



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

Jéssica de Souza Moreira

**ANÁLISE DA RESPOSTA DE GROUND PENETRATING
RADAR NA INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS - ESTUDO DE UM SÍTIO DE TESTE**

Dissertação n° 179

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Brasília-DF
2021

ANÁLISE DA RESPOSTA DE GROUND PENETRATING RADAR NA INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS- ESTUDO DE UM SÍTIO DE TESTE

Jéssica de Souza Moreira

Dissertação de Mestrado nº 179 apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências como requisito para o título de grau de Mestre em Geociências aplicadas e Geodinâmica.

Orientador: Dr. Welitom Rodrigues Borges

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha (Membro interno- IG/UnB)

Prof. Dr. Luís Anselmo da Silva (Membro externo-IFMT)

Brasília-DF
2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

DM838a DE SOUZA MOREIRA, JÉSSICA
ANÁLISE DA RESPOSTA DE GROUND PENETRATING RADAR NA
INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - ESTUDO DE UM SÍTIO
DE TESTE / JÉSSICA DE SOUZA MOREIRA; orientador WELITOM
RODRIGUES BORGES. -- Brasília, 2021.
83 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2021.

1. GPR. 2. Pavimentos asfálticos. 3. Sítio de Teste. 4.
SCGRAE-UEG. I. RODRIGUES BORGES, WELITOM, orient. II. Título.

“Science works on the frontier between knowledge and ignorance-not afraid to admit what we don’t know. There’s no shame in that. The only shame is to pretend that we have all the answers.”

(Neil Degrasse Tyson)

Aos meus amores: Luciano e Donna
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos que contribuíram com esse trabalho, seja com uma palavra amiga, seja com a discussão de dados ou com incentivo. Cheguei até aqui pois tive a oportunidade de conhecer e conviver com pessoas maravilhosas.

Primeiramente, agradeço ao professor Welitom pela orientação e paciência em me ensinar tanto. Obrigada por me apresentar à geofísica, pelo seu senso-crítico, perfeccionismo e sabedoria tão essenciais para o progresso dessa dissertação e também pela sua generosidade e empatia que me fizeram me sentir acolhida nesses anos de mestrado.

Agradeço ao professor Antônio Lazaro (UEG) não só por ceder o projeto e os equipamentos para a realização dessa dissertação, mas também pelo apoio, pela disposição em ajudar e por acreditar na minha capacidade (mesmo quando eu mesma não acreditava).

Agradeço à geofísica, mestre e amiga Maria Clara Lopes Paula por todo apoio na aquisição, processamento e discussão de dados. Obrigada pela disposição em discutir comigo (de forma entusiástica!) sobre o comportamento dos pulsos eletromagnéticos. Serei eternamente grata a você.

Ao Dr. Eduardo Seimetz que foi a primeira pessoa a me ensinar a mexer no GPR, com paciência e sempre disposição em compartilhar o que sabia.

Agradeço ao técnico Péricles por toda a disposição em me ajudar durante as etapas iniciais de aquisição de dados, além das conversas divertidas.

Aos alunos da Engenharia Civil da UEG: Luana, Lucas, Kylyvy e em especial à engenheira civil Fernanda Neves e família por me acolherem em Anápolis.

Às minhas melhores amigas geólogas e mestres/futuras mestres Danielli Marino (UnB), Estefânia Fernandes (UFMT), Fabiele Spode (UWA-AU), Marina Fernandes (USP) e Verônica Jorge (UFRN) que me auxiliaram nessa etapa tão difícil em plena pandemia, me oferecendo ombro-amigo virtual e também sanando eventuais dúvidas.

Agradeço também à querida geofísica e mestre Claudia Arraes (UFPA) pela discussão sobre os processamentos de dados de GPR.

Agradeço aos meus amigos engenheiros eletricitistas e mestres/futuro mestres Mateus Sachetti (UFSC) e Matheus Fogliatto (USP) pela paciência e disposição em me ajudar a solucionar meus problemas no Python.

Agradeço ao geólogo e mestre Bruno Scudeiro (UFMT) pela ajuda com o R e discussão dos dados estatísticos.

Agradeço aos amigos da república kikiki pela hospedagem em Brasília: Giulia, Márcia Caroline, Marcel, Nazaré e Raíssa.

Agradeço aos meus amigos da geofísica do grupo “Orientandos do Tom”, em especial a Amanda Rocha, Moara, Pedro Nogueira e Victória não só pelo acolhimento, mas também pelas discussões e viagens geofísicas comigo.

Agradeço também a pessoa responsável por me apresentar ao meu orientador e, conseqüentemente, a tudo relacionado ao meu mestrado: o geólogo e mestre Ciro Calachibete. Obrigada, sr Ciro, por insistir que eu deveria me candidatar no processo de seleção do programa de Geociências Aplicadas e Geodinâmica da UnB.

Agradeço a UnB e ao Instituto de Geociências, por me oferecer todo o suporte necessário para conclusão dessa dissertação e por me fazer me apaixonar ainda mais por essa universidade e pelas geociências. Obrigada a todos os professores em especial Dra. Roberta Vidotti e Dr Jeremie que contribuíram muito com a minha caminhada na pesquisa. Viva à Universidade Pública! Viva à Ciência!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, por isso, meu profundo agradecimento.

Agradeço ao Tribunal de Contas da União do Estado de Goiás pelo apoio tendo como base o convênio nº 001/2018 UEG/TCE-GO.

Agradeço também ao meu companheiro Luciano Basílio por todo o suporte emocional (e por vezes financeiro também) e incentivo durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço à Deus que em sua infinita sabedoria, me trouxe até aqui. Esse mestrado além da realização profissional e pessoal, me proporcionou conhecer pessoas especiais e viver momentos memoráveis que levarei comigo para sempre com muito carinho.

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados no estudo de infraestruturas de rodovias está relacionado à avaliação da qualidade dos pavimentos rodoviários de maneira prática, não-destrutiva e com o menor custo possível. As espessuras das camadas da estrutura do pavimento, não apenas do revestimento, serão fundamentais na definição da solução adequada para a sua recuperação. Nesse estudo é testado a aplicabilidade do método *ground penetrating radar* (GPR) na delimitação de camadas de pavimentos do Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicada à Engenharia da Universidade Estadual de Goiás (UEG). Os resultados com as campanhas geofísicas foram considerados satisfatórios pois possibilitaram a identificação de topo e base das 5 primeiras camadas com as antenas de 270, 400 e 900 MHz. A antena de 1600 MHz conseguiu delimitar apenas o topo-base das camadas CBUQ. O conjunto geomembrana e geotêxtil e a camada de concreto não foram identificados nos radargramas. A resolução de cada antena é 9.8 cm para 270 MHz, 6.0 cm para 400 MHz, 2.9 cm para 900 MHz e 1.6 cm para 1600 MHz. Com relação às estimativas de espessura das camadas, as antenas tiveram um percentual de eficiência de 83% (270 e 1600 MHz), 83,29% (400 MHz) e 84,40 % (900 MHz). As estimativas de espessura de camadas obtidas pelas antenas de GPR foram comparadas com a espessura real usando um teste t pareado ($\alpha= 0.05$). Nenhuma diferença significativa na espessura das camadas foi observada para as antenas GPR versus espessura real. Para complementar a identificação das camadas realizada pela interpretação de camadas, foi analisada a intensidade do envelope do sinal. Embora a Transformada de Hilbert seja bastante utilizada para identificar regiões onde a amplitude varia, nesse caso, não foi possível identificar todas as camadas, com todas as frequências.

Palavras-chave: GPR; pavimento asfáltico; SCGRAE-UEG

ABSTRACT

The major challenges in the road infrastructure studies are related to the evaluation of road pavements quality in a practical, non-destructive, and low-cost way. Informations about the thickness of the layers are fundamental to repair pavements. In this study the applicability of ground penetrating radar method in the delimitation of pavements layer at the Shallow Geophysical Test Site Applied to Engineering of Universidade Estadual de Goiás (UEG) is tested. The ground penetrating radar present satisfactory results, identifying the top and base of the first 5 layers with of 270, 400 and 900 MHz antennas. The 1600 MHz antenna was able to delimit only top-base of the CBUQ layers. The geomembrane with geotextile set and concrete layer were not identified in the radargrams. The resolution of each antenna is 9.8 cm for 270 MHz, 6.0 cm for 400 MHz, 2.9 for 900 MHz, and 1.6 cm for 1600 MHz. Concerning layers thickness estimates, the antennas had an efficiency percentage of 83 % (270 and 1600 MHz), 83,29 % (400 MHz), and 84,40 % (900 MHz). Layers thickness estimates obtained from GPR antennas were compared with true thickness using a paired t test ($\alpha= 0.05$). No significant differences in layers thickness were observed for the GPR antennas versus true thickness. To complement the identification of layers, in addition to the visual interpretation of radargrams, was analyzed the envelope trace. The envelope trace shows the intensity of energy signal and allow to visualize changes of amplitudes are significative. Although the Hilbert's Transform is a useful tool to identify regions where the amplitude change, in this case, it was not possible to distinguish the boundaries from all the layers with all the used frequencies.

Keywords: GPR; asphaltic pavement, SCGRAE-UEG

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1-----	1
CAPÍTULO 2-----	4
2.1 APLICAÇÃO DO GROUND PENETRATING RADAR NA INVESTIGAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS-----	4
2.2 TEORES DE UMIDADE E VAZAMENTOS EM ASFALTOS-----	5
2.3 DENSIDADE DE CAMADAS-----	7
2.4 LOCALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DETERIORAÇÃO DE CONCRETOS-----	7
2.5 LOCALIZAÇÃO DE OBJETOS ENTERRADOS EM INFRAESTRUTURAS URBANAS-----	8
2.6 ESTIMATIVA DE ESPESSURAS DE CAMADAS DE PAVIMENTOS-----	10
CAPÍTULO 3-----	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA-----	13
3.1 GROUND PENETRATING RADAR-----	13
3.1.1 Equações de Maxwell- comportamento das ondas eletromagnéticas-----	13
3.1.2 Relações constitutivas -----	15
3.1.3 Propagação das ondas no domínio do tempo-----	18
3.1.4 Propriedades das ondas-----	19
3.1.5 Técnicas de aquisição-----	24
3.1.6 Parâmetros de aquisição-----	27
3.1.7 Aquisição 3D e aquisição quase-3D-----	32
3.2 PAVIMENTO-----	32
3.2.1 Revestimentos-----	34
3.2.2 Bases e sub-bases granulares-----	34
3.2.3 Bases e sub-bases estabilizadas (com aditivos) -----	34
3.2.4 Enrocamento-----	35
3.2.5 Geossintéticos/Geomembranas-----	35
3.2.6 Colchão drenante-----	35
CAPÍTULO 4-----	36

4 MATERIAIS E MÉTODOS-----	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA E PEDOLÓGICA-----	37
4.1.1 Aspectos Geológicos-----	37
4.1.2 Aspectos Geomorfológicos-----	37
4.1.3 Aspectos Pedológicos-----	37
4.2 INSTALAÇÃO DOS PAVIMENTOS-----	38
4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR-----	39
CAPÍTULO 5-----	41
5 Ground Penetrating Radar applied to asphaltic pavements- a study in controlled environment -----	41
5.1 INTRODUCTION -----	42
5.2 METHODOLOGY-----	43
5.2.1 Study Area-----	43
5.2.2 Data acquisition-----	46
5.2.3 Data processing. -----	46
5.3 RESULTS AND DISCUSSION-----	47
5.3.1 Signal analysis-----	47
5.3.1.1 Line 1A-----	47
5.3.1.1 Line 1B-----	48
5.3.2 Reflection pattern analysis-----	49
5.3.3 Velocities estimates from GPR-----	53
5.3.4 Layers thickness estimates and Paired t test-----	53
5.4 CONCLUSIONS-----	54
CAPÍTULO 6-----	58
6 DISCUSSÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES -----	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Radargrama de uma antena de 2000 MHz identificando a assinatura de espaços vazios (à esquerda e à direita) em concretos. Extraído de Lai et al., (2017). -----	8
Figura 2.2 À esquerda um esquema representativo do tempo de chegada das ondas EM no objeto enterrado e sua respectiva reflexão. Seção de GPR (à direita) mostrando o típico sinal em forma de hipérbole gerado a partir da reflexão de um cano. Extraído de Vieira & Gandolfo (2014). -----	9
Figura 2.3 À esquerda uma seção esquemática típica de um pavimento e à direita seu respectivo radargrama, mostrando os refletores das camadas. Extraído de Vieira & Gandolfo (2014). -----	11
Figura 3.1 Representação das ondas eletromagnéticas no espaço livre em que o campo elétrico E^- é ortogonal ao campo magnético H^- -----	14
Figura 3.2 Ilustração das sequências de campo que se auto-perpetuam: campo magnético atual que induz um campo elétrico que, por sua vez, gera o movimento de carga elétrica. Extraído de Annan (2003). -----	20
Figura 3.3 Representação esquemática de uma onda. O comprimento de onda λ e A é a amplitude. -----	20
Figura 3.4 Relações entre a atenuação e a frequência sob diferentes condutividades. Extraído de Davis & Annan (1989). -----	21
Figura 3.5 Relação empírica da constante dielétrica do solo em função do teor volumétrico e a velocidade da onda EM de acordo com essas variáveis. Essa relação é mais aplicável em uma faixa de frequência de 50 MHz à 1000 MHz. Extraído de Annan (2003). -----	22
Figura 3.6 Quando um sinal incide em uma camada, os sinais são parcialmente transmitidos (T1, T2 e T3) e refletidos (R1, R2 e R3). Extraído de Annan (1992). -----	23
Figura 3.7 Ilustração esquemática de uma aquisição <i>commom offset</i> com antenas não blindadas. -----	25
Figura 3.8 Ilustração de aquisições <i>commom midpoint-CMP</i> (à esquerda) e <i>widle-angle reflection and refraction-WARR</i> (à direita) com antenas não blindadas. -----	25

Figura 3.9 Ilustração de aquisições do tipo (A) transiluminação em <i>commom-offset</i> , (B) tomografia, (C) transiluminação <i>vertical radar profiling</i> e (D) transiluminação variável. -----	27
Figura 3.10 Tipos de resoluções do GPR: longitudinal e lateral. -----	28
Figura 3.11 Comparação entre uma amostragem de tempo equivalente e uma amostragem de tempo real. Nota-se que na amostragem de tempo real o intervalo de amostragem (Δt) permite uma reconstrução mais criteriosa e precisa do traço (um pulso típico do GPR). Extraído e adaptado de Koppenjan (2009). -----	31
Figura 3.12 Perfil transversal da disposição de camadas de um pavimento asfáltico. Extraído de Confederação Nacional de Transportes (2017). -----	33
Figura 4.1 Localização da área de estudo. Imagem do satélite BING. Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000. À esquerda a localização da área de estudo em escala nacional e estadual e à direita a localização do sítio geofísico em relação ao campus da UEG, em Anápolis-GO. -----	36
Figura 4.2 Fotos evidenciam as escavações realizadas no campus da UEG (Anápolis, GO) para instalação dos alvos geotécnicos-----	38
Figura 4.3 Representação gráfica da disposição das camadas de materiais programados para instalação nas linhas 1A e 1B-----	39
Figura 4.4 (A): foto evidencia a aquisição de dados de GPR com o sistema SIR 4000 acoplado a uma antena blindada de 1600 MHz na linha 1A. (B): foto com os pavimentos linha 1A e linha 1B-----	40
Figura 5.1 Location map of SCGRA: (A) State of Goiás-Brazil, (B) the State University of Goiás-Campus Anápolis and (C): Shallow Geophysical Test Site with the investigated line highlighted in red.-----	43
Figura 5.2 Sketch of the SCGRA containing line 1 (flexible pavement). (A): profile of line 1A; (B) cross-sectional profile of line 1A; (C): profile of line 1B and (D): cross-sectional profile of line 1B. Note: the thickness of the layers is an average, since the thicknesses vary a few centimeters in some sections. Measures are given in centimeters. -----	44
Figura 5.3 Processing adopted to GPR datas with illustration of result of each step: (A) raw data, (B) set time zero, (C) mean filter, (D) background removal, (E) data with gain function, and (F) dewow. -----	45
Figura 5.4 Digital amplitudes of L1A pavement acquired with 270, 400, 900, and 1600 MHz. -----	47

Figura 5.5 Digital Amplitudes of line 1 B pavement acquired with 270, 400, 900, and 1600 MHz antennas. -----48

Figura 5.6 Radargram sections with 4 frequency antennas. (A) 270 MHz antenna, (B) 400 MHz antenna, (C) 900 MHz antenna, and (D) 1600 MHz antenna. -----51

Figura 5.7 Radargram profiles with its layers interpretation. (A) 270 MHz antenna, (B) 400 MHz antenna, (C) 900 MHz antenna, and (D) 1600 MHz antenna. L1A= line 1 A, L1B= Line 1 B.-----52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Dados de velocidade da onda EM nos materiais segundo Daniels (1996); Gonçalves & Ceratti (1998); Cao et al., (2007) e Silva (2014). -----	11
Tabela 3.1 Constante dielétrica K, condutividade elétrica σ , velocidade v e atenuação α de alguns materiais, de Davis & Annan (1989). -----	21
Tabela 3.2 Frequência central da antena versus profundidade de investigação (Annan, 1992). -----	29
Tabela 5.1 Acquisition parameters used in this work. -----	45
Tabela 5.2 Wavelength of each center frequency. Velocity medium: 0.04 m/ns. -----	53
Tabela 5.3 Travel time and velocities of the layers identified from the average of the real thickness and radargrams obtained with the frequency antennas 270, 400, 900, and 1600 MHz on line 1A. ** It was not possible to calculate the layer velocity. -----	53
Tabela 5.4 Travel time and velocities of the layers identified from the average of the real thickness and radargrams obtained with the frequency antennas 270, 400, 900, and 1600 MHz on line 1B. ** It was not possible to calculate the layer. -----	54
Tabela 5.5 Layers thickness estimated obtained from GPR and true thickness (average). Measures are given in centimeters. -----	54
Tabela 5.6 Results from t test analysis for line 1 A and line 1 B.-----	54

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários são os elementos que exigem investimentos mais caros tanto na etapa de construção de estradas quanto durante as operações de manutenção (Pereira & Pais, 2017). Em vista disso, um dos frequentes desafios enfrentados atualmente no estudo de infraestruturas de rodovias é como avaliar a qualidade e prever a vida útil dos materiais que compõem os pavimentos rodoviários de forma prática, não-destrutiva e com o menor custo possível.

A qualidade dos pavimentos diz respeito não somente ao conforto e a segurança dos passageiros que trafegam nas vias rodoviárias, como também na economia do país (CNT, 2017). Mais de 60% das cargas que circulam no país utilizam as vias rodoviárias, em especial produtos do agronegócio, responsáveis por 30% do produto interno bruto do Brasil (PIB).

Em 2018 no Brasil, segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), 57 % dos pavimentos observados apresentaram qualidade regular, ruim ou péssima enquanto o percentual avaliado em 2017 foi de 61,8%. De acordo com o CNT (2017) o principal responsável pelo precoce desgaste das estruturas dos pavimentos no Brasil é a falta de manutenção adequada.

Esse desgaste precoce é responsável por uma série de acidentes no trânsito, aumento de tempo de viagem e consumo desnecessário de combustível. Dados apresentados no trabalho “Transporte Rodoviário- Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?” pela CNT (2017) diz que cerca de 775 milhões de litros de diesel são consumidos em excesso graças às condições inadequadas das rodovias, gerando uma despesa adicional de 2,34 bilhões de reais para os transportadores.

Infelizmente esse problema não se aplica somente ao Brasil. Na Europa o consumo de energia pelo transporte ocupa o terceiro lugar no ranking de energia total consumida, ficando atrás somente da indústria e das residências familiares (Pereira & Pais, 2017). Uma medida de prevenção do desgaste precoce dos pavimentos rodoviários pode ser feita com o

acompanhamento mais contínuo das condições das estruturas dos pavimentos construídos. Atualmente, os métodos utilizados comumente exigem um alto investimento público.

Sendo assim, a compreensão da estrutura das camadas que compõem os pavimentos é bastante valiosa para estimar a capacidade do pavimento, bem como prever sua vida útil (AL-Qadi & Lahouar, 2005) e para os trabalhos de fiscalização contra a deterioração precoce causado, por exemplo, pelo mau dimensionamento das camadas ou problemas construtivos. Informações como a espessura das camadas de revestimento, sub-base e profundidade da superfície do subleito são fundamentais na definição da solução adequada para a recuperação de pavimentos (Loizos & Plati, 2007; Silva, 2014). Quando se trata de pavimentos flexíveis a espessura e a densidade de camadas são as duas características mais importantes a serem monitoradas (Leng & Al Qadi, 2011).

Para o DNIT (Brasil, 2006), o pavimento de uma rodovia pode ser entendido como uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras definidas sobre um semiespaço conhecido como subleito. Alguns métodos convencionais para verificação da qualidade do pavimento exigem a retirada de corpos-de-prova dos revestimentos ou abertura de trincheiras e por vezes são considerados morosos, caros e destrutivos (Faria, 2010; Dong *et al.*, 2016). Diante desse cenário os métodos geofísicos, conhecidos pelas suas técnicas não invasivas de rastreamento da subsuperfície, tornam-se uma opção viável e uma importante ferramenta para a geologia de engenharia e para a engenharia civil. Não podem, todavia, serem entendidos como substitutos dos métodos diretos, mas sim como um instrumento complementar que pode reduzir consideravelmente os custos e a necessidade de ensaios diretos.

Em estudos de obras de infraestrutura rodoviária o método que alcançou destaque é o *ground penetrating radar* (GPR) ou conhecido também como georadar. Este é comumente escolhido pela sua praticidade e rapidez na aquisição de dados, além da agilidade no processamento dos mesmos. Seu produto final fornece uma imagem de alta resolução com detalhes da subsuperfície (Annan, 2001; Silva, 2014).

A aplicação do GPR em estudos de infraestruturas de transporte ocorre desde 1970, principalmente na avaliação das condições de pavimentos, fundações, pilares e estudos de subsuperfície do solo (Maser, 1996). O método possui familiaridade com os princípios da perfilagem sísmica de reflexão e consiste na utilização de campos eletromagnéticos para identificar estruturas e mudanças nas propriedades da subsuperfície (Kearey *et al.*, 2009). Baseia-se na emissão de ondas eletromagnéticas a partir de uma antena transmissora, que propagam através de um material a uma velocidade determinada primordialmente pela

permissividade do material. Cassidy (2009) define a permissividade como uma constante física que diz respeito a capacidade que determinado material tem de armazenar e liberar energia eletromagnética sob a forma de carga elétrica.

O contraste de reflexões dos sinais eletromagnéticos dos diferentes materiais investigados fornece uma imagem de radargrama da subsuperfície. Esse contraste de reflexão ocorre graças a constante dielétrica, que é o comportamento que um determinado material tem quando é submetido a um campo elétrico. Essa propriedade está intimamente relacionada à permissividade elétrica do material (Butnor *et al.*, 2013).

No estudo de pavimentos, a constante dielétrica de um concreto asfáltico depende da constante dielétrica de seus constituintes e também da sua fração volumétrica. Ela é frequentemente utilizada para calcular a velocidade das ondas EM do GPR em camadas do pavimento com objetivo de determinar as espessuras dessas camadas e pode ser calculada medindo a amplitude dos picos da forma de onda correspondentes às reflexões das interfaces entre elas (Maser, 1996; Maser & Carmichael, 2015).

Diante disso, será abordada neste trabalho uma comparação das respostas geofísicas pelo método georadar de dois pavimentos asfálticos. Os pavimentos escolhidos para o trabalho, fazem parte do projeto Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicada à Engenharia da Universidade Estadual de Goiás (UEG), idealizado pela UEG (Campus Anápolis) em conjunto com o Tribunal de Contas do Estado de Goiás e com a colaboração de pesquisadores da Universidade de Brasília. Apesar desses pavimentos não serem fieis aos pavimentos tradicionais (em espessuras e configuração), os materiais que compõem as camadas desses pavimentos são amplamente utilizados em pavimentos asfálticos.

O intuito é distinguir as camadas dos pavimentos a partir da reflexão e de velocidade de propagação da onda EM (eletromagnética), além de padronizar uma interpretação visual baseada nas diferentes texturas do radargama, potencializando a utilização do método no monitoramento de obras de infraestrutura rodoviária, reduzindo, portanto, a necessidade de futuros ensaios destrutivos.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O *Ground Penetrating Radar* (GPR), georadar ou radar de penetração no solo é um método eletromagnético que se baseia na emissão de pulsos de ondas eletromagnéticas e no tempo de chegada desses pulsos na antena receptora depois de se propagarem em determinados meios. As propriedades físicas dos materiais tais como condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética são fatores que afetam diretamente a propagação das ondas eletromagnéticas (EM) e conseqüentemente, nas respostas do GPR (Davis & Annan, 1989; Annan, 2003; Annan, 2009)

A princípio, este método era aplicado somente em materiais geológicos (como por exemplo geleiras) mas atualmente é usado em outros materiais como a madeira, o concreto e o asfalto, tendo também sua aplicação na arqueologia (Conyers, 2011; Dojack, 2012; Liu *et al.*, 2017) e estudos forenses. Em projetos de infraestrutura de transportes a aplicação do GPR data desde 1970, principalmente na avaliação das condições de pavimentos, fundações, pilares e estudos de subsolo (Maser, 1996). Com o aumento exponencial do processo de urbanização, o investimento em técnicas não destrutivas para avaliação de estruturas de transporte rodoviária se torna cada vez mais indispensável. Métodos como o GPR podem diminuir efetivamente a necessidade de intervenções destrutivas e conseqüentemente gastos e desconforto social.

2.1 APLICAÇÃO DO *GROUND PENETRATING RADAR* NA INVESTIGAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

A utilização do georadar em pavimentos ocorre de quatro formas, resumidamente: (1) em campanhas de sondagens com intuito de construir uma nova estrada, (2) na reforma de

uma estrada pré-existente, (3) no controle da qualidade de um projeto rodoviário e (4) na pesquisa para sistemas de pavimentos e afins (Saarenketo, 1992; 2009).

Vários fatores que desencadeiam a degradação estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis podem estar relacionados tanto a problemas na construção do pavimento quanto durante o uso das vias (sobrecargas de tráfegos). Em alguns casos, podem gerar patologias tais como: rachaduras, delaminações e buracos na superfície asfáltica e cavidades no interior do pavimento (Benedetto *et al.*, 2004; Cao *et al.* 2007; Diamanti & Redman, 2012; Tosti & Benedetto, 2012; Dong *et al.*, 2016; Laguela *et al.*, 2018).

Estruturas degradadas presentes em pavimentos rodoviários (Benedetto *et al.*, 2004; Colagrande *et al.*, 2011; Tosti & Benedetto, 2012; Benedetto *et al.*, 2016; Laguela *et al.*, 2018) e pistas de aeroportos (Borges *et al.*, 2014) que comprometem a sua capacidade de suportar cargas podem ser identificadas com o georadar. A utilização de um método não destrutivo para controle de qualidade e identificação dessas patologias é importante para evitar possíveis desgastes, diminuição da vida útil dos mesmos e até mesmo a necessidade de intervenções diretas e destrutivas (como furos de sondagens).

Benedetto *et al.* (2004) reuniram em uma tabela uma série de danos e causas de defeitos nos pavimentos, com sugestões de aplicabilidade do GPR (classificado como “possível aplicação”, quando há registros do uso na literatura e “aplicação potencial”, quando o equipamento pode ser usado como diagnosticador). No trabalho foram considerados 18 tipos de danos e 43 possíveis causas de deterioração de pavimentos, correlacionando-os com características da reflexão radar de duas antenas: de 600 MHz e de 1600 MHz. Segundo eles, com essa verificação cruzada é possível diagnosticar as rachaduras ocasionadas pela intrusão de água, solo siltoso ou uma compactação inadequada, uma vez que os valores da permissividade dielétrica, a amplitude e a fase do sinal de GPR muda de acordo com esses fatores.

2.2 TEORES DE UMIDADE E VAZAMENTOS EM ASFALTOS

Em muitos casos a presença de água é um desencadeador de deteriorações como por exemplo, o descascamento superficial dos pavimentos, rachaduras entre outros (Maser, 1996; Benedetto *et al.*, 2004; Tosti & Benedetto, 2012; Plati & Loizos, 2013). Portanto, identificar possíveis vazamentos ou infiltrações de água em pavimentos asfálticos e de concreto torna-se

uma medida preventiva de suma importância, evitando deteriorações e conseqüentemente gastos e acidentes.

Algumas pesquisas afirmam que aparentemente, o fator que mais influencia nas propriedades eletromagnéticas dos materiais de pavimentos não está ligado diretamente ao tipo de ligante, agregado ou da densidade, mas sim ao teor de umidade (Scullion *et al.* 1994; Fauchard *et al.*, 2003; Plati & Loizos, 2013). A constante dielétrica de rochas e solos é muito variável de acordo com seu teor de umidade presente porque a constante dielétrica da água é muito alta ($K= 80$) comparada com demais materiais (Topp *et al.*, 1980; Scullion *et al.*, 1994; Daniels, 1996; Greaves *et al.*, 1996; Hu, 2015; Bai *et al.*, 2017; Laguela *et al.*, 2018). Essa afirmativa pode ser estendida para pavimentos, uma vez que são constituídos por uma gama de materiais diferentes e espaços vazios.

Tradicionalmente há pelo menos três modelos de estimativas de teor de umidade em materiais aplicados a partir do método GPR: a equação de Topp (Topp *et al.*, 1980), a equação de Roth (Roth *et al.*, 1990) e o *Complex Refractive Index Model*- CRIM (Maser & Scullion, 1992). A equação numérica e empírica de Topp relaciona o teor de umidade nos solos com a permissividade ou a constante dielétrica. O *Complex Refractive Index Model* determina o teor de umidade de dado material levando em consideração a sua densidade e constante dielétrica e a equação semi empírica de Roth inclui volume e constante dielétrica de cada constituinte na sua equação (Cao *et al.*, 2008).

Em sistemas de GPR com antenas acopladas é comum utilizar o tempo de viagem e amplitude do sinal eletromagnético para estimar o teor de umidade em camadas asfálticas e identificar as áreas com alto teor de água, em especial quando esses meios são considerados de baixa perda de sinal. A amplitude da onda EM diminui com o maior afastamento da fonte e em meios muito condutivos (Grote *et al.*, 2005). Para estimar a velocidade a partir de reflexões GPR, tanto o caminho de percurso (profundidade) e o tempo de viagem da onda eletromagnética devem ser conhecidos (Greaves *et al.*, 1996, Grote *et al.*, 2002; Grote *et al.*, 2005, Derobert *et al.*, 2008; Benedetto, 2010; Benedetto & Benedetto, 2014).

Nas imagens de GPR, os vazamentos de água em tubos possuem assinaturas em formas distorcidas e por vezes pode ser difícil discernir com acurácia entre as regiões vazias e um ambiente de vazamento complexo (Demirci *et al.*, 2012). Além disso, a presença de água e sais minerais influencia diretamente na propagação das ondas eletromagnéticas e, em muitos casos pode inclusive, atenuar o sinal do GPR, diminuindo a eficácia do método (Dourado *et al.*, 2003; Evans *et al.*, 2007, Bai & Sinfield, 2017; Laguela *et al.*, 2018).

2.3 DENSIDADE DE CAMADAS

Um outro importante parâmetro na fiscalização de pavimentos asfálticos é a densidade das camadas. A constante dielétrica aumenta de acordo com o aumento da densidade, dessa forma é possível detectar delaminações de asfaltos e cavidades nos pavimentos (Cao *et al.*, 2008; Leng & Al-Qadi, 2011; Plati & Loizos, 2013; Benedetto & Benedetto, 2014).

A densidade pode passar por mudanças depois de ser submetida ao tráfego e uma mistura com estrutura e compactação adequadas prevenirá infiltrações de água ou ar em espaços vazios presentes nas misturas asfálticas. De maneira geral, a densidade influencia em dois aspectos: primeiro no nível de compactação e em segundo na determinação se há necessidade de uma compactação adicional (Ameri *et al.*, 2014).

Os métodos mais tradicionais para medir a densidade do meio à partir de georadares são o *Complex Refractive Index Model*, o *Rayleigh Model* e o *Bottcher Model*. Esses modelos consideram que a constante dielétrica das misturas asfálticas depende da constante dielétrica e do volume das propriedades dos seus componentes (Leng & Al-Qadi, 2011). A partir de ajustes no modelo *Bottcher* foi criado um modelo novo e atualizado para calcular a gravidade específica em massa (Gmb) foi proposto por Leng & Al-Qadi, (2011), chamado de modelo ALL (Diamanti *et al.*, 2018).

2.4 LOCALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DETERIORAÇÃO DE CONCRETOS

O concreto é um material poroso e heterogêneo, com poros preenchidos com solução eletrolítica e considerado um material dielétrico que armazena energia quando é exposto a uma onda eletromagnética (Robert, 1998; Jamil *et al.*, 2013). Os principais defeitos no pavimento de concreto foram relatados como vazios sob articulações, corrosões (Dérobert *et al.*, 2008); rachaduras e delaminações (Saarenketo & Scullion, 2000; Saarenketo, 2009).

O GPR costuma ser usado também na localização de vigas e vergalhões nas estruturas de concretos (Barrile & Pucinotti, 2005; Chang *et al.*, 2009; Stryk *et al.*, 2013), tendo conhecimento da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no concreto seco. Na detecção de vazios, o GPR costuma ser uma técnica confiável (Cao *et al.*, 2007). O maior desafio da aplicação do GPR para esse estudo, entretanto, é o conteúdo de água e também o

tamanho desse vazio, uma vez que vazios menores que 15 mm são de difícil detecção (Saarenketo & Scullion, 1994; Saarenketo & Scullion, 2000, Benedetto & Benedetto, 2014).

Como uma das deteriorizações mais comuns nos pavimentos de concreto é a perda de base nas articulações por causa dos vazios gerados por processos de corrosão de vergalhões (Maser, 1996; Robert, 1998; DeRobert *et al.*, 2008; He *et al.*, 2009; Zaki *et al.*, 2015; Senin & Hamid, 2016; Lai *et al.*, 2017), a detecção desses alvos é considerada muito importante quando se trata em investigação de qualidade dos concretos.

A assinatura característica das barras de aço ou vergalhões aparece em forma de hipérbolas nos radargramas (Figura 2.1) e sua posição pode ser identificada como o pico da hipérbole. Isso acontece porque o sinal do radar tem a forma de um cone amplo e detecta o vergalhão de diferentes ângulos, registrando a localização do vergalhão como se fosse abaixo do traço. A largura observada de uma hipérbole é resultado do número de *scans* (traços) por unidade de comprimento, da profundidade do vergalhão correspondente e da velocidade da onda eletromagnética do radar (Chang *et al.*, 2009; Stryke *et al.*, 2013; GSSI, 2017; Dinh *et al.*, 2018).

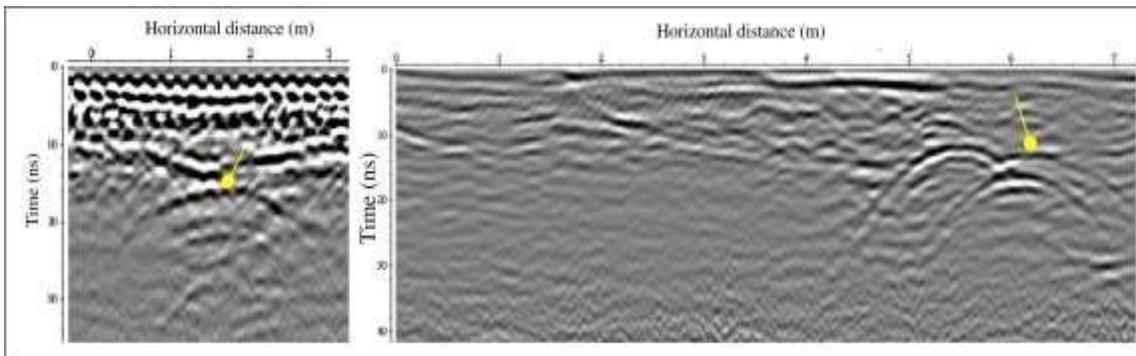


Figura 2.1 Radargrama de uma antena de 2000 MHz com a assinatura de espaços vazios (à esquerda e à direita) em concretos. Extraído de Lai *et al.*, (2017).

Um dos métodos de se obter informações como tamanho, posicionamento (profundidade) e raio dos vergalhões é através da extração da amplitude de reflexão do ápice de cada hipérbole e, posteriormente, a migração desses dados (Dinh *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2018). A migração é um processo que coloca a posição espacial correta do refletor através da redução da hipérbole de difração (Barrile & Pucinotti, 2005). Há três principais técnicas de migração: a soma das difrações (Método de Kirchhoff), o método das diferenças finitas e migração no domínio F-K.

2.5 LOCALIZAÇÃO DE OBJETOS ENTERRADOS EM INFRAESTRUTURAS URBANAS

Em projetos urbanos é comum ter objetos enterrados no subsolo tais como tubos de distribuição de água (Pinto, 2010; Ayala-Cabrera *et al.*, 2011), dutos, cabos de energia elétrica, galerias de água pluvial, entre outros. Uma intervenção em áreas urbanas sem o conhecimento prévio da localização exata desses objetos pode causar diversos tipos de transtornos (Annan, 2003; Rashed & Al-Garni, 2012). Por exemplo, a execução de uma obra de manutenção que, sem saber da localização exata de linhas de energia acaba atingindo-as, podem causar acidentes e até mesmo a morte de pessoas, além de interromper o fornecimento de energia elétrica.

De acordo com os princípios da geometria óptica, o sinal da antena consegue identificar objetos que possuem dimensões maiores que o comprimento de onda do sinal de GPR. Os alvos pequenos são geralmente detectados com antenas de alta frequência, já as antenas de baixa frequência são usadas para alvos maiores (Yelf, 2007; Benedetto & Benedetto, 2014). Alguns objetos enterrados apresentam um forte contraste de propriedade dielétrica e podem formar hipérboles (Figura 2.2) causadas pela difração das ondas eletromagnéticas nesses materiais (Hayakawa & Kawanaka, 1998; Olhoeft, 2000; Dourado *et al.*, 2003; Bristow, 2009; Vieira & Gandolfo, 2013; Dias & Filho, 2017; Prego *et al.*, 2017) ou formas diferentes (Benedetto & Benedetto, 2014).

Alguns alvos apresentam reflexões diferentes de acordo com algumas propriedades do objeto, como tamanho, profundidade e composição e diferença de constantes dielétricas com outro meio. Alvos metálicos costumam ser bons refletores e objetos não metálicos, como tubos de PVC, geralmente produzem sinais muito mais fracos (Olhoeft, 2002; Annan, 2003; Benedetto *et al.*, 2004; Yelf, 2007; Pinto, 2010, Ayala-Cabrera *et al.*, 2011; Benedetto *et al.*, 2016).

Algumas pesquisas mostraram resultados da identificação de tambores ou dutos preenchidos com ar, água doce, e água salgada com o método GPR (Zeng *et al.*, 1997; Rodrigues, 2004) ou tambores dentro de resíduos de óleos lubrificantes (Borges *et al.*, 2006). As amplitudes das reflexões do contato dos fluídos com as superfícies dos dutos em alguns casos podem ou não ser distinguíveis, dependendo muito da diferença entre as propriedades físicas nas interfaces. Sem essas diferenças nas propriedades elétricas, nenhuma energia será refletida nas interfaces (Scullion *et al.*, 1994; Rodrigues & Porsani, 2006). Um tambor com água salgada, por exemplo, pode atenuar o sinal da onda eletromagnética por ser um meio bastante condutivo (Lagueta *et al.*, 2018).

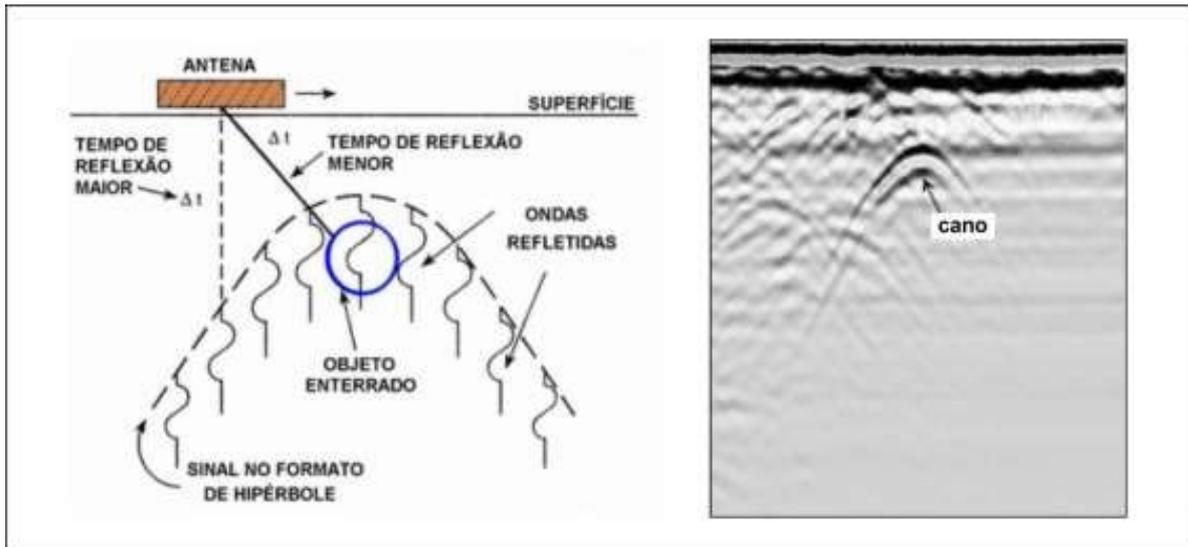


Figura 2.2 Esquema representativo do tempo de chegada das ondas EM no objeto enterrado e sua respectiva reflexão (esquerda). Radargrama (à direita) evidencia o típico sinal em forma de hipérbole gerado a partir da reflexão de uma tubulação (Vieira & Gandolfo, 2013).

O uso da forma da hipérbole (raio da curvatura no pico) para determinar o tamanho do objeto enterrado é limitado pelo posicionamento, heterogeneidade do meio e do conhecimento prévio do padrão das antenas na área (Olhoeft, 2000). Além disso, a direção do perfil nas campanhas (paralelo ou longitudinal à direção do objeto) e os parâmetros utilizados na aquisição dos dados (como frequência central da antena e em especial o intervalo de amostragem espacial) influenciam na identificação do objeto (Borges, 2007; Prego *et al.*, 2017).

2.6 ESTIMATIVA DE ESPESSURAS DE CAMADAS DE PAVIMENTOS

Atualmente no Brasil o método de dimensionamento de pavimentos para definição de espessura de camadas é bem arcaico, de 1960 (CNT, 2017), além de serem considerados caros, destrutivos e morosos. O conhecimento das espessuras das estruturas de pavimentos asfálticos é necessário para um controle de qualidade de novas obras e para os trabalhos de fiscalização contra a deterioração precoce. A adoção do GPR para a estimativa de espessuras de camadas rodoviárias se tornou uma importante ferramenta por se tratar de um método não-destrutivo, ágil e barato (Loulizi *et al.*, 2003).

Um dos métodos mais utilizados para estimar a espessura de camadas de pavimentos é feito a partir do registro dos pulsos refletidos das interfaces das camadas e na diferença do tempo dessas reflexões (Maser, 1996; Loulizi *et al.*, 2003; Al-Qadi & Lahouar, 2005; Leng

& Al-Qadi, 2011; Khamzim *et al.*, 2017, Cunha *et al.*, 2019). Na definição das espessuras (tanto de camadas asfálticas como de outros tipos de camadas) pode-se aplicar a seguinte equação:

$$D_i = \frac{v.t}{2} \quad (\text{Eq.2.1})$$

Em que D_i é a espessura da camada, v é a velocidade do radar no meio e t é o tempo duplo de chegada da onda EM através da camada (dado em ns). A amplitude da reflexão indica a proporção de energia que é refletida em uma interface ou transmitida para a próxima camada. Reflexões de alta amplitude indicam um grande contraste em constante dielétrica entre camadas (Grote *et al.*, 2005; Silva, 2014). A Figura 2.3 mostra uma seção esquemática típica de um pavimento e seu respectivo radargrama.

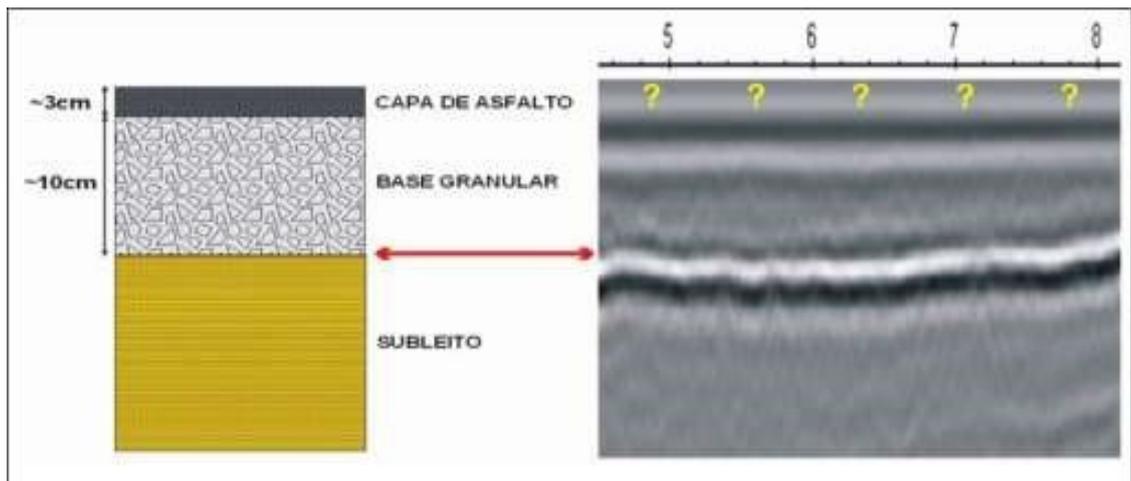


Figura 2.3 À esquerda uma seção esquemática típica de um pavimento e à direita seu respectivo radargrama, mostrando os refletores das camadas. Extraído de Vieira & Gandolfo (2013).

Para determinação da espessura da camada de concreto asfáltico, que geralmente apresenta dimensões reduzidas, é ideal a utilização de antenas com frequências maiores que 1,6 GHz (Vieira & Gandolfo, 2013; Khamzim *et al.*, 2017). É necessário também o conhecimento prévio da constante dielétrica dos diferentes revestimentos. Na Tabela 2.1 constam valores de velocidade da onda EM obtido em alguns tipos de revestimentos por alguns autores.

Material	Daniels (1996)	Gonçalves & Ceratti (1998)	Cao <i>et al.</i> (2007)	Silva (2014)
	v (m/ns)			
Asfalto seco	0,150 -0,212	0,12	0,12- 0,17	0,055
Asfalto úmido	0,087 - 0,122	-	-	-
Concreto seco	0,095-0,150	0,10	0,087-0,10	-
Concreto úmido	0,067 -0,095	-	-	-

Tabela 2.1 Dados de velocidade da onda EM registrada em materiais comumente usados em pavimentos flexíveis e rígidos.

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Afim de um maior aproveitamento dos assuntos abordados nessa dissertação, este capítulo abordará a fundamentação teórica do radar de penetração do solo-GPR e de pavimentos asfálticos, em especial os materiais que constituem os alvos estudados.

3.1 GROUND PENETRATING RADAR

O método GPR é todo fundamentado pela teoria de propagação de ondas eletromagnéticas, expressa matematicamente nas equações de Maxwell. Sendo assim, para efeitos de uma melhor compreensão de como o método funciona, faz-se necessário uma breve introdução sobre como as ondas eletromagnéticas se propagam nos meios.

3.1.1 Equações de Maxwell- comportamento das ondas eletromagnéticas

Maxwell sintetizou o trabalho de diversos pesquisadores relacionando o comportamento senoidal do campo magnético e campo elétrico (ortogonais entre si) quando estes variam no tempo com as propriedades dos materiais (Collin, 1985; Annan, 2009). As equações de Maxwell associam o campo escalar ρ e cinco campos de vetores: elétrico E , a intensidade do campo magnético H , campo de deslocamento elétrico (ou fluxo de densidade elétrica) D , campo do fluxo de densidade magnética (também conhecida como indução magnética) B e vetor de densidade da corrente elétrica J . (Kirsch & Hettlich, 2014; Orfanidis, 2016).

A Figura 3.1 mostra a representação das ondas eletromagnéticas no espaço livre em que o campo elétrico \vec{E} é ortogonal ao campo magnético \vec{H} .

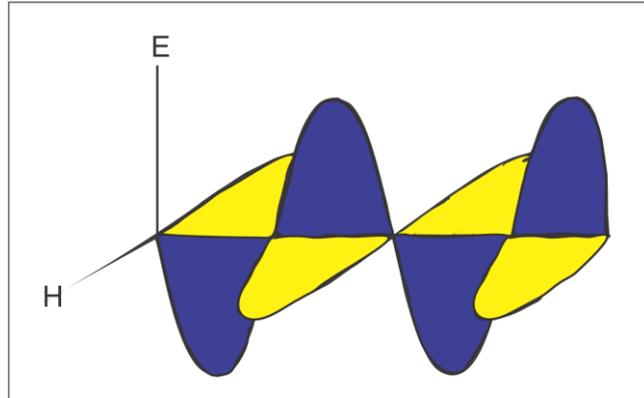


Figura 3.1 Representação das ondas eletromagnéticas no espaço livre em que o campo elétrico \vec{E} é ortogonal ao campo magnético \vec{H} .

A primeira (Eq. 3.1) e a segunda (Eq. 3.2) equações são as leis de Gauss e referem-se aos campos magnéticos e elétricos. A terceira, conhecida como *Lei de Faraday* (Eq. 3.4), mostra que a variação de campo magnético no tempo gera um campo elétrico de circuito fechado (Annan, 2003, Borges, 2007). A última é a *Lei de Ampere* (Eq. 3.5), que descreve a origem de um campo magnético a partir de um campo elétrico. Esta foi alterada por Maxwell para acrescentar o deslocamento da corrente elétrica.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Lei de Gauss

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Lei de Gauss

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Lei de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Lei de Ampere

Onde:

\vec{B} : vetor de densidade do fluxo magnético ou indução magnética (Weber/m²)

\vec{D} : vetor deslocamento elétrico (C/m²)

\vec{E} : vetor de força do campo elétrico (V/m)

ρ : densidade da carga elétrica (C/m³)

\vec{J} : vetor da densidade da corrente elétrica

\vec{H} : intensidade do campo magnético (A/m)

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: corrente de deslocamento

\vec{t} : tempo

Para o GPR, três grandezas são primordiais para o entendimento de como as ondas EM se propagam em um meio: permissividade dielétrica ϵ (Eq. 3.5), permeabilidade magnética μ (Eq. 3.6) e condutividade elétrica σ (Eq. 3.7).

Quando um material é submetido a um campo elétrico externo, as cargas se separam a uma determinada distância gerando um segundo campo elétrico (interno) que entra em equilíbrio com o campo elétrico externo. Essa separação de carga em distância é chamada de *polarização*. Enquanto as cargas se deslocam em resposta ao campo externo (antes que o equilíbrio seja alcançado pela estabilização dos campos internos e externos), a energia é dissipada à medida que a quantidade de carga movida e distância aumentam. Este processo de dissipação de carga é também conhecido como condução elétrica (Olhoft, 1998).

A permissividade dielétrica ϵ é a capacidade que determinado material tem de polarizar, sustentar a polarização e armazenar a energia quando submetido à um campo elétrico externo. É representada como um número complexo que possui um componente **real**- de armazenamento- e um componente **imaginário**-de dissipação, intimamente ligada a condutividade elétrica (Olhoft, 1998; Baker *et al.*, 2007).

Já a permeabilidade magnética μ é um número complexo em que a parte real é um elemento de armazenamento e a outra parte- imaginária, é composta por um elemento de dissipação (ou perda de energia) quando submetido à um campo magnético induzido (Powers, 1997; Baker *et al.*, 2007).

3.1.2 Relações constitutivas

Para uma energia eletromagnética, parâmetros como perda e armazenamento de energia são dados como propriedades magnéticas e elétricas complexas que representam o deslocamento de cargas, tais como transporte, polarização e spin (Olhoft, 1998). Entretanto, as propriedades elétricas do material presentes nessas relações são consideradas complicadas, uma vez que elas não dependem somente da característica molecular, mas também de

quantidades macroscópicas tais como a densidade e temperatura do material. Além destes, as propriedades são condicionadas ao tempo, como por exemplo, a histerese. A relação entre essas propriedades e seus respectivos campos de força e fluxo são conhecidas como equações constitutivas, ou relações constitutivas (Kirsch & Hettlich, 2014).

Nas relações constitutivas, a indução magnética \bar{B} está relacionada ao campo magnético \bar{H} pela permeabilidade magnética μ ; a corrente de densidade J está relacionada ao campo elétrico pela condutividade σ e a corrente de polarização (vetor de deslocamento elétrico) \bar{D} está relacionada ao campo elétrico \bar{E} pela permissividade ϵ (Geyer, 1990).

Partindo do pressuposto de um ambiente de espaço vazio (vácuo), em casos restritos em que ϵ , μ e σ são independentes do tempo, as relações constitutivas são:

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon}_0 \bar{E} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$\bar{B} = \tilde{\mu}_0 \bar{H} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Assumindo que a permissividade dielétrica no vácuo ϵ_0 é igual à 8.854×10^{-12} farad/m e a permeabilidade magnética no vácuo μ_0 é igual à $4\pi \times 10^{-7}$ Henry/m.

Uma corrente de indução J_C fluirá em ambiente de perda elétrica com permissividade ϵ e condutividade σ (Collin, 1985). Essa corrente de indução ocorre graças ao movimento de cargas livres que geram uma corrente quando um campo elétrico está presente (Annan, 2003). A Lei de Ohm que tangencia a corrente de indução J com o campo elétrico E é a primeira relação constitutiva (Eq. 3.7), muito importante para compreender o fluxo da corrente.

$$J = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Lei de Ohm

Sendo assim, a propagação das ondas eletromagnéticas em um meio é fortemente regida pela condutividade elétrica e esta, por sua vez, é controlada pela presença de água. Em materiais resistivos o campo eletromagnético é difusivo (dispersão) e não pode propagar ondas

eletromagnéticas, ou seja, a resistência ao fluxo de carga leva a dissipação da energia (Annan, 2009).

A segunda relação constitutiva (**Eq. 3.8**) associa o deslocamento de cargas restritas (\bar{D}) quando este é submetido à presença de um campo elétrico (E). Essa corrente de deslocamento de carga, ou corrente de polarização, resulta em armazenamento de energia nos materiais (Olhoeft, 1998; Annan, 2003; Annan, 2009). Em baixas frequências o efeito da condutividade é tal que a quantidade de energia do campo elétrico perdida para a condução irá sobrecarregar a quantidade de energia armazenada para propagação. Isso acaba limitando a aplicação do GPR em baixas frequências (Powers, 1997).

A permissividade dielétrica ϵ representa a constante de proporcionalidade dada pela relação do campo elétrico com a corrente de polarização.

$$\bar{D} = \epsilon E \quad (\text{Eq. 3.8})$$

No GPR, a constante dielétrica -ou permissividade dielétrica (**Eq. 3.9**) é essencial e é definida pela relação da permissividade dielétrica do meio com a permissividade dielétrica no vácuo.

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

A constante dielétrica é usada para descrever as propriedades elétricas de materiais em alta frequência (10-1000 MHz) uma vez que são nessas frequências que o processo de deslocamento (polarização) predomina a condutividade para muitos materiais geológicos (Davis & Annan, 1989). Essa constante dielétrica complexa é dada por:

$$K = \epsilon' + \epsilon'' \quad (\text{Eq. 3.10})$$

A parte real da permissividade ϵ' é o quanto de energia do campo elétrico externo fica armazenada no material, já a parte imaginária da permissividade é chamada de fator de perda ϵ'' e é a medida de quão dissipativo ou quanta perda de energia um material tem quando é submetido à um campo elétrico externo. A parte imaginária da permissividade ϵ'' é sempre maior que zero, geralmente menor que a parte real da permissividade ϵ' e está associada com a atenuação do sinal, que limita a profundidade de penetração (Fisher *et al.*, 1992; DeRobert *et*

al., 2016). O fator de perda inclui os efeitos de perda dielétrica e condutividade (Agilent Technology, 2006).

A terceira relação constitutiva (Eq.3.11) relaciona o campo magnético (B) com o campo da indução magnética (H) e tem como constante de proporcionalidade a permeabilidade magnética.

$$\bar{B} = \mu H \quad (\text{Eq. 3.11})$$

A maioria dos materiais naturais são não-magnéticos, e isso significa que eles apresentam uma permeabilidade magnética $\mu = \mu_0$. Para materiais ferromagnéticos como o ferro e o níquel, a permeabilidade magnética pode ser maior que μ_0 (Ulaby, 2007).

3.1.3 Propagação das ondas no domínio do tempo

A partir da Transformada de Fourier das equações de Maxwell, utilizando as relações constitutivas no domínio do tempo e considerando ainda, regiões homogêneas, no qual adota-se que $\nabla \times \bar{E} = 0$ e $\nabla \times \bar{H} = 0$, tem-se para o campo elétrico que:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Em que $K^2 = \mu \epsilon \Omega^2 - i \mu \sigma \Omega = -\hat{Z} - \hat{Y}$, e representa o número de ondas (Borges, 2007) e μ , ϵ e σ são constantes em relação ao tempo. Para materiais geológicos em baixa frequência (menor que 1 Mhz), admite-se $\mu \epsilon \Omega^2 \gg \mu \sigma \Omega$ tendo que as correntes de deslocamento são menores que as correntes de condução (Ward & Hohmann, 1988).

A Figura 3.2 ilustra uma corrente de indução J gerando um campo magnético cuja circulação variável no tempo gera um campo secundário elétrico. Esse campo secundário, por sua vez cria uma corrente elétrica, “auto-perpetuando” uma sequência (Annan, 2003; Annan, 2005).

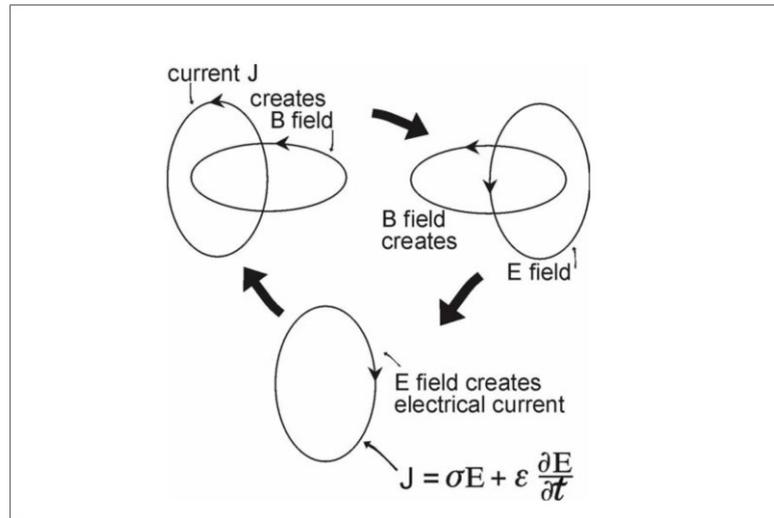


Figura 3.2 Ilustração das sequências de campo que se auto-perpetuam: campo magnético atual que induz um campo elétrico que, por sua vez, gera o movimento de carga elétrica. Extraído de Annan (2003).

3.1.4 Propriedades das ondas

As principais propriedades dos campos de onda são: velocidade (**Eq. 3.13**), atenuação (**Eq. 3.15**) e impedância (**Eq. 3.18**) (Annan, 2003). No espaço vazio assume-se que $\mu = \mu_0$ e C é a velocidade da luz dada em 3×10^8 m/s, entretanto, em meio dielétrico a velocidade das ondas EM pode ser fortemente deduzida como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{C}{\sqrt{K}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

E o comprimento de onda no meio é dado em:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

em que f é a frequência em hertz.

A Figura 3.3 mostra a representação esquemática de uma onda.

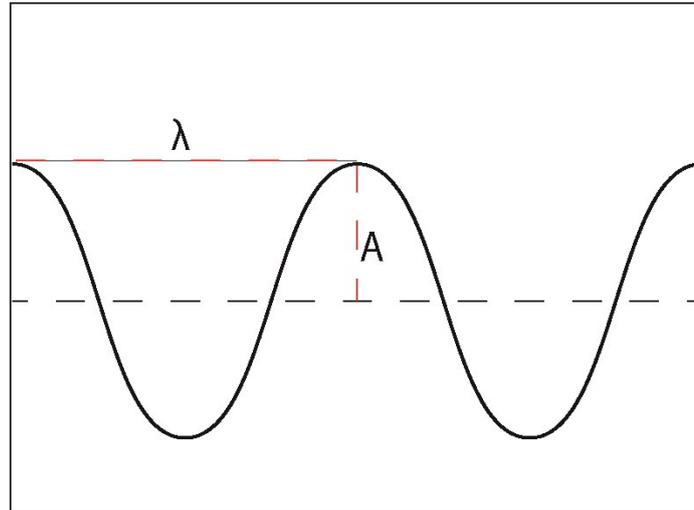


Figura 3.3 Representação esquemática de uma onda. O comprimento de onda λ e A é a amplitude.

A velocidade de propagação da onda EM é, como vimos anteriormente, dependente da permissividade relativa do material. Já a amplitude e a atenuação da propagação da onda são intimamente dependentes da permeabilidade magnética e da condutividade do material. Materiais altamente condutivos tendem a atenuar os sinais das ondas EM e também reduzir a profundidade de investigação do GPR (Van Dam & Schlager, 2000; Baker *et al.*, 2007).

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2 \cdot \sqrt{k}} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

A perda de energia, conhecida também como atenuação (Eq. 3.15) cresce gradativamente de acordo com a frequência e com a umidade nos materiais que apresentam soluções aquosas em suas constituições (Stratton, 1940; Davis & Annan, 1989; Annan, 2003). Ocorre geralmente quando as interfaces possuem diferentes impedâncias, fazendo com que uma parte da onda seja dissipada, ou seja, quanto mais heterogêneo é um meio (ou camadas) maior é a atenuação. A Figura 3.4 mostra as relações entre a atenuação e a frequência sob diferentes condutividades de acordo com Davis & Annan (1989).

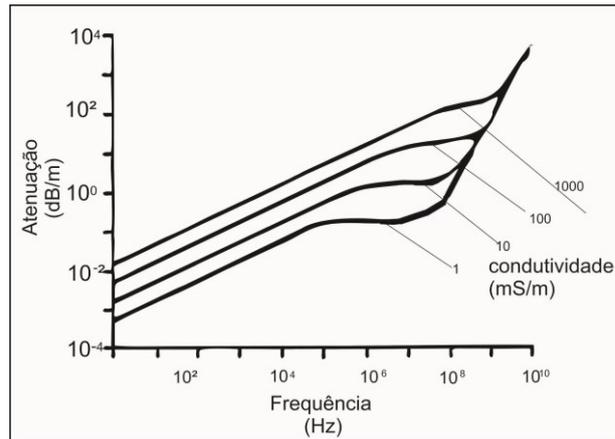


Figura 3.4 Relações entre a atenuação e a frequência sob diferentes condutividades. Extraído de Davis & Annan (1989).

A variável β refere-se à permissividade efetiva (Hollender & Tillard, 1998). Em ambientes de baixa perda pode ser compreendida devido a frequência angular, a permissividade e susceptibilidade magnéticas (Baker *et al.*, 2007).

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Dependendo da relação de magnitude da perda de energia (associada com a condutividade) com o armazenamento de energia (associada à permissividade e permeabilidade) os campos podem espalhar ou propagar as ondas (Annan, 2003).

Davis & Annan (1989) reuniram dados com a permissividade relativa, a condutividade, a velocidade e a atenuação para alguns materiais comuns investigados com o GPR (numa faixa de frequência que varia entre 10 a 1000 MHz; Tabela 3.1).

MATERIAL	K	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Ar	10	0	0.30	0
Água destilada	80	0.01	0.30	2×10^{-3}
Água doce	80	0.5	0.033	0.1
Água do mar	80	3×10^3	0.01	10^3
Areia seca	3-5	0.01	0.15	0.01
Areia saturada	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Calcário	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Xisto	5-15	1-100	0.09	1-100
Silte	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilas	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sal seco	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Gelo	3-4	0.01	0.16	0.01

Tabela 3.1 Constante dielétrica K, condutividade elétrica σ , velocidade v e atenuação α de alguns materiais, de Davis & Annan (1989).

Materiais como solos, rochas, concretos, asfaltos, etc. possuem muito desses constituintes citados na tabela, com espaço vazio entre os grãos (porosidade) que podem ser preenchidos eventualmente com ar, água ou outro material (Annan, 2003). A constante dielétrica de um concreto asfáltico, por exemplo, depende da constante dielétrica de seus constituintes e também da sua fração volumétrica (Maser & Carmichael, 2015).

A constante dielétrica está intimamente relacionada com o teor volumétrico de água presente no solo. Podemos facilmente estender essa relação para outros materiais como por exemplo, o concreto que também possui alta porosidade e exerce função de esponja. As relações empíricas entre a permissividade dielétrica, a condutividade dos materiais com teor volumétrico de água é apresentada por Annan (2003). A Figura 3.5 mostra uma adaptação da equação de Topp (Topp *et al.*,1980).

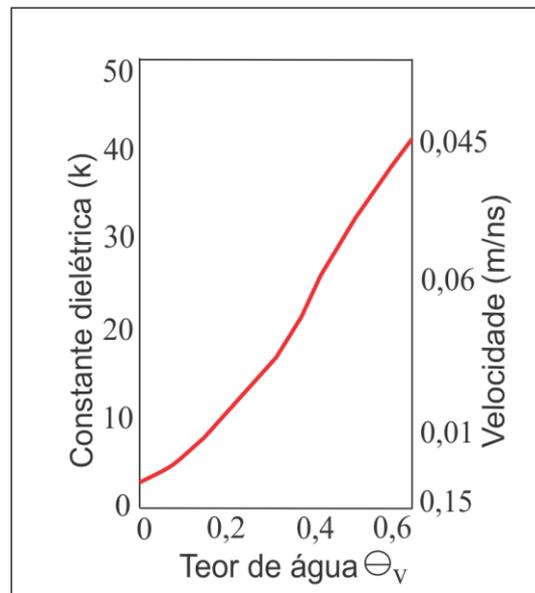


Figura 3.5 Relação empírica da constante dielétrica do solo em função do teor volumétrico e a velocidade da onda EM de acordo com essas variáveis. Essa relação é mais aplicável em uma faixa de frequência de 50 MHz à 1000 MHz. Extraído de Annan (2003).

A impedância é um parâmetro definido pela relação do campo elétrico com o campo magnético e é considerado o fator mais importante que governa os processos de reflexão e velocidade das ondas eletromagnéticas. A energia eletromagnética é parcialmente refletida quando sai de um meio de permissividade dielétrica e encontra um meio de permissividade dielétrica diferente. A proporção dessa reflexão varia de acordo com as características geométricas do alvo (Daniels, 1996) e com a magnitude da diferença entre permissividades (Daniels, 2000, Van Dam & Schlager, 2000)

Nas ondas EM de alta frequência que se propagam em determinado meio dielétrico, a impedância (Eq. 3.17) pode ser obtida a partir da raiz quadrada da permeabilidade magnética em relação à permissividade (Guru & Hiziroglu, 2004; Liu *et al.*, 2017).

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Segundo Baker *et al.* (2007) a impedância também afeta o sinal de GPR refletido. Quando um sinal de GPR atinge uma interface cuja impedância diminui (ou seja, quando a permissividade aumenta) este sinal é dividido e o valor do seu coeficiente de reflexão é negativo. O valor é positivo quando os sinais são particionados em uma interface cuja velocidades e impedâncias de onda aumentam na interface (ou seja, quando há uma diminuição relativa de permissividade).

Essa partição ou divisão de sinal pode ser expressa como:

$$R = \frac{Zw_2 - Zw_1}{Zw_2 + Zw_1} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

em que R é o coeficiente de reflexão numa determinada interface enquanto Zw_1 e Zw_2 são valores das impedâncias acima e abaixo desta interface, respectivamente. A Figura 3.6 mostra a representação de um sinal incidindo em uma camada e sendo parcialmente transmitido (T1, T2 e T3) e refletido (R1, R2 e R3). Extraído de Annan (1992).

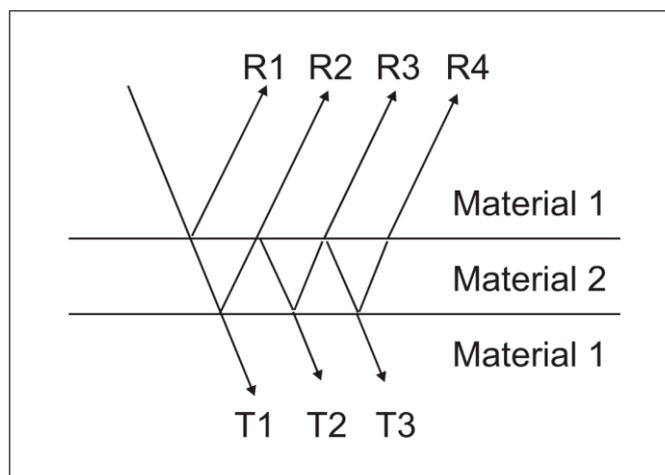


Figura 3.6 Quando um sinal incide em uma camada, os sinais são parcialmente transmitidos (T1, T2 e T3) e refletidos (R1, R2 e R3). Extraído de Annan (1992).

Podemos estender o caso para a incidência de uma onda EM em uma interface suave e contínua (como o limite de uma camada). A onda EM viaja em uma velocidade V_1 no limite superior (M1) e em uma velocidade V_2 no limite inferior. Os sinais incidentes podem afetar a interface que separa os dois meios em um ângulo qualquer entre 0° e 90° (Annan, 2003) e emergirem no meio M2 em um ângulo que varia entre 0 e $\sin \phi_1$. O ângulo $\sin \phi_1$ em que isso ocorre é chamado de ângulo crítico e pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1}} = \frac{v_2}{v_1} = \sin \phi_1 \quad (\text{Eq. 3.19})$$

3.1.5 Técnicas de aquisição

As técnicas utilizadas na aquisição de dados de georadar são: *commom-offset* (afastamento constante), sondagem de velocidade e transiluminação.

Na técnica *commom-offset* (conhecida também como *constant offset* ou perfil de reflexão) as antenas (uma transmissora e outra receptora) são movidas ao mesmo tempo ao longo de uma linha ou perfil, com uma separação S fixa entre elas (Figura 3.7). O objetivo principal dessa técnica é adquirir um mapa de reflexão da subsuperfície versus posição espacial, em que mudanças na amplitude de reflexão e no tempo de retorno da onda EM na antena receptora indicam que as propriedades físicas do meio mudaram (Annan, 2009). O resultado é uma seção em que o tempo de trânsito duplo está no eixo vertical enquanto no eixo horizontal está o número de traços (Borges, 2007).

Os parâmetros mais importantes que definem a campanha com a técnica *commom-offset* são: o *time window* (janela temporal), o intervalo de amostragem temporal, o espaçamento entre as antenas, o espaçamento entre os perfis, a orientação das antenas e o intervalo da estação (Annan, 2009).

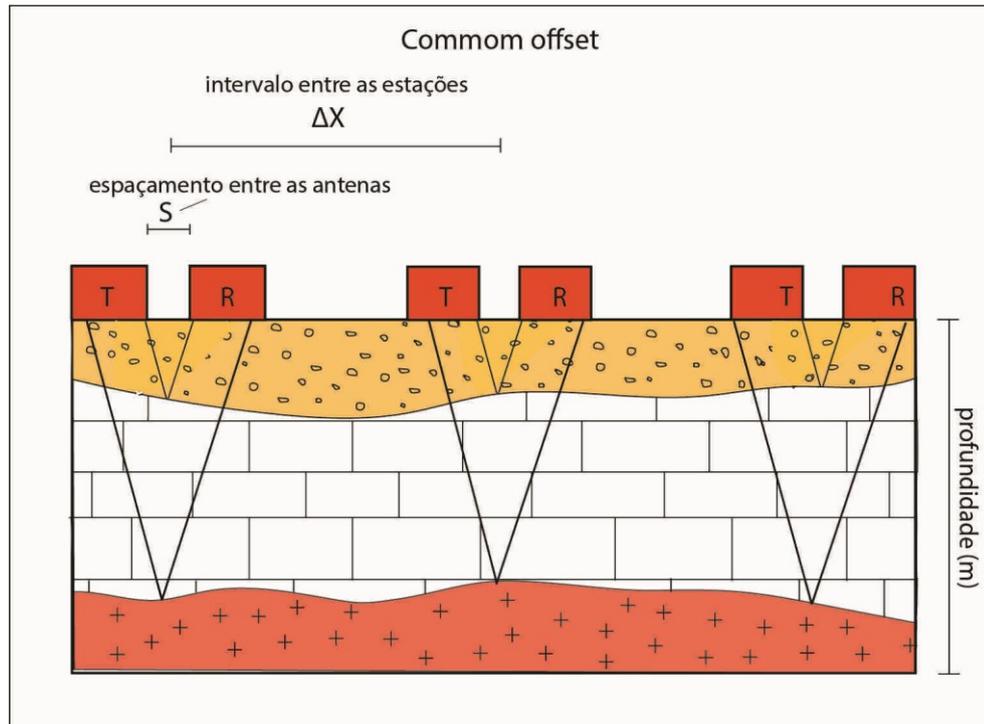


Figura 3.7 Ilustração esquemática de uma aquisição *common offset* com antenas não blindadas.

A sondagem de velocidade engloba duas técnicas: a *common midpoint* (CMP) e a *wide-angle reflection and refraction* (WARR) (Figura 3.8). No *common midpoint* (CMP) a distância entre as antenas aumenta em sentidos opostos, porém um ponto central entre elas é fixo. As antenas são distanciadas a partir do ponto central obedecendo a relação dada na **Eq. 3.20** (Annan, 2005). Essa técnica é usada geralmente para obter uma estimativa da velocidade da onda EM versus profundidade.

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} \text{ à } \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Eq.3.20})$$

O modo WARR é caracterizado pelo aumento da distância entre as antenas em que uma das antenas se mantém fixa. Tanto no CMP quanto no WARR a máxima distância entre as antenas é geralmente de 1 a 2 vezes a profundidade do refletor. Em ambientes onde a atenuação é alta os sinais devem desaparecer antes das antenas alcançarem a distância máxima entre elas.

Geralmente o método transiluminação é utilizado para fazer medições dentro de furos de sondagem, principalmente em trabalhos ambientais e de engenharia. Além disso, esse método opera melhor no modo de transmissão do que no modo de reflexão pois a energia

detectada na antena receptora se propaga ao invés de refletir através da subsuperfície (Baker *et al.*, 2007).

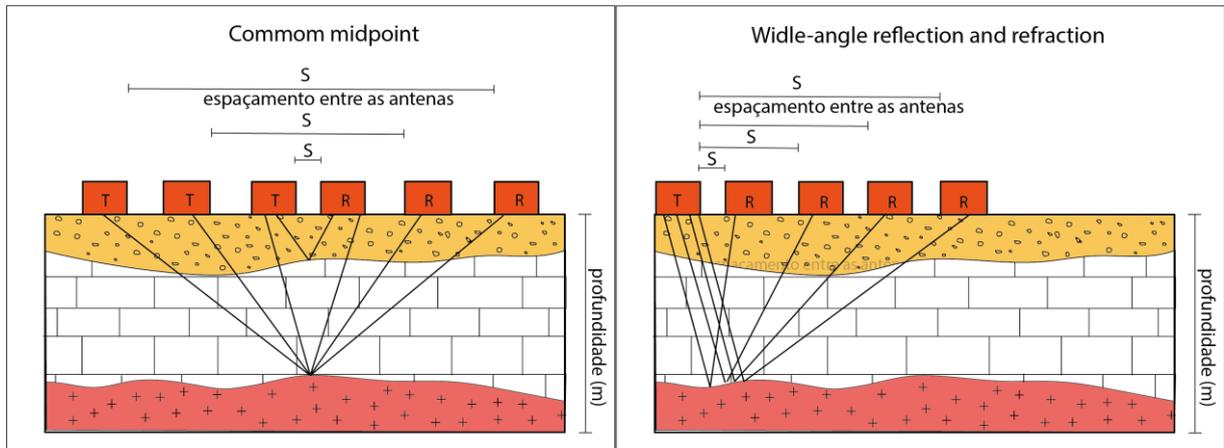


Figura 3.8 Representação esquemática de aquisições commom midpoint-CMP (à esquerda) e wide-angle reflection and refraction-WARR (à direita) com antenas não blindadas.

Existem quatro diferentes tipos de aquisição nessa técnica: modo *commom offset*, *tomografia direta*, *modo vertical radar profiling* - VPR e variável. Na *commom offset* as antenas são dispostas com uma distância fixa entre elas e são movidas em sincronia dentro de um mesmo poço. Já na técnica de tomografia direta a antena transmissora e a antena receptora estão alocadas em poços diferentes, sendo movidas ao mesmo tempo e registrando apenas o tempo que a onda EM levou para chegar na antena receptora (Borges, 2007).

Na técnica *vertical radar profiling*-VRP a antena transmissora fica na superfície enquanto a antena receptora se desloca dentro de um poço. A técnica variável consiste em duas antenas alocadas dentro de dois poços adjacentes, sendo que apenas uma delas se move enquanto a outra fica estática (Borges, 2007). Na transiluminação os parâmetros que governam a aquisição são: a frequência da antena, o intervalo entre as estações, *time window*, intervalo de amostragem temporal e o espaço (diâmetro) dos furos (Annan, 2005; 2009).

A Figura 3.9 mostra a representação esquemática de aquisições do tipo (A) transiluminação em *commom-offset*, (B) tomografia, (C) transiluminação *vertical radar profiling* e (D) transiluminação variável.

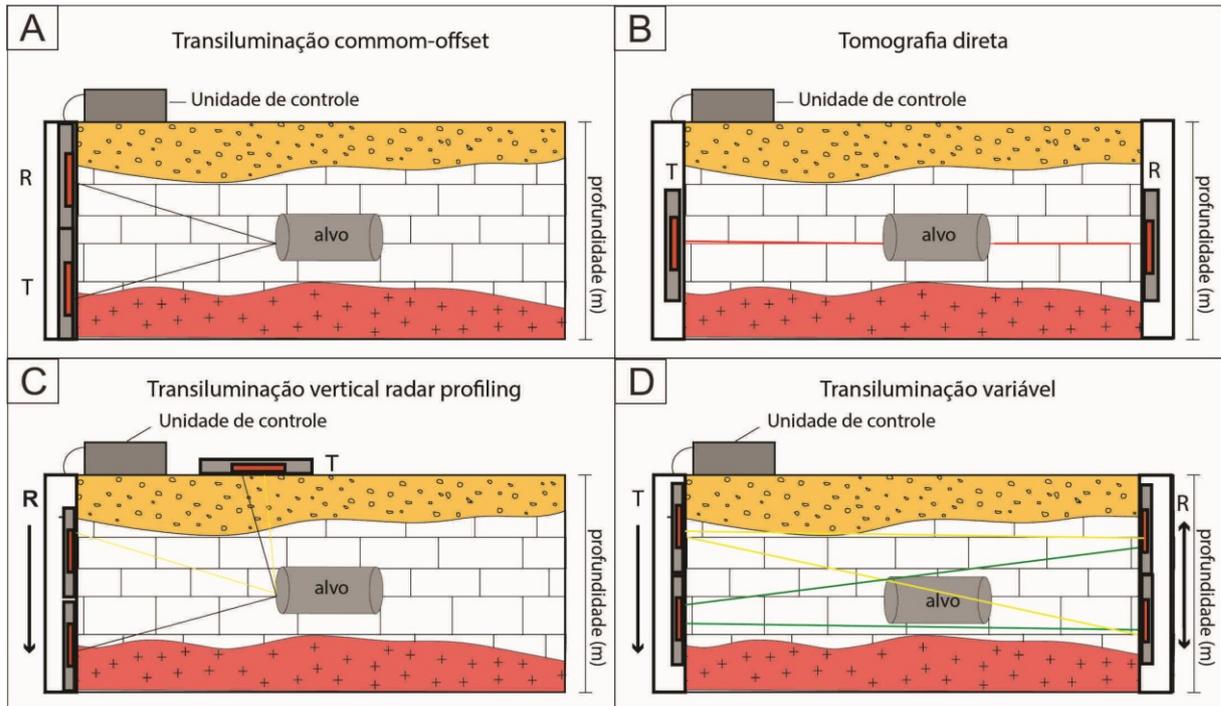


Figura 3.9 Representação esquemática de aquisições do tipo (A) transiluminação em commom-offset, (B) tomografia, (C) transiluminação vertical radar profiling e (D) transiluminação variável.

3.1.6 Parâmetros de aquisição

Os principais parâmetros na aquisição de dados GPR são: tipos de antena, resolução (amostragem espacial e temporal; o número de amostras; a frequência de amostragem; e a janela temporal), zona de influência (profundidade), e a frequência central da antena (Silva, 2014).

Uma antena pode ser usada para transmitir receber ou transmitir energia, ou ambas funções (Daniels, 2010). Quando o GPR apresenta duas antenas com funções diferentes (uma para transmitir energia ea outra para receber) estas recebem a denominação de biestáticas.. Já a antena que possui ambas funções é chamada de monoestática e geralmente o processo de aquisição de dados com esta é mais demorada quando comparada a antenas biestáticas.

As antenas também podem ser divididas entre blindadas e não blindadas. Nas antenas não blindadas há uma maior liberdade na aquisição de dados pois pode-se mover a antena transmissora e/ou a antena receptora, aumentando o espaçamento durante a campanha geofísica. Em contrapartida, essas antenas também ficam mais susceptíveis à ruídos externos e a onda direta. Geralmente antenas com frequências baixas (abaixo de 100 MHz) são não-blindadas. Nas antenas blindadas as antenas ficam fixas dentro de uma caixa fechada e não recebem influência de onda direta no ar. A aquisição é realizada em perfis de afastamento constante.

Reconhecido pelo fornecimento de imagens da subsuperfície, a resolução do GPR refere-se a quão precisamente um objeto ou alvo consegue ser identificado. Informações como

geometria (topo e base), a posição em profundidade e a dimensão do alvo precisam ser levadas em consideração para que se defina a resolução lateral mínima necessária para identificação do objeto, explorando ao máximo a efetividade do método (Annan & Cosway, 1992).

Após a definição da resolução mínima necessária para distinguir o alvo, deve-se saber a velocidade da onda EM no meio e então definir a frequência da antena a partir da **Eq. 3.23**. Por exemplo, alvos enterrados de até 100 mm de diâmetro podem ser identificados em uma campanha utilizando uma antena de 400 MHz, se a velocidade da onda EM for igual a 0,04 m/ns.

O GPR possui dois tipos de resolução: a resolução longitudinal (conhecida também como *range* ou resolução de profundidade) e a resolução lateral (Figura 3.10). O comprimento da resolução depende da largura do pulso, da velocidade dele no meio e da distância da fonte. Em teoria, esta última não afeta a resolução. Na prática, quanto maior a distância, maior a dispersão do pulso e a atenuação do sinal (Annan, 2003; 2005; 2009).

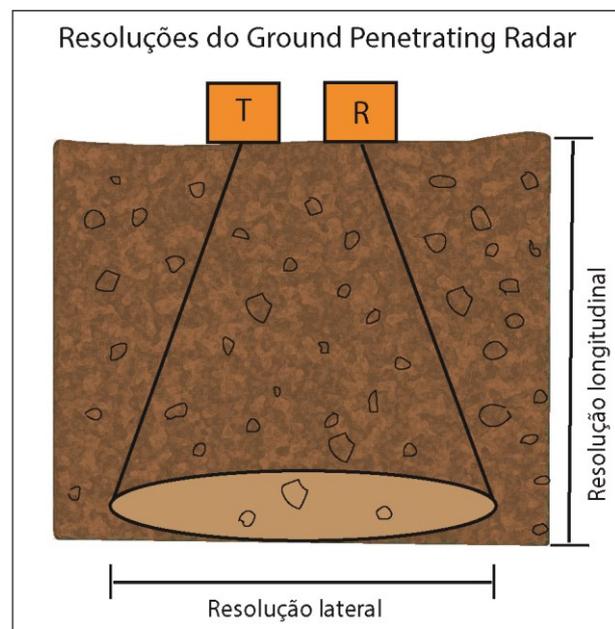


Figura 3.10 Tipos de resoluções do GPR: longitudinal e lateral.

A resolução longitudinal mínima é calculada baseada a partir do comprimento da onda EM e pode ser inferida a partir da equação **Eq. 3.21**:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{Eq.3.21})$$

Um conceito importante sobre a resolução lateral é que ela é proporcional à frequência da antena utilizada e inversamente proporcional à profundidade de investigação (Tabela 3.2). Ou seja, quanto maior a frequência da antena, maior a resolução da imagem e menor é a profundidade de investigação (Borges, 2007). Vale lembrar que, como dito anteriormente, as características físicas do meio influenciam a propagação das ondas EM e, portanto, a profundidade alcançada pela antena de GPR pode variar de acordo com cada caso (Benedetto *et al.*, 2016).

Frequência da antena (MHz)	Profundidade de investigação (m)
10	50
25	30
50	10
100	5
200	2
500	1
1000	0.5

Tabela 3.2 Frequência central da antena versus profundidade de investigação (Annan, 1992).

A resolução lateral Δl (ou seja, a separação mínima para que dois alvos lado a lado possa ser identificados) está intimamente relacionada com a zona de Fresnel e pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}} \quad (\text{Eq.3.22})$$

Em que r é a distância da fonte até o alvo, v a velocidade da onda EM no meio e W a largura do pulso.

No método GPR há três formas de se encontrar a velocidade da onda EM em um meio: (1) sabendo a profundidade em que está um objeto enterrado (Eq. 3.15), (2) conhecendo a constante dielétrica do meio (Eq. 3.13) - neste caso, recomenda-se que se consultem livros, em detrimento de artigos-, e por meio da (3) sondagem de velocidade-CMP (Borges, 2018).

Uma vez que a velocidade de propagação em um meio pode ser medida ou mensurada é possível deduzir a profundidade do alvo ou a espessura do material a partir da equação a seguir (Daniels, 1996):

$$d = \frac{vT_r}{2} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Em que d é a profundidade do alvo ou espessura do material, v é a velocidade do meio, T_r é o tempo duplo até o alvo.

Como toda pesquisa, as informações da subsuperfície obtidas pelo GPR precisam satisfazer os princípios fundamentais de amostragem. O método mais comum de amostragem é feito a cada pulso transmitido, em que é coletada uma única amostra sucessivamente. Um ajuste de tempo, Δt (referido também como o intervalo de amostragem) é usado para reconstruir um pulso ao longo do tempo (Koppenjan, 2009; Borges, 2018).

A frequência de amostragem F_n pode ser obtido com o uso da equação de Nyquist (Eq. 3.24), em que Δt é o intervalo de amostragem temporal ao longo do traço.

$$F_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (\text{Eq.3.24})$$

Por segurança, é recomendado que a frequência de amostragem esteja entre 6 à 30 vezes a frequência central (Borges, 2018).

O intervalo de amostragem temporal é controlado pelo critério de amostragem de Nyquist em que se assume que a frequência máxima é 1,5 vezes a frequência nominal. Os dados devem ser amostrados duas vezes o valor da frequência máxima (Annan & Cosway, 1992).

A Figura 3.11 foi extraída do trabalho de Koppenjan (2009) e mostra a comparação entre uma amostragem de tempo equivalente e uma amostragem de tempo real. Nota-se que na amostragem de tempo real o intervalo de amostragem (Δt) permite uma reconstrução mais criteriosa e precisa do traço (um pulso típico do GPR).

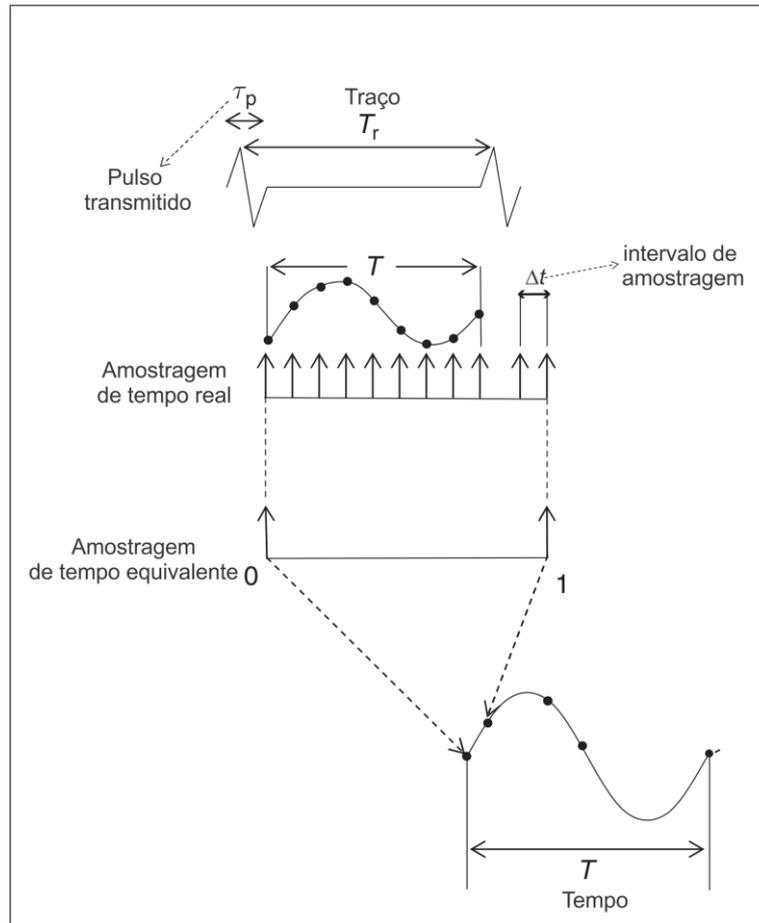


Figura 3.11 Comparação entre uma amostragem de tempo equivalente e uma amostragem de tempo real. Nota-se que na amostragem de tempo real o intervalo de amostragem (Δt) permite uma reconstrução mais criteriosa e precisa do traço (um pulso típico do GPR). Extraído e adaptado de Koppenjan (2009).

Para definir o número de amostras é necessário saber a velocidade do meio, a profundidade em que o alvo se encontra, a resolução desejada e a frequência. Isso afeta diretamente na resolução do imageamento e, conseqüentemente, no tamanho do arquivo armazenado na unidade de controle (Borges, 2018). Como muitos sistemas de GPR aceitam apenas números binários (2^n), o número de amostras deve ser substituído pelo número binário mais próximo acima de 689, no caso 1024.

A janela temporal é o tempo que o sinal emitido pela antena emissora leva para chegar na antena receptora, ou seja, o tempo de dupla viagem. A definição do *time window* é feita baseada na velocidade e na profundidade máxima a ser encontrada na investigação (Annan, 2005; Dojack, 2012).

$$TW = \frac{2 \times \text{Máxima profundidade}}{\text{mínima velocidade}} \quad (\text{Eq.3.25})$$

3.1.7 Aquisição 3D e aquisição quase-3D

Em alguns casos, perfis isolados (2D) não apresentam informações suficientes do subsolo, dificultando por exemplo a identificação precisa de alvos enterrados ou simplesmente aumentando a ambiguidade na interpretação dos dados. Por isso, é comum que algumas pesquisas envolvam imageamentos 3D da subsuperfície.

Há duas formas de se obter uma imagem 3D: a partir de uma aquisição de verdadeiro 3D ou com o pseudo 3D. O verdadeiro 3D precisa de uma fonte em comum (transmissora) e várias receptoras espalhadas pelo *grid*, enquanto o pseudo 3D é caracterizado pela interpolação de vários perfis 2D. A aquisição de um dado verdadeiro 3D se torna inviável, uma vez que a distância entre a antena transmissora e receptora precisa ser igual à distância entre os traços (Borges, 2007).

Imagens de alta resolução de 3D podem ser obtidas desde que se reduza o espaçamento entre os traços para um quarto do comprimento de onda EM (naquele meio). Se o *grid* usado for maior que esta relação a resolução horizontal será afetada e também é gerado eventos conhecidos como *aliasing* que mascaram as respostas (sinais) reais (Gramuesck *et al.*, 2005; Novo *et al.*, 2012). Portanto, a definição do espaçamento entre os perfis é feita a partir do teorema de *Nyquist*, discutido anteriormente na **Eq. 3.20**.

3.2 PAVIMENTO

De forma genérica, pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semi-rígidos e rígidos. Para Gil & Maharaj (2015) um pavimento é definido como uma camada relativamente estável construída acima do solo natural para a distribuição adequada de carga, fornecendo suporte à superfície de desgaste. Aqui será adotado o conceito definido pelo DNIT, que compreende como pavimento, uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras limitadas, em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são dispostas sobre um semi espaço conhecido como subleito. De forma geral podem ser classificados como flexíveis, semirrígidos ou rígidos (Brasil, 2006).

Uma seção transversal típica de um pavimento é constituída pelo **subleito**, pela **regularização**, **reforço do subleito**, **sub-base**, **base** e **revestimento**. Entende-se por *subleito* o terreno da fundação enquanto *leito* é a superfície obtida após a terraplanagem. A

regularização é a camada posta sobre o leito e que tem como objetivo regularizar/homogeneizar a superfície do leito. Nem sempre é considerada como uma camada (Brasil, 2006).

Acima da regularização vem o reforço do subleito que é uma camada cujas características geotécnicas são melhores que as características do subleito, desde que devidamente compactada. A sub-base é uma camada complementar à base e recebe as mesmas funções desta. A base possui a função de suportar as cargas e distribuir os esforços provenientes do tráfego e por último, revestimento é a camada que fica submetida a esforços de compressão e de tração devidos à flexão (Brasil, 2006; Bernucci *et al.*, 2008). O Quadro 3.1 mostra a classificação das bases e sub bases flexíveis e semirrígidas segundo DNIT (Brasil, 2006).

Bases e sub-bases	Granulares		Estabilizados com aditivos		
	Estabilização granulométrica	Macadame hidráulico	Cimento	Cal	Betume
Subtipos	Solo brita	-	Solo cimentado	Solo-cal	Solo-betume
	Brita graduada	-	Solo melhorado com cimento	Solo melhorado com cal	Bases betuminosas diversas
	Brita corrida	-	-	-	-

Quadro 3.1 As bases e as sub-bases flexíveis e semirrígidas podem ser classificadas, segundo o DNIT (Brasil, 2006) como dois principais grupos: Granulares e estabilizados com aditivos.

As espessuras das camadas são variáveis e dependem de vários fatores de dimensionamento. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (Bernucci *et al.*, 2008). A seguir (Figura 3.12), uma seção transversal típica de um pavimento, de acordo com a Confederação Nacional de Transportes (2017).

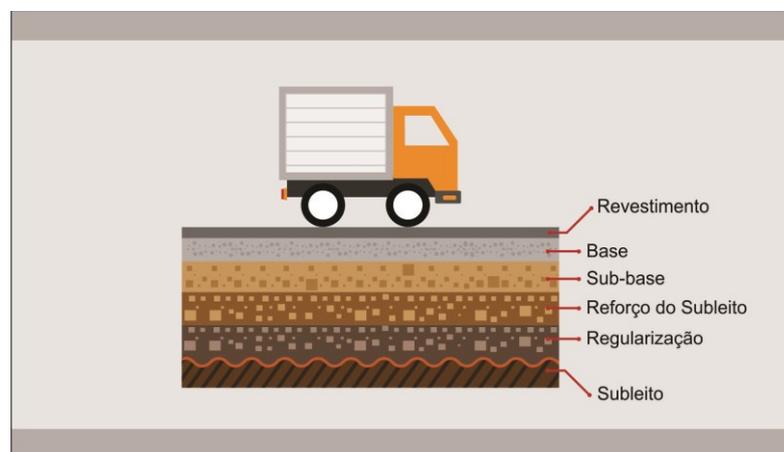


Figura 3.12 Seção transversal típica de um pavimento, de acordo com a Confederação Nacional de Transportes (2017).

3.2.1 Revestimentos

De acordo com o DNIT (Brasil, 2006) pavimentos flexíveis são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica, ou seja, todas as camadas recebem uma parcela de tensão das cargas aplicadas localmente. Já os pavimentos semirrígidos possuem uma base cimentada e são revestidos por camadas asfáltica enquanto os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento possui uma rigidez alta em relação as demais camadas inferiores, absorvendo toda a tensão. Um exemplo desse tipo de pavimento são os constituídos por lajes de concreto de cimento Portland.

A Associação Brasileira de Cimentos Portland (2002) define cimento Portland como um pó fino cujas propriedades podem ser aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que endurecem em contato com a água e que, mesmo submetidos novamente a ação da água não volta ao seu estado de origem.

3.2.2 Bases e sub-bases granulares

Estabilização granulométrica: são as camadas puramente granulares, flexíveis, constituídas por solos, rochas (britas), de escória de alto forno ou pela mistura desses materiais. Geralmente os materiais “*in natura*” passam por um processo de beneficiamento (britagem/moagem/peneiramento) de acordo com a necessidade. Quando há a mistura de material natural com material processado (brita) chama-se base ou sub base de solo brita (Brasil, 2006).

Macadame hidráulico: camada de brita de graduação do tipo macadame, cujos espaços vazios são preenchidos, quando submetidos à compressão, pelo próprio material (porém fino) ou solo de granulometria e plasticidade adequada (Brasil, 2006).

3.2.3 Bases e sub-bases estabilizadas (com aditivos)

Solo-cimento: Segundo a norma DNIT 143/2010-ES, é uma mistura de solo, cimento e água cujas quantidades são previamente definidas em ensaios laboratoriais a fim de apresentar como produto final um material duro e cimentado, de alta rigidez à flexão (Brasil, 2006; DNIT, 2010).

Solo melhorado com cimento: De acordo com a norma DNIT 142/2010-ES, são solos com baixos teores de cimento (de 2% à 4%) tendo como objetivo modificar a plasticidade e a sensibilidade do solo à água. (Brasil, 2006; DNIT, 2010).

Solo-cal: Mistura de solo, cal e água e por vezes cinza volante (pozolona artificial). O teor de cal deve ser entre 5% à 6% e a estabilização ocorre por modificação do solo (no tocante plasticidade e sensibilidade à água), por carbonatação (cimentação fraca) ou pozolinação, considerada cimentação forte (Brasil, 2006).

Solo melhorado com cal: solo com adição de cal até que se alcance uma plasticidade e sensibilidade à água desejada (Brasil, 2006).

Solo Betume: mistura de solo, água e material betuminoso considerada como um material flexível (Brasil, 2006). Visa garantir constância no teor de umidade da mistura e impermeabilização do material (CNT, 2017).

Bases betuminosas diversas: são formados por associação de agregados e materiais betuminosos (Brasil, 2006).

3.2.4 Enrocamento

Também conhecido como rachão, o enrocamento é aplicado para reforçar a resistência da sub base. É constituído basicamente por fragmentos de rochas de diâmetros grandes (superior a 10 mm).

3.2.5 Geossintéticos/Geomembranas

Os geossintéticos / geomembranas são geralmente aplicados em projetos de pavimentos visando solucionar problemas relacionados a separação de materiais, filtração, drenagem, impermeabilização e reforço (Correia & Neto, 2016).

3.2.6 Colchão drenante

O objetivo dos colchões drenantes é drenar e evacuar as águas, situadas a pequena profundidade dos pavimentos. Geralmente são indicados quando não é possível a drenagem apenas por espinhas de peixe.

CAPÍTULO 4

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O Sítio Controlado de geofísica da UEG-TCE está localizado no terreno do Campus da UEG, em Anápolis-GO, próximo ao prédio do Laboratório do Grupo de Pesquisa em Tecnologias Ambientais (GEPTAS) e pode ser observado na Figura 4.1. O projeto, de convênio da UEG-TCE, está organizado em 3 etapas: (1) determinação do *background*, (2) instalação do sítio geofísico e posteriormente a (3) caracterização geofísica do mesmo. Aqui serão abordadas a instalação e as campanhas geofísicas em dois pavimentos asfálticos.

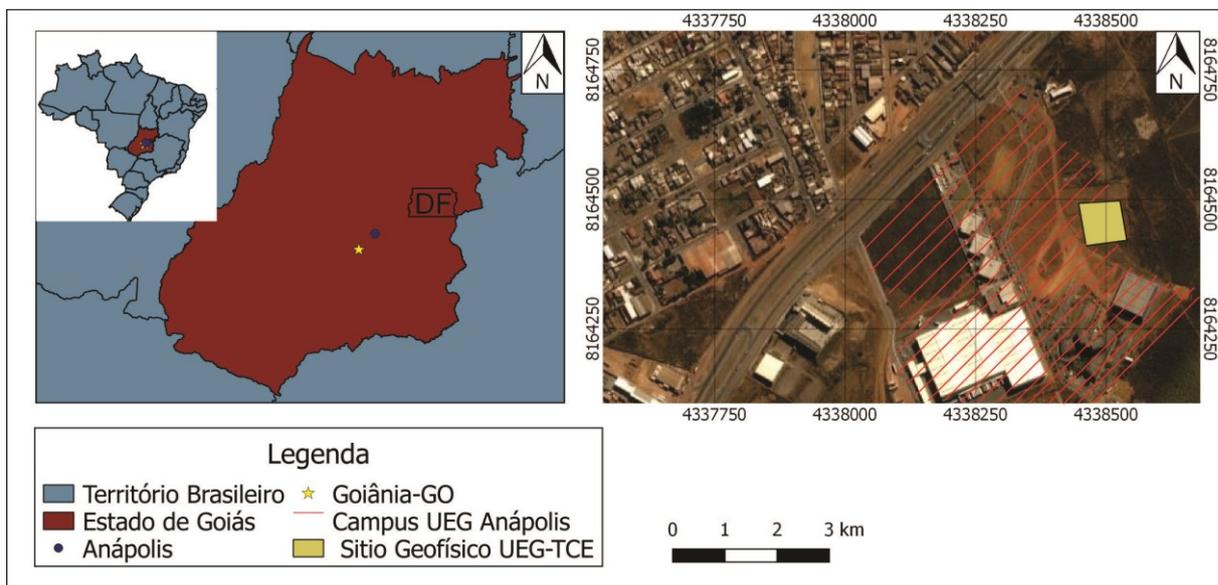


Figura 4.1 Localização da área de estudo. Imagem do satélite BING. Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000. À esquerda a localização da área de estudo em escala nacional e estadual e à direita a localização do sítio geofísico em relação ao campus da UEG, em Anápolis-GO.

Para este estudo foram selecionadas duas trincheiras do sítio que foram revestidas com diferentes materiais. O intuito é simular pavimentos de materiais com arranjos distintos a fim

de diminuir a ambiguidade de interpretações geofísicas relacionadas ao controle de qualidade de pavimentos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, GEOMORFOLÓGICA E PEDOLÓGICA

4.1.1 Aspectos Geológicos

A cidade de Anápolis-GO está inserida geologicamente no Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu, um conjunto de rochas granulíticas orto e paraderivadas do Maciço de Goiás. Ocorrendo sob espessas camadas de latossolos e laterítos, estas rochas afloram de forma pouco expressiva, geralmente em vales arrasados por ações intempéricas e erosivas avançadas (Radaelli, 1994).

Na zona urbana da cidade é mais comum a ocorrência de ortogranulitos, representados por rochas vulcânicas e intermediárias, com evidências de retrometamorfismo e constituídos por epidoto, clorita, sericita, tremolita e carbonato (Radaelli, 1994). Estão comumente sotopostos por espessas camadas de Cobertura Detrito-Laterítica.

4.1.2 Aspectos Geomorfológicos

A compartimentação geomorfológica do estado de Goiás é dividida em 6 regiões e subdividida em 20 unidades. Anápolis está inserida na Região do Planalto Central Goiano, na unidade Planalto do Alto Tocantins (Lacerda Filho *et al.*, 1999).

A influência do contexto geológico nas formas de relevo é bastante representativa, principalmente na assimetria dos vales e na associação entre as formas planas e as Coberturas Detrito-Lateríticas (Lacerda, 2005). A forma de relevo predominante na região de Anápolis é ondulada à suave ondulada (Bandeiras & Santos, 2019).

4.1.3 Aspectos Pedológicos

Alcançando crostas de cerca de 25 metros de espessura, a Cobertura Detrito-Laterítica predomina na Folha Anápolis (Radaelli, 1994). A classificação dos solos da área de estudo, entretanto, de acordo com o Sistema Brasileiro de classificação de solo-SiBCS, é de um plintossolo pétrico concrecionário latossólico com ocorrência de concreções ferruginosas em

todos os horizontes. A textura desse solo é argilosa, rica em muscovita e com presença de cascalho de alta à moderada (Bandeira & Santos, 2019).

4.2 INSTALAÇÃO DOS PAVIMENTOS

As trincheiras foram abertas com retroescavadeiras e por vezes contaram com o auxílio de pás e enxadas. Ambas estão dispostas no mesmo perfil e orientadas segundo eixo N-S magnético, aqui separadas como linha 1 A e linha 1 B. Cada uma delas possui cerca de dois metros e cinquenta centímetros (2,50 m) de profundidade, quatro metros (4 m) de comprimento e um metro e cinquenta centímetros (1,50 m) de largura. A Figura 4.2 mostra a geometria das trincheiras abertas.



Figura 4.2 Fotos evidenciam as escavações realizadas no campus da UEG (Anápolis, GO) para instalação dos alvos geotécnicos.

Na trincheira linha 1B o pavimento flexível é composto por revestimento CBUQ (ou HRA- *Hot Rolled Asphalt*), base granular, brita nº 02, colchão drenante, geotêxtil e geomanta e uma camada de concreto. Os materiais enterrados na linha 1 A estão inclinados 2° para o norte, já os materiais da linha 1 B estão dispostos horizontalmente, conforme mostra a Figura 4.3.

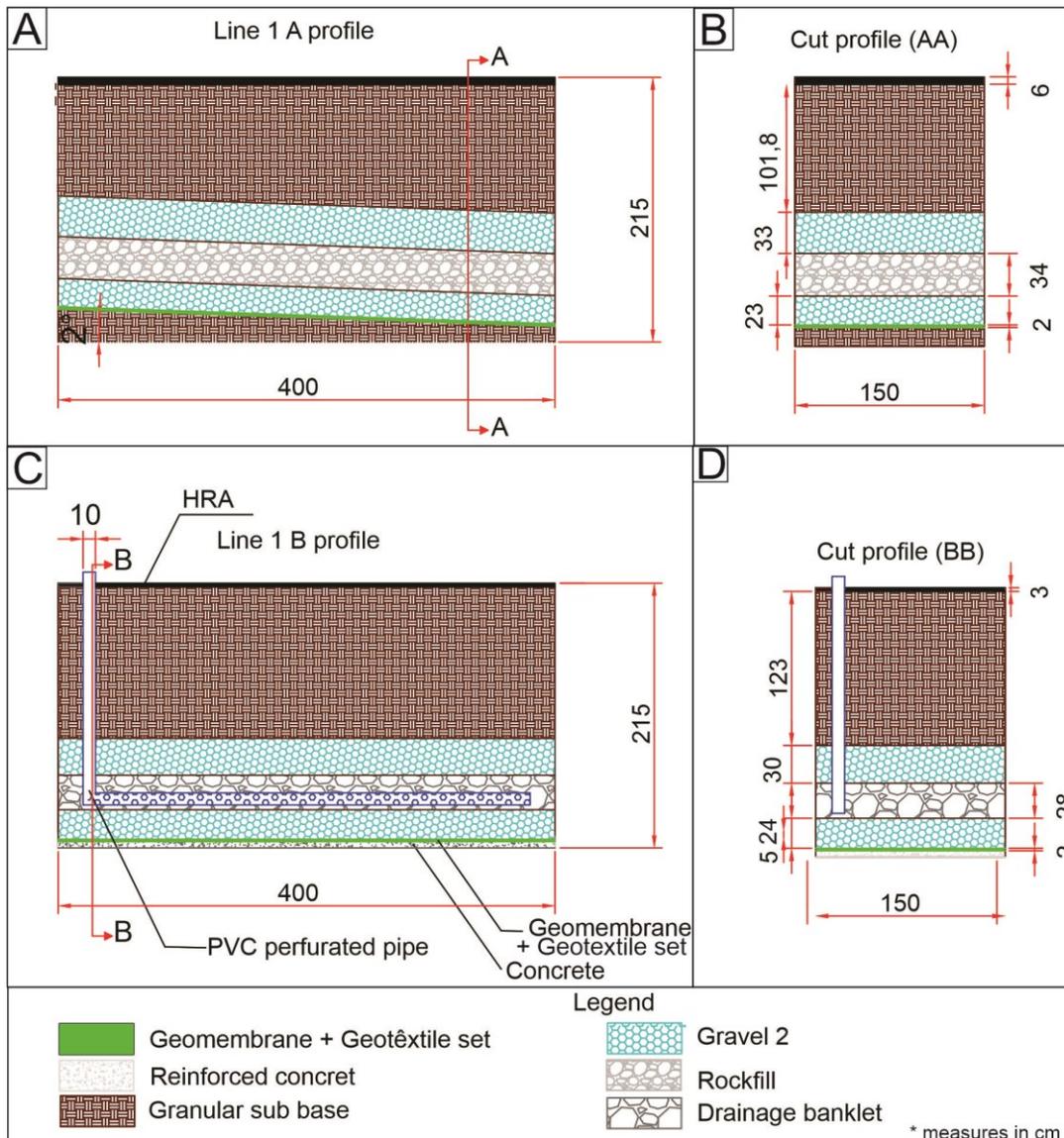


Figura 4.3 Representação gráfica da disposição das camadas de materiais instalados nas linhas 1A e 1B. Medidas em centímetros.

4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE GPR

Na aquisição de dados usaram-se as antenas blindadas de 270, 400, 900 e 1600 MHz, acopladas ao módulo de controle GPR modelo SIR 4000. A unidade de controle é a responsável pela digitalização dos dados adquiridos. A Figura 4.4A mostra a antena de 900 MHz acoplada ao carrinho e a unidade de controle adquirindo dados na linha 1. A Figura 4.4B mostra os dois pavimentos estudados nesse trabalho.

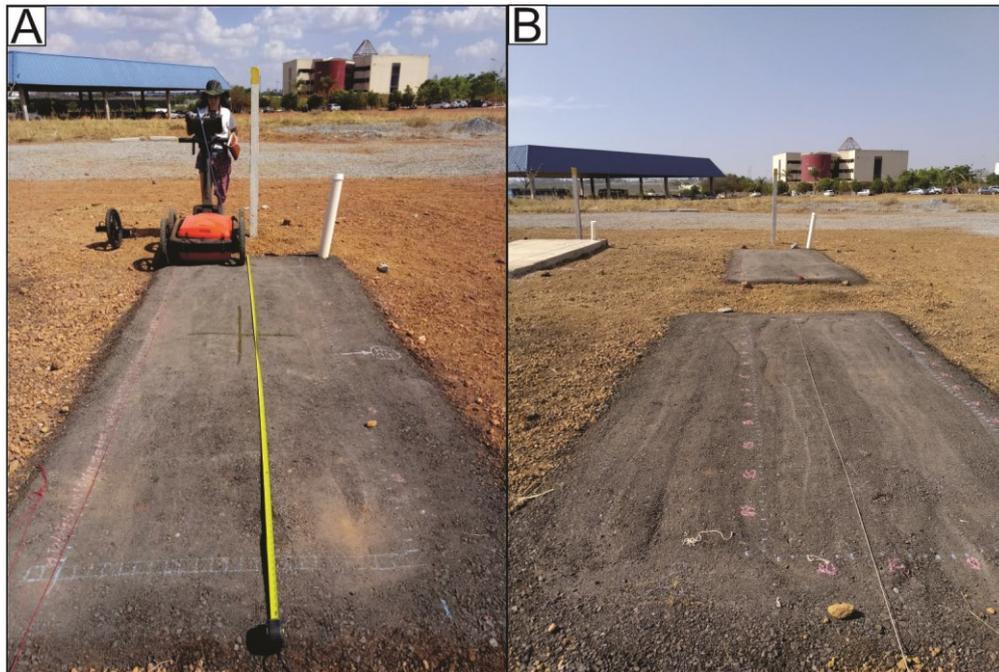


Figura 4.4 (A): foto evidencia a aquisição de dados de GPR com o sistema SIR 4000 acoplado a uma antena blindada de 1600 MHz na linha 1A. (B): foto com os pavimentos linha 1A e linha 1B.

Os parâmetros de aquisição adotados para a antena de 270 MHz foram: 2048 amostras por traço, intervalo de amostragem espacial a cada 0,0033 metros (*scan/unit* 300/m) e janela temporal (*range*) de 60 ns. Para a antena de 400 MHz, os parâmetros usados foram: 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem espacial a cada 0,005 metros (*scan/unit* 200/m) e janela temporal (*range*) de 60 ns. Para a antena de 900 MHz, os parâmetros usados foram: 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem espacial a cada 0,005 metros (*scan/unit* 200/m) e janela temporal (*range*) de 53,33 ns. Já para a antena de 1600 MHz, os parâmetros usados foram: 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem espacial a cada 0,0033 metros (*scan/unit* 300/m) e janela temporal (*range*) de 46,67 ns.

CAPÍTULO 5

5 Ground Penetrating Radar applied to asphaltic pavements- a study in controlled environment

Ground Penetrating Radar aplicado a pavimentos asfálticos – um estudo em ambiente controlado

Jéssica de Souza Moreira ¹; Maria Clara Lopes Paula; Welitom Rodrigues Borges ¹; Antônio Lazaro Ferreira Santos²; & Eduardo Xavier Seimetz

¹*Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC - Ala Central, 70.910-900, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil*

²*Universidade Estadual de Goiás, Campus Anápolis de Ciências Exatas e tecnológicas - Henrique Santillo, 75.132-903, Br 153, nº 3.105, Anápolis, GO, Brasil*
E-mails: moreirageologia@gmail.com; mariaclara.lopespaula@gmail.com; welitom@unb.br; antoniolazaros@gmail.com; edu.seimetz@gmail.com

Resumo

Um dos principais desafios enfrentados no estudo de infraestruturas de rodovias está relacionado à avaliação da qualidade dos pavimentos rodoviários de maneira prática, não-destrutiva e com o menor custo possível. Informações como a espessura das camadas de pavimentos asfálticos são fundamentais na definição da solução adequada para a recuperação de pavimentos. Nesse estudo é testado a aplicabilidade do método *ground penetrating radar* (GPR) na delimitação de camadas de pavimentos do Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicada à Engenharia da Universidade Estadual de Goiás (UEG). Os resultados com as campanhas geofísicas foram considerados satisfatórios pois possibilitaram a identificação de topo e base das 5 primeiras camadas com as antenas de 270, 400 e 900 MHz. A antena de 1600 MHz conseguiu delimitar apenas o topo-base das camadas CBUQ. O conjunto geomembrana e geotêxtil e a camada de concreto não foram identificados nos radargramas. A resolução de cada antena é 9.8 cm para 270 MHz, 6.0 cm para 400 MHz, 2.9 cm para 900 MHz e 1.6 cm para 1600 MHz. Com relação às estimativas de espessura das camadas, as antenas tiveram um percentual de eficiência de 83% (270 e 1600 MHz), 83,29% (400 MHz) e 84,40 % (900 MHz). As estimativas de espessura de camadas obtidas de antenas de GPR foram comparadas com a espessura real usando um teste t pareado ($\alpha=$

0.05). Nenhuma diferença significativa na espessura das camadas foi observada para as antenas GPR versus espessura real.

Palavras-chave: GPR; pavimento asfáltico; SCGRAE-UEG

Abstract

The major challenges in the road infrastructure studies are related to the evaluation of road pavements quality in a practical, non-destructive, and low-cost way. Informations about the thickness of the layers are fundamental to repair pavements. In this study the applicability of ground penetrating radar method in the delimitation of pavements layer at the Shallow Geophysical Test Site Applied to Engineering of Universidade Estadual de Goiás (UEG) is tested. The ground penetrating radar present satisfactory results, identifying the top and base of the first 5 layers with of 270, 400 and 900 MHz antennas. The 1600 MHz antenna was able to delimit only top-base of the CBUQ layers. The geomembrane with geotextile set and concrete layer were not identified in the radargrams. The resolution of each antenna is 9.8 cm for 270 MHz, 6.0 cm for 400 MHz, 2.9 for 900 MHz, and 1.6 cm for 1600 MHz. Concerning layers thickness estimates, the antennas had an efficiency percentage of 83 % (270 and 1600 MHz), 83,29 % (400 MHz), and 84,40 % (900 MHz). Layers thickness estimates obtained from GPR antennas were compared with true thickness using a paired t test ($\alpha= 0.05$). No significant differences in layers thickness were observed for the GPR antennas versus true thickness.

Keywords: GPR; asphaltic pavement; SCGRAE-UEG

5.1 INTRODUCTION

Test site are important to understand forthcoming results in any geophysical survey, both for geotechnical (Grandjean *et al.*, 2000; Paniagua *et al.*, 2004; Porsani *et al.*, 2006; Borges, 2007, Orfanos & Apostolopoulos, 2012; Santos *et al.*, 2019), archeological (Porsani *et al.*, 2006; Borges, 2007, Aragão *et al.*, 2010) and forensic studies (Brasil, 2013; Cavalcanti, 2017; Canata *et al.*, 2020). The previously known characteristics of buried targets such as physical properties, geometry, and depth collaborate in future interpretations of geophysical responses in different materials (Borges, 2007).

In France, researchers of the Central Laboratory of Ponts and Chaussees (LCPC) carried out tests with different ground penetrating radar (GPR) techniques to discuss the performance of this method in civil engineering (Grandjean *et al.*, 2000). Thereafter, others work with test sites applied to civil engineering were also performed in Spain (Paniagua *et al.*, 2004) and Greece (Orfanos & Apostolopoulos, 2012).

In Brazil, the Shallow Geophysical Test Site of IAG-USP is one of the pioneers within geotechnical, archaeological, and environmental studies (Porsani *et al.*, 2006; Borges, 2007). In 2018, researchers of the State University of Goiás (UEG) created the Shallow Geophysical Test Site Applied to Engineering of UEG (SCGRA-ENG) with Goiás State Court of Auditors (TCE), and researchers from University of Brasília (UnB) (Santos *et al.*, 2019). The SCGRA-ENG

contemplate better applications with the electromagnetics, and resistivity methods to subsidize inspections in public highway.

In this work, two pavements within the SCGRA-ENG will be investigated using the GPR method. The aim is to distinguish pavement layers using quantitative and qualitative results registered in radargrams generated by different center frequencies: 270 MHz, 400 MHz, 900 MHz, and 1600 MHz. Furthermore, analysis of each antenna radargram in each layer will be evaluated. Moreover, there will be a discussion of some parameters such as depth of investigation, sampling, and the resolution of each frequency in the geologic context of SCGRA-ENG.

5.2 METHODOLOGY

This section comprises the following tread: (1) selection of the study object area, (2) acquisition of GPR data, (3) data processing and interpretation.

5.2.1 Study Area

The Shallow Geophysical Test Site Applied to Engineering of UEG was created in Anápolis state of Goiás-Brazil (Figure 5.1), next to the Laboratory of Environmental Technologies Research Group (GEPTAS).

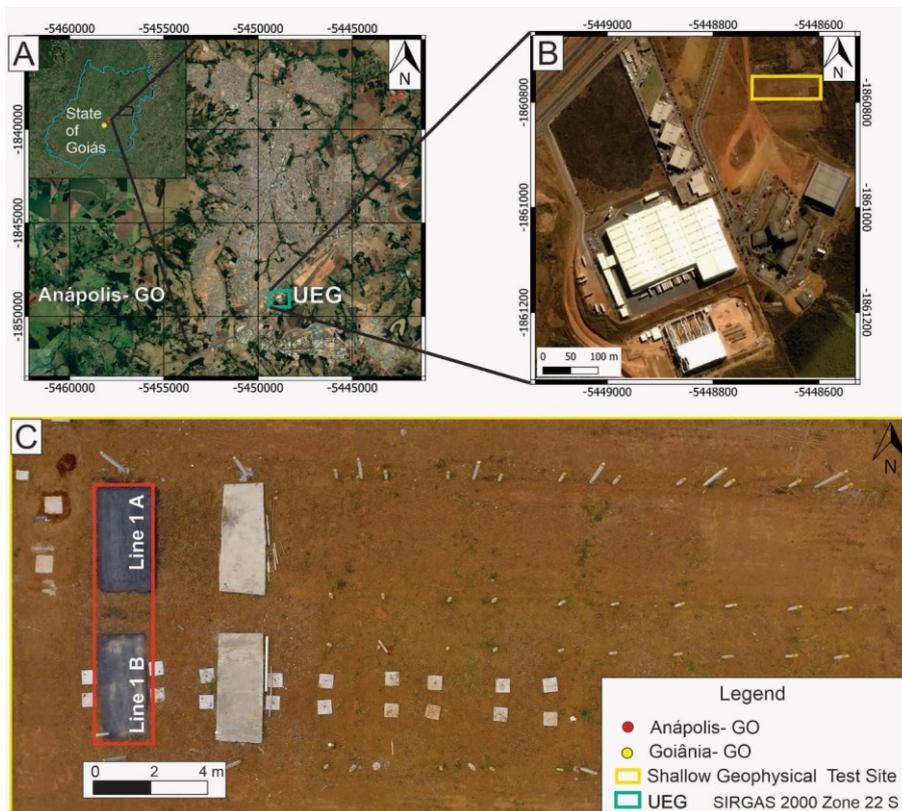


Figura 5.1 Location map of SCGRA: (A) State of Goiás-Brazil, (B) the State University of Goiás-Campus Anápolis, and (C): Shallow Geophysical Test Site with the investigated line highlighted in red.

In this study, line 1 (Figure 5.2) of SCGR-ENG was selected containing two pavements, named as line 1A and line 1B.

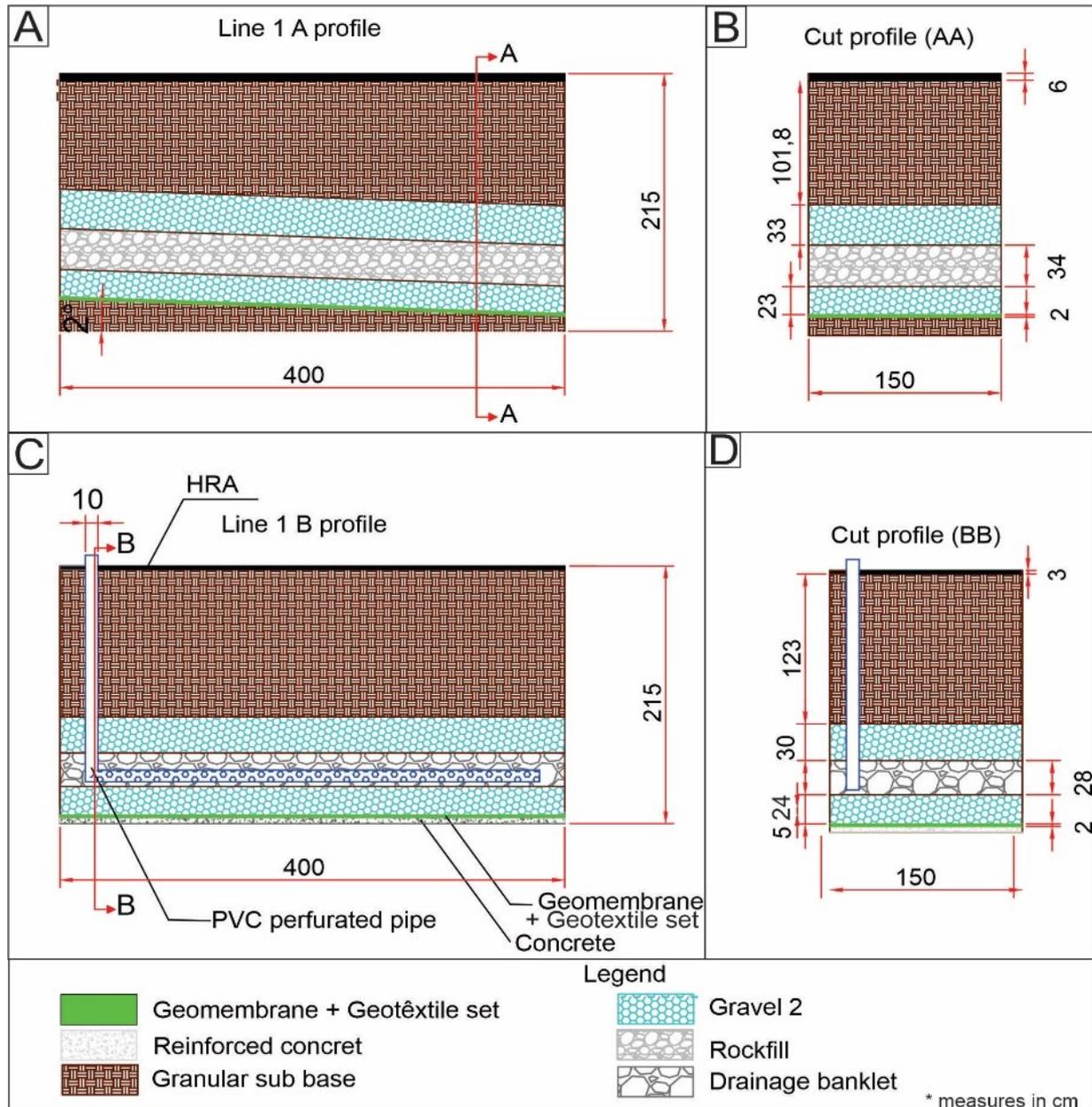


Figura 5.2 Sketch of the SCGRA containing line 1 (flexible pavement). (A): profile of line 1A; (B) cross-sectional profile of line 1A; (C): profile of line 1B and (D): cross-sectional profile of line 1B. Note: the thickness of the layers is an average, since the thicknesses vary a few centimeters in some sections. Measures are given in centimeters.

For line 1A, the flexible pavement is composed by layers of: a mixture of gap-graded aggregate, filler aggregate and bitumen binder called Hot Rolled Asphalt (HRA), granular base, gravel n°02, rockfill, gravel n°2, and geomembrane with geotextile set in which the layers are inclined 2° degrees up in north side. In line 1B, the flexible pavement consists of HRA, granular base, gravel n°2, drainage banklet, gravel n°2, geomembrane with geotextile set and concrete layer.

5.2.2 Data acquisition

Data acquisition was performed with different antenna frequencies: 270 MHz, 400 MHz, 900 MHz, and 1600 MHz. The survey was conducted on a GPR SIR4000 control unit from Geophysical Survey System Inc (GSSI). Line 1 was carried out in a common-offset mode for each antenna, covering 2 pavements per profile in the S/N direction. There, 4 profiles were performed along line 1.

The profiles were acquired with trace interval of 0.0033 m (for 270 and 1600 MHz) and 0.005 m (for 400 and 900 MHz), with 2048 samples for 270 MHz antenna and 1024 samples for 400,900, and 1600 MHz. The time window for 270 and 400 MHz was 60 ns, while for 900 MHz the time window choose was 53.33 ns. The time window for 1600 MHz was 46.77 ns. The acquisition parameters are shown in Table 5.1.

Center frequency (MHz)	Time Range (ns)	Samples	Scan/unit (m)
270	60	2048	300
400		1024	200
900	53.33		
1600	46.67		300

Tabela 5.1 Acquisition parameters used in this work.

To complement the identification of layers, in addition to the visual interpretation of radargrams, was analyzed the envelope trace. The envelope trace shows the intensity of energy signal and allow to visualize changes of amplitudes are significative. For amplitude analysis, were collected acquisitions with 1D point mode with stopped antennas in the center of each pavement. The same acquisition parameters used in constant offset acquisitions were used in this acquisition.

5.2.3 Data processing

The GPR data was processed with Reflex-Win 7.5.8 software (Sandmeier, 2014). The processing flow track (Figure 5.3) this sequence: (1) Static correction: to mark the beginning of the antenna's electromagnetic energy from the investigated surface (Olhoeft, 2000); (2) Mean Filter: averages the amplitudes of a trace over in a time interval. This filter was used to normalize the high gain present in the first nanoseconds; (3) Background removal: remove background noises

(Cassidy,2009); (4) Gain Function: highlight reflectors using an interactive function that can be applied linearly and/or exponentially at a given depth; (5) Dewow: perform a running average through the data eliminating possible low frequencies.

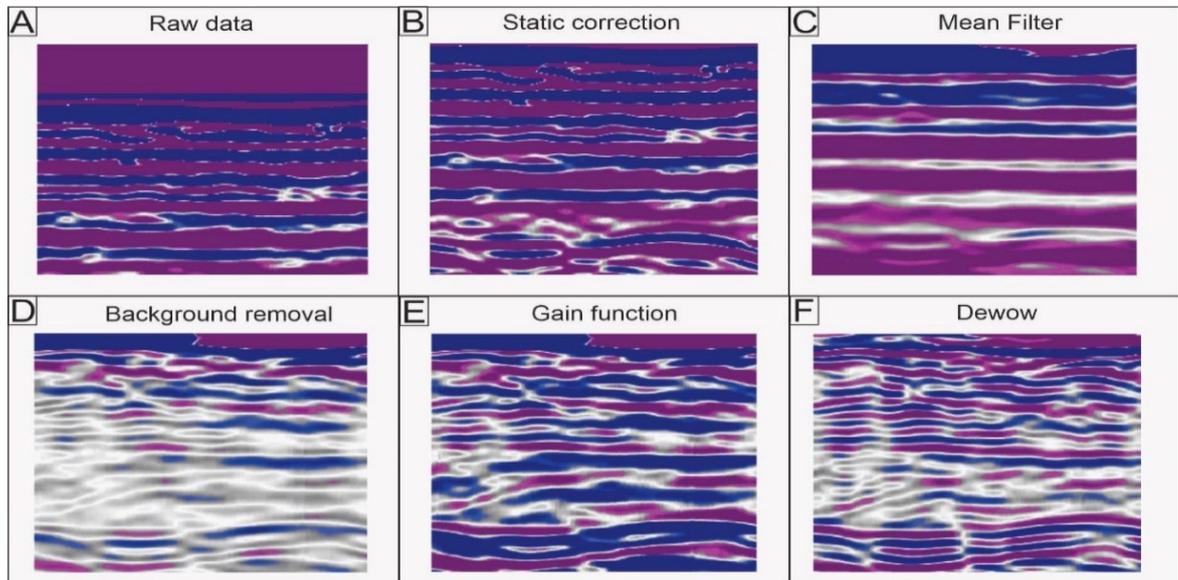


Figura 5.3 Processing adopted to GPR datas with illustration of result of each step: (A) raw data, (B) set time zero, (C) mean filter, (D) background removal, (E) data with gain function, and (F) dewow.

5.3 RESULTS AND DISCUSSION

The results will be presented as follows: (1) signal analysis, to observe the intensity of energy signal and changes of amplitudes (2) analysis of reflection patterns, to identify reflection patterns, (3) layers velocities, and (4) Layers thickness estimates and Paired t test to compare layers thickness estimates from GPR antennas versus true thickness.

5.3.1 Signal analysis

In this section, the GPR data amplitude's variations among a layer to another within the given frequencies of 270 MHz, 400 MHz, 900 MHz, and 1600 MHz for two pavements. Considering the further correlation of amplitudes coming from different frequencies, a time window of 40 ns was chosen. Only the 270, and 400 MHz frequencies registered 50 ns. However, just the five first layers were identified. The amplitude values were divided by 3200 for a standard plotting with lower values. The layers limit was delimited by the amplitude's changes and the previously known target depth.

5.3.1.1 Line 1A

Figure 5.4 display the 1D acquisition of line 1A pavement processed and the amplitude energy of envelope trace. The maximum value registered in envelope trace was 200.

Although the Hilbert's Transform is a useful tool to identify regions where the amplitude change (Cunha *et.al*, 2019), in this case, it was not possible to distinguish the boundaries from all the layers with all the used frequencies. Solely the HRA layer base could be identified with the 270 MHz antenna. Yet, this is not applied to other frequencies. The envelope energy intensity is quite low after its peak in the first 2 ns, recording maximum values of 40% for 270 MHz, 100% for 400 MHz, 30% for 900 MHz, and 50% for 1600 MHz.

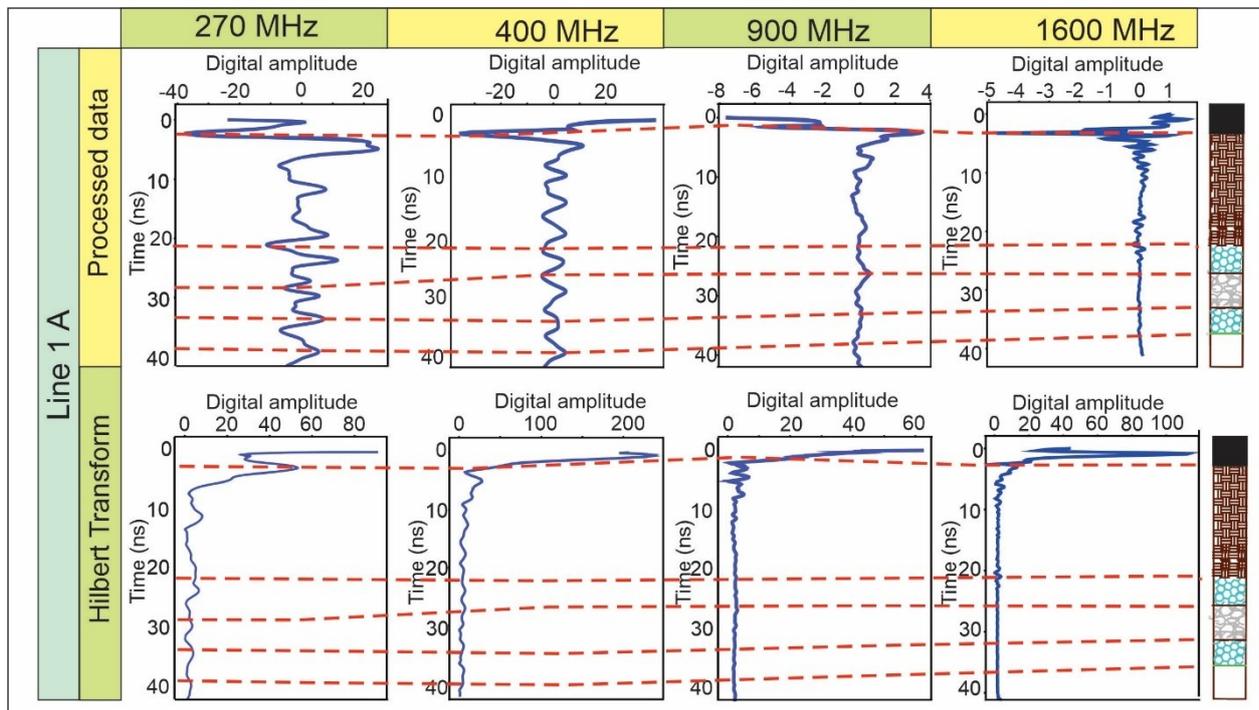


Figure 5.4 Digital amplitudes of L1A pavement acquired with 270, 400, 900, and 1600 MHz.

5.3.1.2 Line 1B

Figure 5.5 present the 1D acquisitions accomplished for line 1B pavement with its data processing and signal envelope (Hilbert's Transform). The further descriptions follow the shallowest to the deepest layer.

Analyzing the envelope energy intensity, it can be inferred that values corresponding to the boundaries of the layers are all close to zero, as occurred in the line 1A pavement, which difficult the definition of the targets top and base using this processing. The maximum intensities recorded are in the first 2 ns and reach values of 30% for 270 MHz, 100% for 400 MHz, 30% for 900 MHz, and 60% for 1600 MHz.

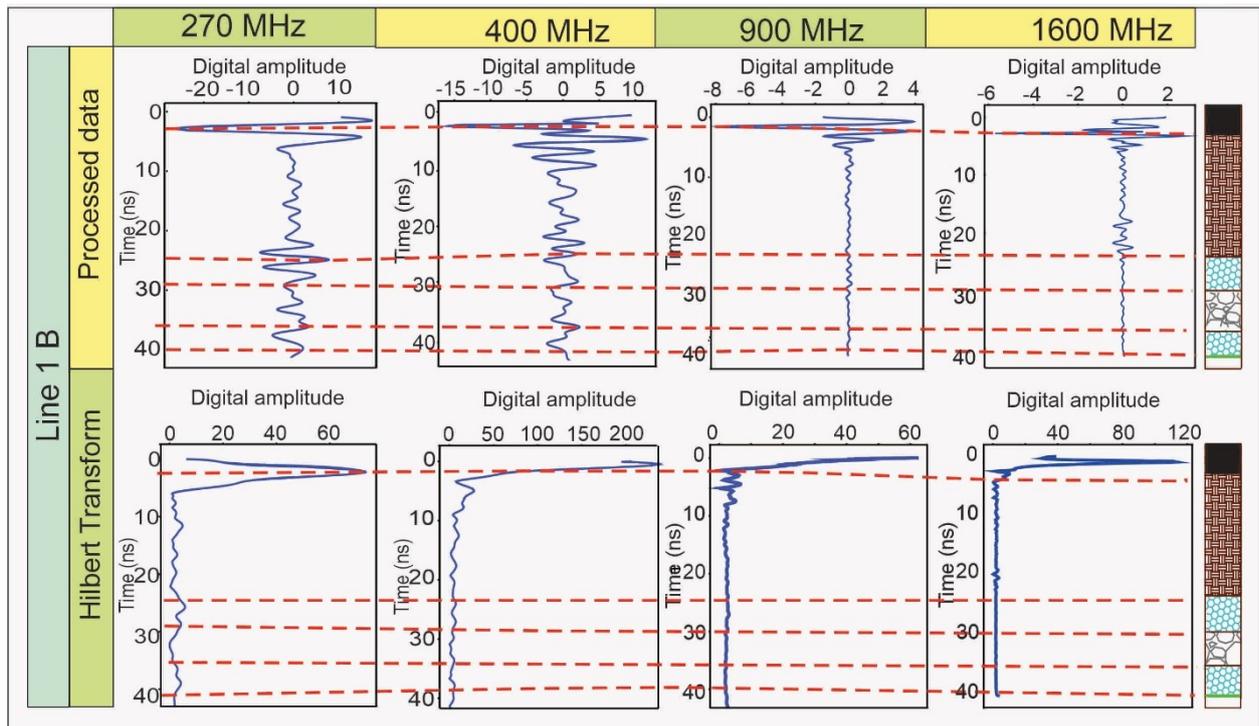


Figura 5.5 Digital Amplitudes of line 1 B pavement acquired with 270, 400, 900, and 1600 MHz antennas.

It is notable that after the electromagnetic wave cross the sub base layer, the amplitudes recorded are close to zero on both pavements (line 1A and line 1B). It is also observed that the amplitude value decreases from the lowest frequency antenna to the highest frequency. This which can be explained by the energy loss of the signal as it reaches greater depths. The attenuation of the electromagnetic wave reduces the amplitude in depth and is proportional to the frequency increase. The attenuation is also influenced by the signal interaction with different physical properties of the materials presented in the medium (Stratton,1940; Davis & Annan, 1989; Annan, 2003).

5.3.2 Reflection pattern analysis

The limit on the interface of each layer were highlighted according to the reflection patterns and amplitude responses. All radargrams had the Reflexw plot scale set to 0.3125, given that the GSSI - SIR4000 acquires data with 32-bit binary sampling. This adjusted value establishes a more realistic comparison of the intensity of the amplitudes of the reflecting targets using all antennas.

In Figure 5.6, the radargram sections referring to the profiles acquired in the south-north direction of line 1 which on the left is the line 1B pavement and on the right the line 1 A pavement. The profiles were acquired with the 270, 400, 900, and 1600 MHz antennas. In this context, Figure 5.6A (270 MHz antenna) present reflectors with bigger amplitudes if compared to Figures 5.6B (400 MHz antenna), 5.6C (900 MHz antenna), and 5.6D (1600 MHz antenna). This is probably

due the amplitude decays according to the antenna frequency. Present in all radargrams between distances 4 and 6 meters from 15 ns, the reflectors show a very low amplitude/marked attenuation. This phenomenon happens because this interval corresponds to a part unhandled soil that separates the two pavements. Geophysical campaigns carried out previously to acquire the background of the area showed that the GPR signal presents a strong attenuation in the environment, most likely recurring from the presence of clay-sand materials, quite mottled, and with ferricrete (Santos *et al.*, 2019).

Regarding the depth of investigation, it is clear that the frequency of 270 and 400 MHz antennas (Figure 5.6A and Figure 5.6B) have a greater range, reaching a time window of 50 ns, while a 900 MHz antenna (Figure 5.6C) registers approximately 45 ns. The 1600 MHz antenna (Figure 5.6D) can acquire data up to approximately 20 ns. After that time, the signal is attenuated and it is not possible to identify the limits of the other layers.

Figure 5.7 shows the radargram sections interpretation. On the line 1A pavement, the HRA layer (layer 1) was identified in all the antennas. The sub-base layers (layer 2), gravel n°2 (layer 3), rockfill (layer 4), gravel n°2 (layer 5) only had their top-base limits delimited on the 270, 400, and 900 MHz antennas. The 1600 MHz antenna did not identify these layers because of their limited depth of investigation, which can only identify shallower targets.

It was also not possible to identify layers 6 (geomembrane set and geotextile set with none of the antennas for several reasons: (1) because of the variety of layers investigated (heterogeneity) that causes signal attenuation with all antennas, (2) the wavelength/resolution of the 270 and 400 MHz antennas (Table 5.2) does not allow the identification of the top and bottom of the geomembrane and geotextile set, as this layer is 5cm thick while the wavelength of these antennas is 9.8 and 6 cm respectively. The 900 and 1600 MHz antennas would probably be able to identify the top and bottom of this layer if it were not for the heterogeneity of the medium and especially the depth in which these targets are buried.

On the line 1B pavement, the boundaries of the HRA layer (layer 1) were identified with all antennas. The top and bottom of the sub-base layers (layer 2), gravel n°2 (layer 3), drainage banklet (layer 4) and gravel n°2 (layer 5) were delimited with the antennas of 270, 400, and 900 MHz. The 1600 MHz antenna was not possible because of the limited depth of investigation of this frequency.

None of these antennas were able to delimit the geomembrane and geotextile set (layer 6) and reinforced concrete (layer 7), probably because of the heterogeneity of the medium and the wavelength of the 200 and 400 MHz antennas (Table 5.2) while the layer thickness is 2 cm. The

1600 MHz antenna, on the other hand, was unable to identify the top-base of layers 2 to 7 because of the limited depth of investigation and heterogeneity of the medium.

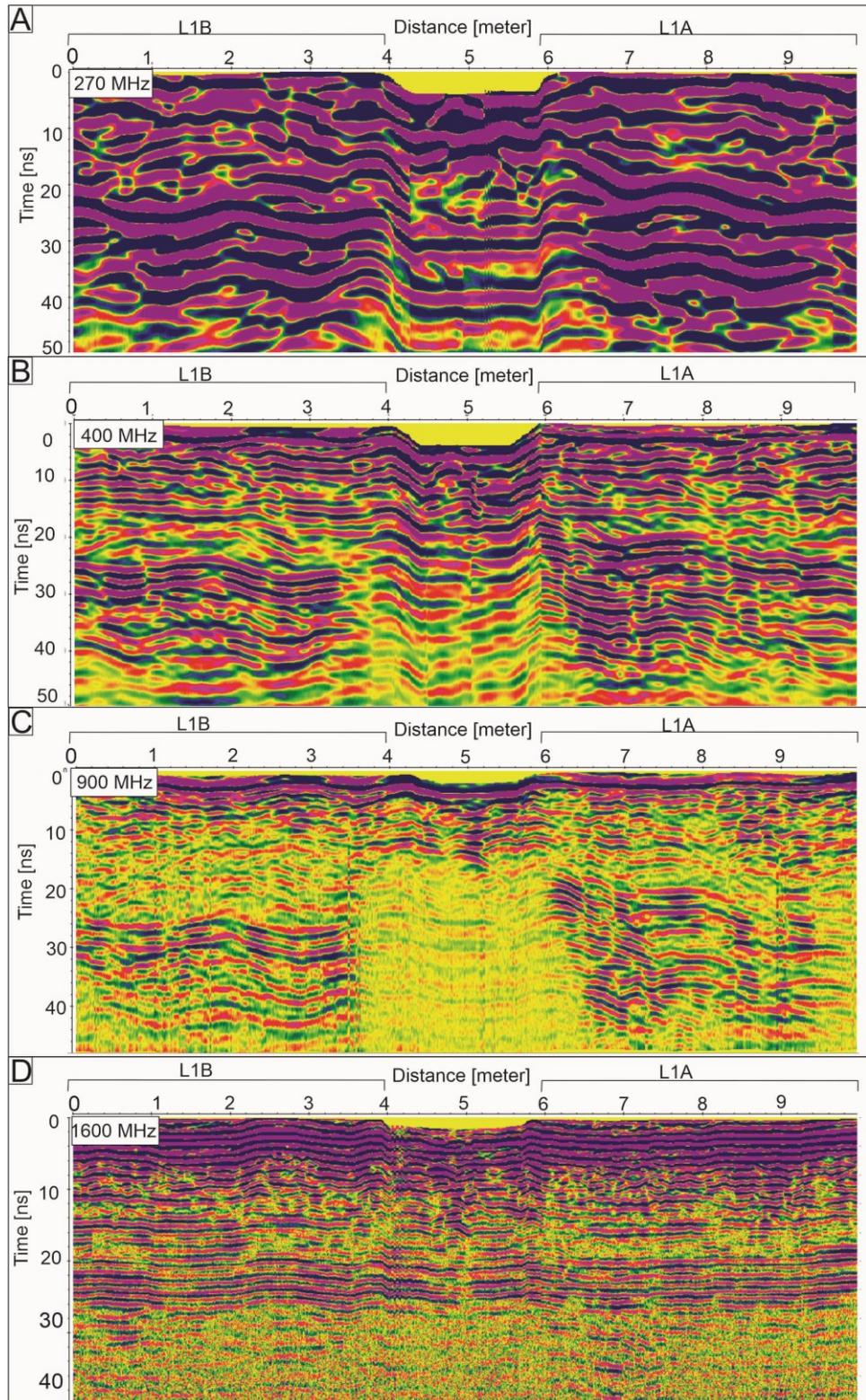


Figura 5.6 Radargram sections with 4 frequency antennas. (A) 270 MHz antenna, (B) 400 MHz antenna, (C) 900 MHz antenna, and (D) 1600 MHz antenna. South-north profile.

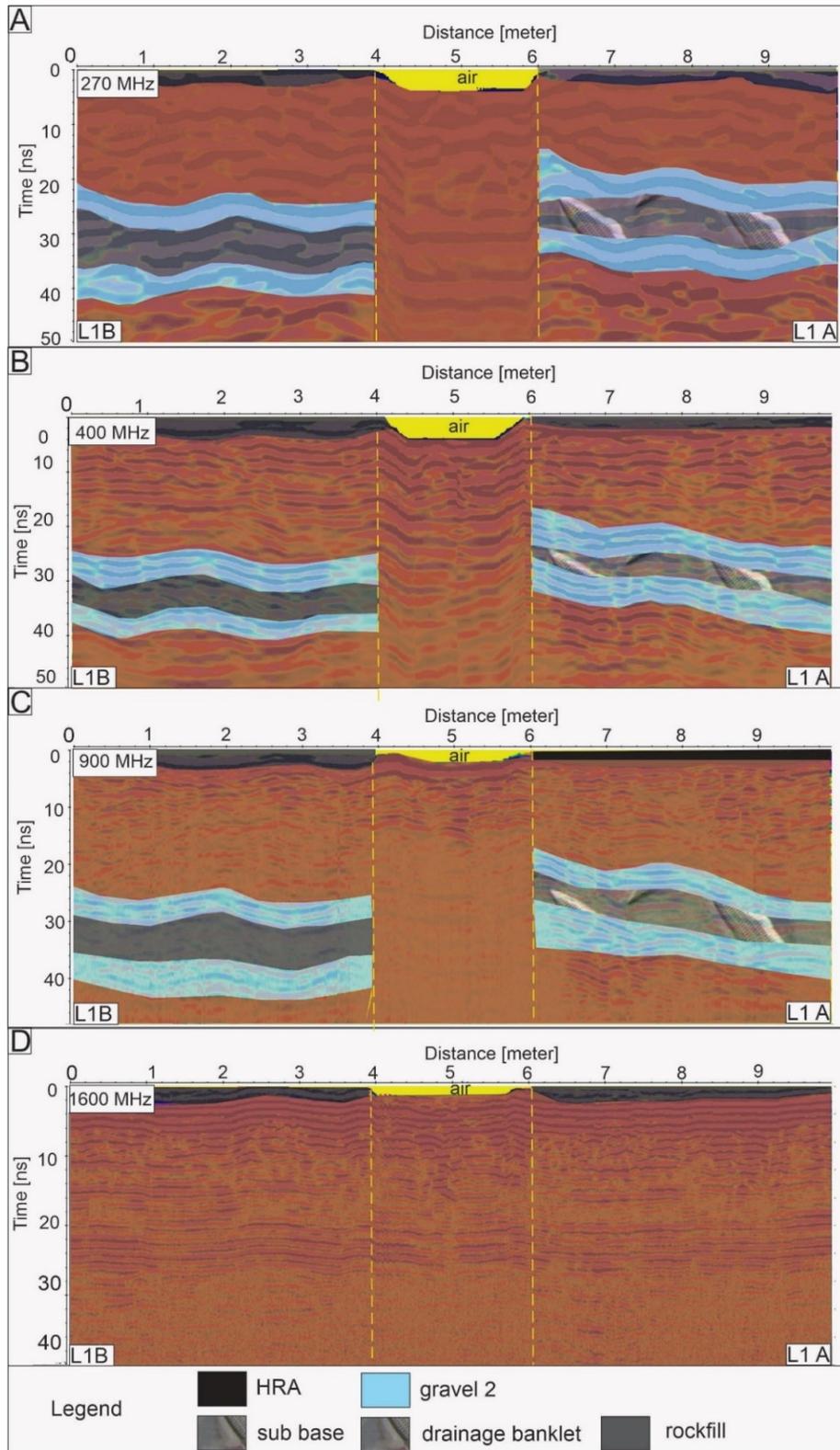


Figura 5.7 Radargram profiles with its layers interpretation. (A) 270 MHz antenna, (B) 400 MHz antenna, (C) 900 MHz antenna, and (D) 1600 MHz antenna. L1A= line 1 A, L1B= line 1 B. South-north profile.

Center frequency	270 MHz	400 MHz	900 MHz	1600 MHz
Wavelength (cm)	9.8	6.0	2.9	1.6

Tabela 5.2 Wavelength of each center frequency. Velocity medium: 0.04 m/ns.

5.3.3 Velocities estimates from GPR

The layers velocities were calculated with the average value of each layer thickness. From the real depth (average) in which the layer's base are buried and relating the reflector to them, the velocities of the layers was calculated (1). The velocity (V) depends of layers thickness (2ΔS) and time (T).

$$V = \frac{2\Delta S}{T} \quad (1)$$

Tables 5.3 and 5.4 present the travel time and electromagnetic wave velocity for each layer calculated for each antenna.

270 MHz		400 MHz		900 MHz		1600 MHz		Layer
t (ns)	v (m/ns)	t (ns)	v (m/ns)	t (ns)	v (m/ns)	t (ns)	v (m/ns)	
1.40	0.085	2	0.06	1.60	0.075	2.09	0.057	C1 (HRA)
19.6	0.010	18	0.11	19.4	0.103	**	**	C2 (sub-base)
6		5	0.12	6	0.10	**	**	C3 (gravel n ^o 2)
6.3	0.104	5	0.132	5	0.132	**	**	C4 (rockfill)
4.7	0.97	3	0.15	4	0.115	**	**	C5 (brita n ^o 2)

Tabela 5.3 Travel time and velocities of the layers identified from the average of the real thickness and radargrams obtained with the frequency antennas 270, 400, 900, and 1600 MHz on line 1A. ** It was not possible to calculate the layer velocity.

270 MHz		400 MHz		900 MHz		1600 MHz		Layer
t (ns)	v (m/ns)	t (ns)	v (m/ns)	t (ns)	v (m/ns)	t (ns)	v (m/ns)	
1.2	0.05	1.14	0.05	1.2	0.05	1.07	0.056	C1 (CBUQ)
23.1	0.106	24.66	0.09	25	0.098	**	**	C2 (sub-base)
5.5	0.109	4.2	0.142	3.8	0.157	**	**	C3 (gravel n ^o 2)
	0.101	4	0.14	8	0.08	**	**	C4 (drainage banklet)
6	0.08	5	0.096	**	**	**	**	C5 (gravel n ^o 2)

Tabela 5.4 Travel time and velocities of the layers identified from the average of the real thickness and radargrams obtained with the frequency antennas 270, 400, 900, and 1600 MHz on line 1B. ** It was not possible to calculate the layer.

5.3.4 Layers thickness estimates and Paired t test

In order to determine the efficiency of GPR in identification of asphalt layers thickness, the Table 5.5 shows the average of layers thickness estimates from GPR and the average of true layers thickness.

Line 1 A					Line 1 B					Layer
270 MHz	400 MHz	900 MHz	1600 MHz	True thickness	270 MHz	400 MHz	900 MHz	1600 MHz	True thickness	
0.08	0.09	0.08	0.08	0.06	0.11	0.14	0.16	0.05	0.03	C1
0.86	0.93	0.95	*	1	0.98	1.02	1.07	*	*	C2
0.3	0.21	0.17	*	0.30	0.25	0.25	0.19	*	*	C3
0.3	0.33	0.36	*	0.33	0.44	0.33	0.35	*	*	C4
0.28	0.32	0.24	*	0.23	0.27	0.26	0.30	*	*	C5

Tabela 5.5 Layers thickness estimated obtained from GPR and true thickness (average). Measures are given in centimeters.

A paired t test ($\alpha=0.05$) was used to compare differences in thickness layers between GPR antennas measurements and average true thickness. No significant differences in the scores for GPR measurements and true thickness were observed. The 1600 MHz antenna could only identify one layer and thereat it was not possible to apply the t test with this antenna. The Table 5.6 shows results from t test analysis for line 1 A and line 1 B.

Paired t test	Line 1 A				Line 1 B			
	270 MHz	400 MHz	900 MHz	1600 MHz	270 MHz	400 MHz	900 MHz	1600 MHz
P-value	0.574	0.819	0.467	*	0.8162	0.648	0.834	*
Alpha level	0.05							
Significance	There was not a significance difference in the scores for GPR measurements and true thickness							

Tabela 5.6 Results from t test analysis for line 1 A and line 1 B.

5.4 CONCLUSIONS

The results with the geophysical campaigns were considered satisfactory considering that they made it possible to identify the top and bottom of the first 5 layers with the 270, 400 and 900 MHz antennas. As expected, the 1600 MHz antenna was able to delimit only the top- base of the HRA layers, because of the limited depth of investigation. The geomembrane and geotextile set present on the two pavements and the concrete layer (the last layer of the line 1B pavement) were not identified in the radargrams. The resolution of each antenna is 9.8 cm for 270 MHz, 6.0 cm for 400 MHz, 2.9 for 900 MHz, and 1.6 cm for 1600 MHz.

Concerning layers thickness estimates, the antennas had an efficiency percentage of 83 % (270 and 1600 MHz), 83,29 % (400 MHz), and 84,40 % (900 MHz). The results from t test shows that the difference for GPR measurements and true thickness is no significant ($\alpha > 0.05$).

Regarding the geomembrane and geotextile set, this is mainly explained because this layer is thinner than the wavelengths of the 270, 400, and 900 MHz antennas. The 1600 MHz antenna would be the only one capable of delimiting the top-base of this layer, if it is not located deeper than the antenna range. Another factor that difficult the identification of these layers is the heterogeneity of the medium, which causes the attenuation in the GPR signal.

The same pattern of geometry and reflection at the base and top of the layers present in all layers of radargrams corroborates for the delimitation of the layers. These standards reaffirm the interpretation about the target limits and emphasize the accuracy of the method in geotechnical studies.

It is clear that the higher the frequency, the shorter the wavelength and therefore the better the resolution. However, some information needs to be taken into account before choosing the frequency of the GPR antenna, such as size, geometry, depth in which the target is buried and the heterogeneity of the medium. The sampling interval is also a fundamental parameter for delimiting the borders of a target.

The implementation of the Shallow Geophysical Test Site Applied to Engineering of UEG contributes with the understanding of the GPR method response in asphalt pavements, even though the asphalt pavements studied in this work are not faithful to traditional pavements. Future GPR campaigns on highways are suggested in which it is possible to withdraw testimonies to validate the accuracy and compare geophysical responses in layers with materials other than those presented here.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES for the granting of the scholarship in the master's course, to the Goiás State Court of Auditors (TCE) for the support based on agreement No. 001/2018 UEG / TCE- GO and the Laboratory of Applied Geophysics (LGA) of the Institute of Geosciences of the University of Brasília, for the assignment of equipment and support for data processing.

Referências

- Annan, P. A. 2003. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications Table of Contents. *Sensors & Software Inc.*
- Aragão, R.C, Luiz, J.G. & Lopes, P.R.C. 2010. Metodologia geofísica aplicada ao estudo arqueológico dos sítios Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28 (2): 249-263.
- Borges, W.R. 2007. *Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no Planejamento urbano e Meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP*. Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Tese de doutorado, 265 p.
- Brasil, D. L. 2013. *Investigação Geofísica Forense e Antropológica com o método GPR no cemitério do Tapanã e no cemitério Perdido de Mosqueiro (Belém, Pará)*. Programa de Pós graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Dissertação de Mestrado, 94 p.
- Canata, R.E., Ferreira, F.J., Borges, W.R. & Salvador, F.A.S. 2020. Analysis of 2D and 3D GPR responses in the Federal University Of Paraná Forensic Geophysics Controlled Site – A Case Study. *Brazilian Journal of Geophysics*, 38(2): X-Y.
- Cassidy, N. J. Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. In: JOL, H.M. 2009. **Ground Penetrating Radar: Theory and applications**. Elsevier Science, p 141-172.
- Cavalcanti, M. M. 2017. *Estudo da Resposta Geofísica em diferentes cenários de sepultamento*. Programa de Pós graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 197 p.
- Cunha, M.R., Borges, W.R., Cunha, L.S. 2019. Concrete Pavement Layers Investigation with GPR in the BR-101 Highway. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 42 (1): 308-316.
- Davis, J.L. & Annan, P.A. 1989. Ground-Penetrating Radar for high-resolution Mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37:531-551.
- Grandjean, G., Gourry, J.C. & Bitri, A.B. 2000. Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, 45:141–156.
- Olhoeft, G.R. 2000. Maximizing the information return from Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43: 175–187.

- Orfanos, C. & Apostolopoulos, G. 2012. Analysis of different geophysical methods in the detection of an underground opening at a controlled test site. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 15 (1): 7-18.
- Paniagua, J., Del Rio, M. & Rufo, M. 2004. Test site for the analysis of subsoil GPR signal propagation. In: TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 21-24 JUNE, 2004, DELFT, THE NETHERLANDS.
- Porsani, J. L., Borges, W.R., Rodrigues, S. I & Iodo, F.Y. 2006. O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1): 49-61.
- Sandmeier, K. J. REFLEX Version 7.5, Windows 9x/2000/NT. 2014. Program for the Processing of Seismic, Acoustic or Eletromagnetic Reflection, Refraction and Transmission Data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 209p.
- Santos, A. L. F.; Maia, T.C.; Borges, W.R.; Nishi, E. & Seimetz, E.X. 2019. Implantação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicado a Engenharia da UEG- Campus Henrique Santillo, Anápolis-GO. *Revista Mirante, Anápolis (GO)*, 12: 95-111.
- Stratton, J.A. 1940. *Electromagnetic theory*. New York and London, Mcgraw-Hill Book Company, Inc. 648 p.

CAPÍTULO 6

6 DISCUSSÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados com as campanhas geofísicas foram considerados satisfatórios levando em consideração que possibilitaram a identificação de topo e base das 5 primeiras camadas com as antenas de 270, 400 e 900 MHz. Como era esperado, a antena de 2 GHz conseguiu delimitar apenas o topo-base das camadas de CBUQ, por causa da limitação na profundidade de investigação. O conjunto geomembrana + geotêxtil presente nos dois pavimentos e a camada de concreto (última camada do pavimento L1B) não foram identificadas nos radargramas.

No que diz respeito ao conjunto geomembrana+geotêxtil, essa camada não foi identificada nos radargramas porque essa camada é menos espessa que a resolução das antenas 270, 400 e 900 MHz (9,8 cm; 6,0 cm e 2,9 cm respectivamente). A antena de 1600 MHz (resolução de 1.6 cm) seria a única capaz de delimitar topo-base dessa camada, se a mesma não tivesse localizada a uma profundidade maior que o range dessa antena.

Além disso, o mesmo padrão de geometria e de reflexão na base e topo das camadas presente em todas as seções de radargramas corroboraram com a delimitação das camadas. Esses padrões reafirmam a interpretação de onde começa e termina os limites dos alvos e enfatizam a acurácia do método em estudos geotécnicos.

Sobre a atenuação do sinal de GPR apresentado entre os pavimentos L1B e L1A, a partir de 15 ns, refere-se à porção de solo não-manuseado com presença de materiais argilo-arenosa, bastante mosqueados e com crostas de ferro (Santos *et al.*, 2019).

Fica claro neste trabalho que quanto maior a frequência da antena, menor o comprimento de onda e, portanto, melhor a resolução. No entanto algumas informações precisam ser levadas em consideração antes da escolha da frequência da antena de GPR, tais como: tamanho, geometria e profundidade no qual o alvo está enterrado e a heterogeneidade do meio. O intervalo de amostragem temporal também é um parâmetro fundamental para delimitação do topo e base de uma camada.

Na estimativa das camadas de pavimentos as diferentes propriedades dielétricas das camadas permitem que sejam distinguidas entre si a partir da diferença entre as reflexões nas interfaces. Em contrapartida, essa diferença diminui o alcance do GPR, considerando que a heterogeneidade também é um fator que causa atenuação do sinal.

Apesar da Transformada de Hilbert ser útil para identificar regiões onde as mudanças de amplitude acontecem (Cunha *et.al*, 2019), nesse trabalho não foi possível identificar os limites das camadas com todas as frequências usando esse método. Provavelmente isso se dá porque a intensidade da energia do envelope com essas antenas é muito alta nos primeiros ns e caem expressivamente após esse intervalo, dificultando a identificação das mudanças de amplitudes quando o sinal passa de um determinado meio para outro diferente.

A implementação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicada a Engenharia da UEG permite compreender a interação do método GPR com pavimentos asfálticos, muito embora os pavimentos asfálticos estudados neste trabalho não sejam fiéis aos pavimentos tradicionais. Sugere-se futuras campanhas de GPR em rodovias nas quais seja possível as retiradas de testemunhos para validação da acurácia e comparação das respostas geofísicas em camadas com materiais distintos aos apresentados aqui.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGILENT TECHNOLOGY, 2006. Agilent basics of measuring the dielectric properties of materials. Application Note.
- AL- QADI, I.L. & LAHOUAR, S. 2005. Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice. *Construction and Building Materials*, vol. 19, p.763–772
- AMERI, M., NOVIN, M.K. & YOUSEFI. 2014. Comparison of the field measurements of asphalt concrete densities obtained by ground-penetrating radar, pavement quality indicator and the borehole coring methods. *Road Materials and Pavement Design*. Vol. 15, No. 4, p. 759–773.
- ANNAN, A. P. & COSWAY, S.W. 1992. Ground penetrating radar survey design. In: PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, SAGEEP'92, Oakbrook, Illinois, April 26-29, p. 329-351.
- ANNAN, A. P. 2001. GPR- Trends, history, and futures developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 3 (4), p. 253 – 270.
- ANNAN, A. P. 2003. **GPR Principles, Procedures & Applications**. Sensors & Software Inc., 286 p.
- ANNAN, A. P. Ground penetrating radar. In: BUTLER, D.K. 2005 (eds) **Near surface geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA No. 13, p. 357–438.
- ANNAN, A. P. Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In: JOL, H.M. 2009. **Ground Penetrating Radar: Theory and applications**. Elsevier Science, p 4-38.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).
- AYALA-CABRERA, D., HERRERA, M. & PÉREZ-GARCÍA, R. Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. *Journal of Applied Geophysics*, v. 75, p. 679–686.
- BAI, H., SINFIELD, J.V., 2017. Effects of GPR antenna configuration on subpavement drain detection based on the frequency-shift phenomenon. *Journal Applied Geophysics*, v.146, p. 198–207.
- BAKER, G.S.; JORDAN, T.E. & TALLEY, J. 2007. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in BAKER, G.S., & Jol, H.M., eds., **Stratigraphic Analyses Using GPR: Geological Society of America Special Paper** 432, p. 1–18.
- BANDEIRA, B.N. & SANTOS, A.L.F. 2019. Classificação e caracterização pedogeotécnica de um plintossolo do campus da Universidade Estadual de Goiás, Anápolis-Go. *Revista Mirante, Anápolis (GO)*, v. 12, n. 1, jun. 2019. ISSN 1981-4089.
- BARRILE, V. & PUCINOTTI, R. 2005. Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study. *NDT&E International*, v. (38) p. 596–604.
- BENEDETTO, A., BENEDETTO, F., DE BLASIIS, M.R. & GIUNTA, G. 2004. Reliability of Radar Inspection for Detection of Pavement Damage. *Road Materials and Pavement Design*, v. 5, p. 93 -110.
- BENEDETTO, A. 2010. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain. *Journal of Applied Geophysics*, v.71, p. 26–35.

- BENEDETTO, A. & BENEDETTO, F., In: HASHMI, A., BATALHA, G.F., VAN TYNE, C.J. & YILBAS, B. **Comprehensive Materials Processing**, [S.l.]: Elsevier Science, v. 13, 2014, p. 393- 425.
- BENEDETTO, A, TOSTI, F., CIAMPOLI, L.C. & D’AMICO, F. 2016. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections, *Signal Processing*, v. 132, p. 201-209.
- BERNUCCI L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P. & SOARES, J.B. Pavimentação asfáltica. *Formação Básica para Engenheiros*, Rio de Janeiro, 2008. 504 p.
- BORGES, W. R.; LAGO, A.; FACHIN, S.; ELIS, V.& SANTOS, E. 2006. Gpr utilizado na detecção da geometria de cavas usadas para disposição de resíduos de óleos lubrificantes. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 4, n. 24, p. 483-494.
- BORGES, W.R. 2007. *Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no Planejamento urbano e Meio ambiente: Estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP*. Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Tese de doutorado, 265 p.
- BORGES, W. R. 2018. *Notas de aula*. Arquivos PPT, Geofísica Aplicada, IG/UnB.
- BORGES, W.R., SILVA, L.A., CUNHA, L. S., CASTELO BRANCO, R.M.G. & FARIAS, M.M. 2014. Gpr applied to rigid pavement from Santos Dumont Airport, RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 32(2), p. 225-234.
- BUTNOR, J.R.; CAMPBELL, J.L.; SHANLEY, J.B. & ZARNOCH, S.J. 2013. Using Ground Penetrating Radar to characterize soil frost. In: 26TH SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS. SAGEEP. p. 387-392.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). 2006. *Manual de Pavimentação*. Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.
- BRISTOW, CH. Ground Penetrating Radar In Aeolian Dune Sands. In: JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. [S.l.]: Elsevier Science, 2009. p. 395-346.
- CAO, Y., DAI, S., LABUZ, J. F., & PANTELIS, J., 2007. Implementation of Ground Penetrating Radar, *Minnesota Department of Transportation*, MN/RC. 2007-34.
- CAO, Y., GUZINA. B.B. & LABUZ, J.F. 2008. Pavement Evaluation Using Ground Penetrating Radar, *Minnesota Department of Transportation*, MN/RC. 2008-10, 65 p.
- CASA, A., PINTO, V. & RIVERO, L. 2000. Fundamentals of ground penetrating radar in environmental and engineering applications. *Journal of Annals Geophysics*, v.43, No.6, p. 1091 – 1103.
- CASSIDY, N. J. Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In: JOL, H.M. 2009. **Ground Penetrating Radar: Theory and applications**. Elsevier Science, p. 41-67
- CASSIDY, N. J. Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. In: JOL, H.M. 2009a. **Ground Penetrating Radar: Theory and applications**. Elsevier Science, p 141-172.
- CHANG, C. W., LIN, C.H. & LIEN, H.S. 2009. Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR. *Construction and Building Materials*, (23) 1057–1063.

- COLAGRANDE, S., RANALLI, D. & TALLINI, M. Ground Penetrating Radar Assessment of Flexible Road Pavement Degradation. *International Journal of Geophysics*. Article ID 989136, 11p.
- COLLIN, R.E. 1985. **Antennas and radiowave propagation**. New York: McGraw-Hill, 497p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Serviço Social do Transporte (SEST); Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT). 2017. *Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?* Brasília, 2017, 153 p.
- CONYERS, L.B. 2011. Discovery, mapping and interpretation of buried cultural resources non-invasively with ground-penetrating radar. *Journal Of Geophysics And Engineering*, v. 8, p. S13–S22.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Serviço Social do Transporte (SEST); Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT). 2018. Pesquisa CNT de rodovias 2018. *Relatório gerencial*. Brasília, 2018, 408 p.
- CORREIA, N.S. & NETO, J.A.O. 2016. Aspectos gerais do uso de geossintéticos em reforço de pavimentos. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 9-22 outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*.
- CUNHA, M. R., BORGES, W.R. & CUNHA, L.S. 2019. Concrete Pavement Layers Investigation with GPR in the BR-101 Highway, *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 42 - 1 / 2019 p. 308-316.
- DANIELS, D. 1996. Surface-penetrating radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 8: (4), p. 165- 182.
- DANIELS, J.J. 2010. Ground Penetrating Radar Fundamentals. *Published Report, Department of Geological Sciences, the Ohio State University*, 21p.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A. P. 1989. Ground-Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.3, p.531-551.
- DEMIRCI, S., YIGIT, E., ESKIDEMIR, I. & OZDEMIR, C. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *NDT&E International*, v. 47, p. 35–42.
- DEROBERT, X., IAQUINTA, J., KLYSZ, G. & BALAYSSAC, J. 2008. Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT&E International*. v. 41. p. 44–52.
- DIAMANTI, N. & REDNMAN, D. 2012. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics*, v. 81, p. 106–116.
- DIAMANTI, N., REDNMAN, D. & ANNAN, P.A. 2018. A GPR-based Sensor to Measure Asphalt Pavement Density, In: 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR (GPR)
- DIAS, G.A.N. & FILHO, P.C.T. 2017. Detecção de Tubulações Através do Método Radar de Penetração no Solo (GPR) na Cidade Universitária – Ilha do Fundão, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 40 - 1 / 2017 p. 171-179.
- DINH, 2018. K., GUCUNSKI, N. & DUONG, T.H. Migration-based Automated Rebar Picking for Condition Assessment of Concrete Bridge Decks with Ground Penetrating Radar, *NDT and E International*, v.98, p. 45-54.

- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 142/2010 - ES. *Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço*, Rio de Janeiro, 2010. 9p.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 143/2010 - ES. *Pavimentação – Base de solo-cimento - Especificação de serviço*, Rio de Janeiro, 2010. 10p.
- DOJACK, L. 2012. Ground Penetrating Radar Theory, Data Collection, Processing, and Interpretation: A Guide for Archaeologists. Unpublished report on file at ANTH, University of British Columbia, 89 pp.
- DONG, Z., YE, S., GAO, Y., FANG, G., ZHANG, X., XUE, Z. & ZHANG, T. 2016. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. *Sensors*. 16 (12):2067. 18p.
- DOOLITTLE, J.A & BUTNOR, J.R. Soils, Peatlands, and Biomonitoring. In: JOL, H.M. 2009. **Ground Penetrating Radar: Theory and applications**. Elsevier Science, p 179-192.
- DOURADO, J.C., KIANG, C.H., FILHO, W.M. & BRAGA, A.C.O. 2003. Utilização de Radar de penetração no solo na detecção de estruturas artificiais rasas no solo. *UNESP, Geociências*, v. 22, N. Especial, p. 75-81.
- EVANS, R.D., FROST, M.W., STONECLIFFE-JONES, M. & DIXON, N. Variation in information obtained from interpretation of ground penetrating radar (GPR) pavement investigation data In: LOIZOS, A., SCARPAS, T. AND AL-QADI, I.L. (eds.). 2007. **Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials: Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering**, London: Talyor & Francis, p. 983-991.
- FARIA, S.H. 2010. *O uso do georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis*. Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Viçosa-MG. 125 p.
- FAUCHARD, C. DEROBERT, X. CARIOU, J. & CÔTE, Ph. 2003. GPR performances for thickness calibration on road test sites. *NDT&E International*, v. 36 p. 67–75.
- FISHER, E., MCMECHAN, G.A. & ANNAN, A.P. 1992. Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics*, v. 57, No.3: p. 495-504.
- GEYER, 1990. **Dielectric characterization and reference materials**. NIST. Technical Note 1338. National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO. 124 p.
- GIL, S. & MAHARAJ, D.K.2015. The behavior of rigid pavement on loose sand by nonlinear finite element method. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 02, Issue: 03, p. 84-88.
- GONÇALVES & CERATTI. 1998. Utilização do Ground Penetrating Radar na Avaliação de Pavimentos. *IN: 31ª Reunião Anual de Pavimentação*, São Paulo-SP. Outubro. **Anais.V. 1**, p. 390-404.
- GRASMUECK, M., WEGER, R. & HORSTMAYER, H. 2005. Full-resolution 3D GPR imaging. *Geophysics*, v.70, n.1, p.K12–K19.
- GREAVES, R.J., LESMES, D.P., LEE, J.M & TOKSOZ, N. 1996. Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar. *Geophysics*, v. 61, n. 3, p. 683-695.

- GROTE, K., HUBBARD, S., RUBIN, Y., 2002. GPR monitoring of volumetric water content in soils applied to highway construction and maintenance. *Lead. Edge Explor.*, 21 (5), p. 482–485.
- GROTE, K., HUBBARD, S., RUBIN, Y., 2005. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, v.57, p. 129–153.
- GSSI- GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS, INC. SIR 3000 Manual. Nashua, New Hampshire 03060-3075 USA
- GURU, B.S. & HIZIROGLU, H.R., 2004. **Electromagnetic field theory fundamentals**. Cambridge University Press, p. 351-385.
- HAYAKAWA, H. & KAWANAKA, A. 1998. Radar imaging of underground pipes by automated estimation of velocity distribution versus depth. *Journal of Applied Geophysics*, v.40, p.37–48.
- HE, X., ZHU, Z., LIU, Q. & LU, G. 2009. Review of GPR Rebar Detection. *In: PIERS Proceedings*, Beijing, China, March 23-27, p. 804-813.
- HU, J. 2015. *Nondestructive field assessment of flexible pavement and foundations layers*. Iowa State University. Thesis of Master of Science, 83 p.
- JAMIL, M., HASSAN, M.K. & AL-MATTARNEH, H.M.A. Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques. *Materials and Structures* (46) p. 77–87.
- HOLLENDER, F. & TILLARD, S. 1998. Modeling ground-penetrating radar wave propagation and reflection with the Jonscher parameterization. *Geophysics*, v. 63, p. 1933–1942.
- KHAMZIN, A.K., VARNAVINA, A.V., TORGASHOV, E.V., ANDERSON, N.L. & SNEED, L.H. 2017. Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment. *Construction and Building Materials*. v. 141, p. 130–139.
- KEAREY, P.; BROOKS, M. & HILL, I. 2009. **Geofísica de Exploração**. Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos, 438p.
- KIRSCH, A & HETTLICH, F. 2014. **The Mathematical Theory of Maxwell's Equations**. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany, 297 p.
- KOPPENJAN, S. Ground Penetrating Radar Systems and Design. *In: JOL, H.M. 2009. Ground Penetrating Radar: Theory and applications*. Elsevier Science, p. 73-97.
- LACERDA FILHO, J.V.; REZENDE, A. & SILVA, A. Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia: CPRM; METAGO; UNB, 1999. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB*.
- LACERDA, H. 2005. Mapeamento geomorfológico como subsídio ao controle preventivo da erosão urbana em Anápolis-GO. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 11, 2005, Florianópolis. Anais...São Paulo: ABGE, disco compacto, 2005, p. 679-692.
- LAGUELA, S., SOLLA, M., PUENTE, I. & PREGO, J. 2018. Joint use of GPR, IRT and TLS techniques for the integral damage detection in paving. *Construction and Building Materials*. v. 174, p. 749–760.

- LAI, W.W., Dérobert, X. & Annan, P. 2017. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT&E International*, v. 96, p. 58–78.
- LAMBOT, S., WEIHERMÜLLER, L., HUISMAN, J.A., VEREECKEN, H., VANCLOOSTER, M., SLOB, E.C., 2006. Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content. *Water Resources Research*, v. 42, W11403, 12 p.
- LENG, Z & AL-QADI, I. 2011. Flexible Pavement Quality Assurance Using Ground Penetrating Radar, *IN: TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT INSTITUTE CONGRESS 2011*, p. 617-627.
- LIU, Y.; SHI, Z.; WANG, B. & YU, T. 2017. GPR impedence inversion for imaging and characterization of buried archaeological remains: A case study at Mudu city cite in Suzhou, China, *Journal of Applied Geophysics*, 148, p. 226-233.
- LOIZOS, A. & PLATI, C. 2007. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT&E International*, v. 40. p. 147-157.
- LOPES, O. A. 2009. *Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em Trechos de Pavimentos da Cidade Universitária da UFRJ*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Coimbra de Pós graduação e Pesquisa de Engenharia. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 135p.
- LOULIZI, A., AL-QADI, I.L. & LAHOUAR, S. 2003. Optimization of Ground-Penetrating Radar Data to Predict Layer Thicknesses in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, v. 93, p. 93-99.
- MA, X., LIU, H., WANG, M.L., BIRKEN, R. Automatic detection of steel rebar in bridge decks from ground penetrating radar data, *Journal of Applied Geophysics* ,v. 158, p. 93-102.
- MAIERHOFER, CH., BRINK, A., ROLLING, M. & H. WIGGENHAUSER, H. 2003. Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar. *NDT&E International*, v.36, p. 257–263.
- MASER, K.R. & SCULLION, T. 1992. Automated Pavement Subsurface Profiling Using Radar: Case Studies of Four Experimental Field Sites. *Transportation Research Record*, 1344, p. 148- 154.
- MASER, K.R. 1996. Condition Assessment of Transportation Infrastructure using Ground-Penetrating Radar. *Proc. Journal of Infrastructure Systems*, v. 2, n. 2, p. 94–101.
- MASER, K.R. & CARMICHAEL, A. 2015. Ground Penetrating Radar Evaluation of New Pavement Density Paving *Project – SR 539* in Lynden, WA, 20p.
- NOVO, A., LORENZO, H., RIAL, F.I., SOLLA, M. 2012. From Pseudo-3D to Full-resolution GPR Imaging in Archaeology: A complex Roman site in Lugo, Spain. *Near Surface Geophysics*, v. 10, p. 11-15.
- OLHOEFT, G.R. 1998. Electrical, magnetic, and geometric properties that determine Ground Penetrating Radar performance. *In: PROC. OF GPR'98, SEVENTH INT'L. CONF. ON GROUND PENETRATING RADAR*, 1998, Lawrence, KS, USA, The University of Kansas, p. 177-182.
- OLHOEFT, G.R. 2000. Maximizing the information return from Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, v. 43, p. 175–187.

- OLHOEFT, G.R. 2002. Applications and Frustrations in Using Ground Penetrating Radar. *IEEE AESS Systems Magazine*, p. 12-20.
- ORFANIDIS, S. J. 2016. **Electromagnetic Waves and Antennas**. Rutgers University, 1413p.
- PEREIRA, P. & PAIS, J. 2017. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of European method. *Journal of traffic and transportation engineering*, v. 4, p. 316 -346.
- PINTO, G.P. 2010. *O método GPR aplicado à localização de tubulações utilizadas no abastecimento de água na região urbana do município de Belem-PA*. Universidade Federal do Pará, Programa de Pós Graduação em Geofísica, Dissertação de Mestrado, 96 p.
- POWERS, M.H. 1997. Modeling frequency-dependent GPR. *The Leading Edge*, 16 (11), p. 1657-1997.
- PLATI, C. & LOIZOS, A. 2013. Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies. *Journal of Applied Geophysics*, v. 97, 3–10.
- PREGO, F.J., SOLLA, M., PUENTE, I. & ARIAS, P. 2017. Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes. *NDT and E International*, v.91, p. 22–31.
- RADAELLI, V. A. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Folha SE.22-X-B-II - Anápolis. Escala 1:100 000. Goiânia: CPRM, 1994. 113p.
- RASHED, M.A. & AL-GARNI, M.A. 2012. On the application of GPR for locating underground utilities in urban áreas. *Arabia Journal Geoscience*, v. 6, p. 3505–3511.
- ROBERT, A. 1998. Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation. *Journal of Applied Geophysics* 40, p. 89–94.
- RODRIGUES, S.I. 2004. *Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP*. Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Dissertação de mestrado, 102 p.
- RODRIGUES, S.I. & PORSANI, J.L. 2006. Utilização Do GPR para caracterizar tambores plásticos enterrados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24(2), p. 157-168.
- ROTH, K., SCHULIN, R., FLUHLER, H & ATTINGER, W. H. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resources Research*, v. 26, no. 10, p. 2267-2273.
- SAARENKETO, T., SCULLION, T., 1994. Ground penetrating radar applications on roads and highways. *Research Report 1923-2F*, Texas Transportation Institute, College Station, Texas, 36 pp.
- SAARENKETO, T., SCULLION, T., 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, v. 43, p. 119–138.
- SAARENKETO, T. Ground Penetrating Radar Applications in Road Design and Construction n Finnish Lapland. **Geological Survey of Finland, Special Paper 15.**, p. 161-167, 1992.
- SAARENKETO, T. 2006. *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys*, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, PhD thesis, 121 p.

- SAARENKETO, T. NDR Transportation. In: JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. [S.l.]: Elsevier Science, 2009. p. 395-346.
- SANDMEIER, K. J. REFLEX Version 7.5, Windows 9x/2000/NT. 2014. Program for the Processing of Seismic, Acoustic or Eletromagnetic Reflection, Refraction and Transmission Data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 209p.
- SANTOS, A. L. F.; Maia, T.C.; Borges, W.R.; Nishi, E. & Seimetz, E.X. 2019. Implantação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa Aplicado a Engenharia da UEG- Campus Henrique Santillo, Anápolis-GO. *Revista Mirante, Anápolis (GO)*, v.12: 95-111.
- SCULLION, T., LAU, C.L., CHEN, Y., 1994. Pavement evaluations using ground penetrating radar in Texas. In: *Proc. 5th Intl. Conf. on GPR*, vol. 1 of 3, p. 449– 463.
- SENIN, S.F. & HAMID, R. 2016. Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab. *Construction and Building Materials* (106): 659-669.
- SILVA, L. A. 2014. *Uso de Georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos*. Universidade de Brasília, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Tese de Doutorado, 192p.
- STRATTON, J.A. 1941. **Electromagnetic Theory**, Mc-Graw-Hill Book Co, New York/London, 615p.
- STRYK, J., MATULA, R. POSPISIL, K. 2013. Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Journal of Applied Geophysics* (97) p.11–26.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A. P. 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, v. 16, No. 3, p. 574-582.
- TOSTI, F. & BENEDETTO, A. 2012. Pavement Pumping Prediction using Ground Penetrating Radar. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v.53, p. 1045–1054.
- ULABY, F.T. 2007. **Fundamentals of Applied Electromagnetics**. 5th ed., Pearson International Edition, 459p.
- VAN DAM, R. L. & SCHLAGER, W. 2000. Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*. v. 47, p. 435-449.
- VIEIRA, R. & GANDOLFO, O.C.B. 2013. Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (gpr). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 42 / 16, 2013, Gramado. **Anais**. Gramado: RAP, v, 2013. p. 1-12.
- WARD, S.H. & HOHMANN, G.W. 1988. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In: *Electromagnetic Methods*. In: **Applied Geophysics, Society of Exploration Geophysicists**, ed. M. N. Nabighian, v.1, p. 130–311.
- YELF, R. 2007. Application of ground penetrating radar to civil and geotechnical engineering. *Electromagn Phenom*, v. 7, p. 102-117.
- ZAKI, A., CHAI, H.K., AGGELIS, D. & ALVER, N. 2015. Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique. *Sensors*, v. 15, p. 19069-19101.

ZENG, X & MCMECHAN, G.A. GPR characterization of buried tanks and pipes. 1997. *Geophysics*, v. 62, No.3, p. 797–806.