MOREY, R. M. **Detections of cavities under concrete pavement**. [s.l.]: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Department of the Army, 1983.

KRYSIŃSKI, Lech; SUDYKA, Jacek. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. **Journal of Applied Geophysics**, Ground Penetrating Radar. [s. l.], v. 97, Ground Penetrating Radar, p. 27–36, 2013.

LAHOUAR, Samer. **Development of data analysis algorithms for interpretation of ground penetrating radar data**. 2003. Tese (Doutorado) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2003.

LENG, Zhen. **Prediction of in-situ asphalt mixture density using ground penetrating radar: theoretical developmment and field verification**. 2011. Tese (Doutorado) - University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2011.

LENG, Zhen; AL-QADI, Imad L.; LAHOUAR, Samer. Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models. **NDT & E International**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 369–375, 2011.

LIU, Hai *et al.* Time-frequency analysis of air-coupled GPR data for identification of delamination between pavement layers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 154, p. 1207–1215, 2017.

LOIZOS, Andreas; PLATI, Christina. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. **NDT & E International**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 147–157, 2007.

LOPES, Osvaldo Antunes. **Uso do GPR (ground penetrating radar) em trechos de pavimentos da Cidade Universitária da UFRJ**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

LUQUE, Tábata Hoeger. **Origem e evolução do magmatismo no Maciço Granítico Sorocaba, SP: contribuições da geoquímica elementar e isotópica**. 2015. Tese (Doutorado) - IGc USP, São Paulo, 2015.

MACKAY, T. G.; LAKHTAKIA, A. Electromagnetic fields in linear bianisotropic mediums. In: **Progress in optics**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2008. v. 51.

MARA NORD PROJECT. **Recommendations for guidelines for the use of GPR in road construction quality control**. Rovaniemi: 2011.

MARA NORD PROJECT. **The use of GPR in road rehabilitation projects**. Rovaniemi: 2011.

MARA NORD PROJECT. **Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement**. Rovaniemi: 2011.

MASER, Kenneth R. Condition assessment of transportation Infrastructure using ground-penetrating radar. **Journal of Infrastructure Systems**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 94–101, 1996.

MEDINA, Jacques De; MOTTA, Laura Maria Goretti Da. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: 2005.

MOREY, R. M. **Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities: synthesis of highway practice 255**. Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program, 1998. a.

MOREY, R. M. **NCHRP Synthesis 255: Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1998. b.

NARBRO, Anita *et al.* **Mara Nord Project: Final report**. Rovaniemi: Rovaniemi University of Applied Sciences, 2012.

NCHRP. 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, 2004.

OLHOEFT, G. R.; CAPRON, D. E. Petrophysical causes of electromagnetic dispersion. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR 1994, Kitchener, Ontario. **Anais...** Kitchener, Ontario: Waterloo Centre of Groundwater Research, 1994.

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

PEDRET RODÉS, J.; PÉREZ-GRACIA, V.; MARTÍNEZ-REGUERO, A. Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 96, p. 181–188, 2015.

PELLINEN, T. *et al.* **Assessment of air void content of asphalt using dielectric constant measurements by GPR and with VNA: SCIENCE + TECHNOLOGY**. Helsinki: Aalto University, 2015.

PÉREZ, I.; MEDINA, L.; ROMANA, M. G. Permanent deformation models for a granular material used in road pavements. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 20, n. 9, p. 790–800, 2006.

PORSANI, Jorge Luis. **Ground penetrating radar: proposta metodológica de emprego em estudos geológico - geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP**. 1999. Tese (Doutorado) - IGCE UNESP, Rio Claro, 1999.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1997.

ROIMELA, P. **Using GPR and die lectric probe in pavement quality control**. 1997. University of Oulu, Oulu, 1997.

SAARENKETO, T.; SCULLION, T. **FHWA/TX-97/1341-2: Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates**. Arlington, Texas: Texas Transportation Institute, 1996.

SAARENKETO, Timo. Electrical properties of water in clay and silty soils. **Journal of Applied Geophysics**, [s. l.], n. 40, p. 73–88, 1998. a.

SAARENKETO, Timo. Electrical properties of water in clay and silty soils. **Journal of Applied Geophysics**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 73–88, 1998. b.

SAARENKETO, Timo. **Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys**. 2006. Tese (Doutorado) - Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Oulu, 2006.

SAARENKETO, Timo. NDT transportation. In: **Ground penetrating radar: theory and applications**. 1. ed. United Kingdom: Elsevier Science, 2009. p. 395–444.

SAARENKETO, Timo; SCULLION, Tom. Road evaluation with ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, [s. l.], v. 43, n. 2–4, p. 119–138, 2000.

SANDMEIER, Karl-Josef. **REFLEXW**. Karlsruhe: 2017.

SANTOS, E. J. F. *et al.* Avaliação geofísica com GPR de pavimento rígido de concreto de cimento Portland. In: ANAIS 2015, Bonito, MS. **Anais...** . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57 - CBC2015. Bonito, MS.

SCULLION, Tom; SAARENKETO, Timo. Using Suction and Dielectric Measurements as Performance Indicators for Aggregate Base Materials. **Transportation Research Record**, [s. l.], v. 1577, p. 37–44, 1997.

SEBESTA, S.; SCULLION, T.; SAARENKETO, T. **SHRP 2 S2-R06C-RR-1: Using infrared and high-speed ground-penetrating radar for uniformity measurements on new HMA layers**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013.

SEVGI, Levent. **Complex electromagnetic problems and numerical simulation approaches**. 1. ed. [s.l.] : Wiley-IEEE Press, 2010.

SHANG, J. Q. *et al.* Measurement of Complex Permittivity of Asphalt Pavement Materials. **Journal of Transportation Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 4, p. 347–356, 1999.

SHANGGUAN, Pengcheng *et al.* Algorithm development for the application of ground-penetrating radar on asphalt pavement compaction monitoring. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 189–200, 2016.

SHANGGUAN, Pengcheng; AL-QADI, Imad L. Calibration of FDTD simulation of GPR signal for asphalt pavement compaction monitoring. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 1538–1548, 2015.

SHIVOLA, Ari. **Electromagnetic mixing formulas and applications**. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999.

SILVA, Luís Anselmo Da. **Uso de georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos**. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2014.

SILVA, L. *et al.* Mapeamento com o GPR das interfaces geotécnicas do pavimento rígido do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro/RJ. In: ANAIS 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** . In: 12TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY & EXPOGEF. Rio de Janeiro: Brazilian Geophysical Society, 2011.

SOLLA, M. *et al.* Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. **NDT & E International**, [s. l.], v. 62, p. 55–65, 2014.

SOLLA, M.; LORENZO, H.; PÉREZ-GARCIA, V. 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, 2016. p. 89–107.

SOLLA, Mercedes *et al.* Uncertainty evaluation of the 1GHz GPR antenna for the estimation of concrete asphalt thickness. **Measurement**, [s. l.], v. 46, n. 9, p. 3032–3040, 2013.

SOUZA, Murilo Lopes De. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1981.

SUZUKI, Carlos Yukio; AZEVEDO, Angela Martins; KABBACH JUNIOR, Felipe Issa. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TAFLOVE, Allen; HAGNESS, Susan C. **Computational electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain method.** 3. ed. Boston: Artech House, 2005.

THE WORLD BANK (ED.). GDP ranking 2018. [s. l.], 2019.

TOSTI, F.; BENEDETTO, A. Pavement Pumping Prediction Using Ground Penetrating Radar. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, SIV-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures 2012. [s. l.], v. 53, SIV-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures 2012, p. 1044–1053, 2012.

TOSTI, Fabio; UMILIACO, Andrea. FDTD simulation of the GPR signal for preventing the risk of accidents due to pavement damages. **International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–9, 2014.

TREIBER, Heloisa Moraes; FRANÇOSO, Maria Teresa; ALMEIDA, Luiz Carlos De. Aplicações do ground penetrating radar na caracterização de estruturas de pavimento. In: ANAIS 2016, Porto, Portugal. **Anais...** . In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, XII - CINPAR 2016. Porto, Portugal

TURNER, G.; SIGGINS, A. F. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses. **Geophysics**, [s. l.], v. 59, n. 8, p. 1192–1200, 1994.

UTSI, Erica Carrick. **Ground penetrating radar: theory and practice.** United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2017.

VARELA-GONZÁLEZ, María *et al.* A semi-automatic processing and visualisation tool for ground-penetrating radar pavement thickness data. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 45, p. 42–49, 2014.

VENMANS, Arjan A. M.; VAN DE VEN, Robbert; KOLLEN, Jan. 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. [s. l.], v. 143, Advances in Transportation Geotechnics III, p. 1244–1251, 2016.

VIEIRA, Rubens; GANDOLFO, Otavio. Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (GPR). In: ANAIS 2013, Gramado. **Anais...** . In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42 / ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 16. Gramado: ABPv, 2013.

WANG, Siqi; ZHAO, Shan; AL-QADI, Imad L. Real-Time density and thickness estimation of thin asphalt pavement overlay during compaction using ground penetrating radar data. **Surveys in Geophysics**, [s. l.], 2019.

WARREN, Craig; GIANNOPOULOS, Antonios; GIANNAKIS, Iraklis. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. **Computer Physics Communications**, [s. l.], v. 209, p. 163–170, 2016.

ZHAO, Shan; AL-QADI, Imad L. Development of an analytic approach utilizing the extended common midpoint method to estimate asphalt pavement thickness with 3-D ground-penetrating radar. **NDT & E International**, [s. l.], v. 78, p. 29–36, 2016.

ZHAO, Shan; SHANGGUAN, Pengcheng; AL-QADI, Imad L. Application of regularized deconvolution technique for predicting pavement thin layer thicknesses from ground penetrating radar data. **NDT & E International**, [s. l.], v. 73, p. 1–7, 2015.

## APÊNDICE 1: Arquivos de entrada da simulação da propagação do sinal do GPR

Faixa B DNIT - Umidade ótima - GC = 60%:

```
#title: Faixa B DNIT - Umidade ótima - GC = 60%
#domain: 0.636 0.368 0.001
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 5e-9

#material: 6.0 0.00001 1 0 concreto
#material: 2.2 0.00001 1 0 madeira
#material: 13.17 0.00001 1 0 material_granular

#waveform: ricker 1 1.6e9 minha_ricker
#hertzian_dipole: z 0.288 0.278 0.000 minha_ricker
#rx: 0.346 0.278 0.000

#box: 0.000 0.000 0.000 0.636 0.100 0.001 concreto

#box: 0.100 0.100 0.000 0.536 0.118 0.001 madeira
#box: 0.100 0.118 0.000 0.118 0.268 0.001 madeira
#box: 0.518 0.118 0.000 0.536 0.268 0.001 madeira

#box: 0.118 0.118 0.000 0.518 0.268 0.001 material_granular

#box: 0.000 0.100 0.000 0.100 0.268 0.001 free_space
#box: 0.536 0.100 0.000 0.636 0.268 0.001 free_space
#box: 0.000 0.268 0.000 0.636 0.368 0.001 free_space
```

Faixa B DNIT - Umidade ótima - GC = 95%:

```
#title: Faixa B DNIT - Umidade ótima - GC = 95%
#domain: 0.636 0.368 0.001
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 5e-9

#material: 6.0 0.00001 1 0 concreto
#material: 2.2 0.00001 1 0 madeira
#material: 6.66 0.00001 1 0 material_granular

#waveform: ricker 1 1.6e9 minha_ricker
#hertzian_dipole: z 0.288 0.278 0.000 minha_ricker
#rx: 0.346 0.278 0.000

#box: 0.000 0.000 0.000 0.636 0.100 0.001 concreto

#box: 0.100 0.100 0.000 0.536 0.118 0.001 madeira
#box: 0.100 0.118 0.000 0.118 0.268 0.001 madeira
#box: 0.518 0.118 0.000 0.536 0.268 0.001 madeira

#box: 0.118 0.118 0.000 0.518 0.268 0.001 material_granular
```

```
#box: 0.000 0.100 0.000 0.100 0.268 0.001 free_space
#box: 0.536 0.100 0.000 0.636 0.268 0.001 free_space
#box: 0.000 0.268 0.000 0.636 0.368 0.001 free_space
```

Faixa B DNIT - Umidade ótima - GC = 100%:

```
#title: Faixa B DNIT - Umidade ótima - GC = 100%
#domain: 0.636 0.368 0.001
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 5e-9
```

```
#material: 6.0 0.00001 1 0 concreto
#material: 2.2 0.00001 1 0 madeira
#material: 5.43 0.00001 1 0 material_granular
```

```
#waveform: ricker 1 1.6e9 minha_ricker
#hertzian_dipole: z 0.288 0.278 0.000 minha_ricker
#rx: 0.346 0.278 0.000
```

```
#box: 0.000 0.000 0.000 0.636 0.100 0.001 concreto
```

```
#box: 0.100 0.100 0.000 0.536 0.118 0.001 madeira
#box: 0.100 0.118 0.000 0.118 0.268 0.001 madeira
#box: 0.518 0.118 0.000 0.536 0.268 0.001 madeira
```

```
#box: 0.118 0.118 0.000 0.518 0.268 0.001 material_granular
```

```
#box: 0.000 0.100 0.000 0.100 0.268 0.001 free_space
#box: 0.536 0.100 0.000 0.636 0.268 0.001 free_space
#box: 0.000 0.268 0.000 0.636 0.368 0.001 free_space
```

Faixa Drenante DER/SP - Umidade ótima - GC = 60%:

```
#title: Faixa Drenante DER/SP - Umidade ótima - GC = 60%
#domain: 0.636 0.368 0.001
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 5e-9
```

```
#material: 6.0 0.00001 1 0 concreto
#material: 2.2 0.00001 1 0 madeira
#material: 13.48 0.00001 1 0 material_granular
```

```
#waveform: ricker 1 1.6e9 minha_ricker
#hertzian_dipole: z 0.288 0.278 0.000 minha_ricker
#rx: 0.346 0.278 0.000
```

```
#box: 0.000 0.000 0.000 0.636 0.100 0.001 concreto
```

```
#box: 0.100 0.100 0.000 0.536 0.118 0.001 madeira
#box: 0.100 0.118 0.000 0.118 0.268 0.001 madeira
#box: 0.518 0.118 0.000 0.536 0.268 0.001 madeira
```

```
#box: 0.118 0.118 0.000 0.518 0.268 0.001 material_granular
```

```
#box: 0.000 0.100 0.000 0.100 0.268 0.001 free_space
#box: 0.536 0.100 0.000 0.636 0.268 0.001 free_space
#box: 0.000 0.268 0.000 0.636 0.368 0.001 free_space
```

Faixa Drenante DER/SP - Umidade ótima - GC = 95%:

```
#title: Faixa Drenante DER/SP - Umidade ótima - GC = 95%
#domain: 0.636 0.368 0.001
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 5e-9
```

```
#material: 6.0 0.00001 1 0 concreto
#material: 2.2 0.00001 1 0 madeira
#material: 6.93 0.00001 1 0 material_granular
```

```
#waveform: ricker 1 1.6e9 minha_ricker
#hertzian_dipole: z 0.288 0.278 0.000 minha_ricker
#rx: 0.346 0.278 0.000
```

```
#box: 0.000 0.000 0.000 0.636 0.100 0.001 concreto
```

```
#box: 0.100 0.100 0.000 0.536 0.118 0.001 madeira
#box: 0.100 0.118 0.000 0.118 0.268 0.001 madeira
#box: 0.518 0.118 0.000 0.536 0.268 0.001 madeira
```

```
#box: 0.118 0.118 0.000 0.518 0.268 0.001 material_granular
```

```
#box: 0.000 0.100 0.000 0.100 0.268 0.001 free_space
#box: 0.536 0.100 0.000 0.636 0.268 0.001 free_space
#box: 0.000 0.268 0.000 0.636 0.368 0.001 free_space
```

Faixa Drenante DER/SP - Umidade ótima - GC = 100%:

```
#title: Faixa Drenante DER/SP - Umidade ótima - GC = 100%
#domain: 0.636 0.368 0.001
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 5e-9
```

```
#material: 6.0 0.00001 1 0 concreto
#material: 2.2 0.00001 1 0 madeira
#material: 5.71 0.00001 1 0 material_granular
```

```
#waveform: ricker 1 1.6e9 minha_ricker
#hertzian_dipole: z 0.288 0.278 0.000 minha_ricker
#rx: 0.346 0.278 0.000
```

```
#box: 0.000 0.000 0.000 0.636 0.100 0.001 concreto
```

```
#box: 0.100 0.100 0.000 0.536 0.118 0.001 madeira
#box: 0.100 0.118 0.000 0.118 0.268 0.001 madeira
#box: 0.518 0.118 0.000 0.536 0.268 0.001 madeira
```

#box: 0.118 0.118 0.000 0.518 0.268 0.001 material\_granular

#box: 0.000 0.100 0.000 0.100 0.268 0.001 free\_space

#box: 0.536 0.100 0.000 0.636 0.268 0.001 free\_space

#box: 0.000 0.268 0.000 0.636 0.368 0.001 free\_space