

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

CAROLINA NARJARA MAZZINI AMARAL

**INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO POR MEIO
DO MÉTODO GEOFÍSICO RADAR DE PENETRAÇÃO DO
SOLO**

**BELÉM – PARÁ
SETEMBRO – 2011**

CAROLINA NARJARA MAZZINI AMARAL

**INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO POR MEIO DO
MÉTODO GEOFÍSICO RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestrado em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricomagnéticos.

Orientadora: Lúcia Maria da Costa e Silva

**BELÉM – PARÁ
SETEMBRO – 2011**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

- A485i Amaral, Carolina NarjaraMazzini
Investigação de pavimento asfáltico por meio do método geofísico
radar de penetração do solo / Carolina Narjara Mazzini
Amaral; Orientadora: Lúcia Maria da Costa e Silva - 2011.
137 fl.: il.
Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do
Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-
Graduação em Geofísica, Belém, 2011.
1. Prospecção – Métodos geofísicos. 2. Geofísica. 3. GPR. 4.
Radar de penetração do solo. 5. Asfalto. I. Silva, Lucia
Maria da Costa e, *orient.* II. Universidade Federal do Pará
III. Título.

CDD 22º ed.: 622.154

CAROLINA NARJARA MAZZINI AMARAL

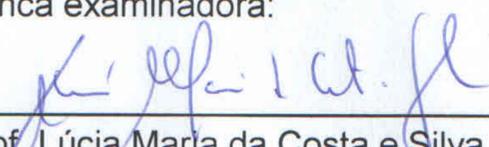
INVESTIGAÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO POR MEIO DO MÉTODO GEOFÍSICO RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestrado em Geofísica.

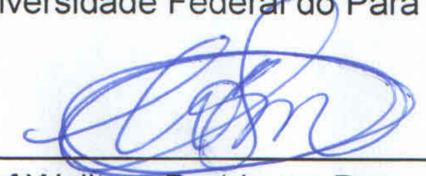
Área de Concentração: Métodos Eletromagnéticos

Data de aprovação: / /

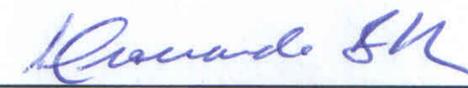
Banca examinadora:



Prof. Lúcia Maria da Costa e Silva - Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof. Welitom Rodrigues Borges – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade de Brasília



Prof. Leonardo Augusto Lobato Bello – Membro
Doutor em Engenharia Civil
Universidade da Amazônia

Para Telma Lúcia.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho, algumas das quais eu sequer conhecia. Meus sinceros agradecimentos.

Em especial à Prefeitura de Belém, na pessoa do engenheiro Germano Augusto de Oliveira (diretor do DEOV – SESAN) pelo apoio dado quando da escolha da área de estudo e pela atenção a mim dispensada todas as vezes que fui à SESAN.

Ao coronel Mário Zacarias Pacheco Uchoa (chefe do gabinete da CTBel) pelo apoio dispensado por meio da equipe responsável pela interdição e segurança na Tv. Mauriti, sem as quais o trabalho não seria possível.

Ao engenheiro Orlando Ferreira Pereira (diretor do DURB – SESAN) pela atenção dada a mim e meu pai quando fui buscar informações sobre o sistema de drenagem da Tv. Mauriti.

À equipe de guardas da CTBel que nos escoltaram.

Ao prefeito do campus da UFPA, engenheiro Alemar Dias Rodrigues Junior, pela autorização para perfurar o asfalto. Agradecimento especial ao Sr. José de Ribamar Rodrigues Paixão, técnico em refrigeração da UFPA, por ter dedicado um dia de sua licença médica para ajudar a mim e à professora Lúcia a fazer o furo.

Ao CNPq, pelo subsídio concedido por meio de bolsa.

Ao curso de pós-graduação, por permitir que eu conclua esse curso.

À professora Lúcia Costa e Silva, da Faculdade de Geofísica da UFPA, por ter aceitado tão gentilmente essa orientação, pelas sugestões, pelas conversas, boas risadas. Obrigada!

Aos professores da banca, Leonardo Augusto Lobato Bello, do Núcleo de Meio Ambiente da Universidade da Amazônia (NUMA-UNAMA), e Welitom Rodrigues Borges, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB), por aceitarem o convite.

Ao professor Welitom gostaria de agradecer também por ter trazido uma das antenas usadas no trabalho e pela presença indispensável durante a coleta de dados. Além disso, gostaria também de agradecer pelas sugestões feitas ao processamento e interpretação dos dados.

Ao professor Raimundo Mariano Castelo Branco, do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto-LGPSR da Universidade Federal do Ceará, por emprestar a antena trazida para o trabalho.

Aos colegas da pós-graduação Gustavo Dias, Tiago Lopes e Gildenilson Costa e da graduação Celina Monteiro, Eduardo Paixão, Jéssica da Costa, Thiago Ribeiro, Ordilei Pantoja, Augusto Barbosa Junior, Diogo Lopes, Ingrid do Nascimento, Rafael Holanda, Renilo de Souza, por terem dedicado dois de seus dias, um deles domingo (dia de descanso para muitos), para auxiliarem na coleta de dados do trabalho. Também gostaria de agradecer aos colegas da pós-graduação Carla Patricia Queiroz Furtado e Odinei da Silva Matos Junior, pelas dicas referentes à modelagem.

À minha família, meu alicerce, por sempre acreditarem em mim, por me proporcionarem as condições favoráveis para a finalização desse trabalho. Em especial queria agradecer ao meu pai, Ivan. Obrigada, pai, por sua presença, por acreditar em mim quando eu mesma duvidava. Enfim, por ser parte dessa realização também.

Merian, obrigada por ser minha amiga, pela força, pelo incentivo, por tornar meu dia-a-dia agradável com conversas, confidências e muitas boas risadas!

Ao Leonardo, pela companhia, paciência e compreensão todas as vezes que precisei me ausentar por causa do trabalho e pelos artigos que imprimiu para mim.

A todos os meus amigos, que contribuíram com dicas e sugestões, em especial ao FabricioOgorodnik.

RESUMO

A maioria das vias públicas asfaltadas pode apresentar algum tipo de defeito que leva à insegurança no trânsito, aumento dos custos do transporte e da poluição. Estes problemas poderiam ser evitados se os defeitos nos pavimentos fossem identificados antes mesmo de surgirem na superfície, já que em geral se formam nas camadas subjacentes à cobertura asfáltica. Este trabalho propõe o uso do GPR para identificar problemas em pavimentos, tendo como base a simulação numérica do GPR e levantamentos de campo. Foi feita a simulação de dois modelos físicos: pavimento em uso nas quais foram inseridos canalização e defeitos mais comuns (vazio e infiltração) bem como pavimento recente, ambos sobre substrato. As interfaces das camadas do pavimento e a canalização são facilmente individualizadas enquanto os defeitos mostram padrões de reflexão semelhantes, diferindo na polaridade do sinal da amplitude e em sua atenuação (menor no vazio e maior na infiltração). As interfaces das camadas de pavimento recente são mais facilmente identificadas com a frequência de 400 MHz do que 900 MHz, ao contrário do que ocorre em outros locais, devido à condutividade dos produtos de daintemperização que ocorre na Amazônia. Essas respostas serviram, então, para o estudo de dois locais da cidade de Belém (PA): um trecho da Tv. Mauriti que apresenta recorrência de defeitos na pista e um trecho recém asfaltado da Universidade Federal do Pará (UFPA). O primeiro levantamento possibilitou identificar e mapear defeitos e inferir as possíveis causas (fuga de água do sistema de drenagem), enquanto o segundo auxiliou na delimitação de camadas e contato com o substrato (mostrando que as espessuras das camadas de pavimentação diferem do projetado). Os resultados mostram como o GPR pode ser uma ferramenta indispensável na manutenção e no planejamento de recuperação de vias asfaltadas, fornecendo um diagnóstico de forma rápida, segura e de baixo custo.

Palavras-chave: Prospecção – métodos geofísicos. Geofísica. GPR. Radar de penetração do solo. Asfalto.

ABSTRACT

Most public paved roads may have some sort of imperfection that leads to unsafe traffic, increased transport costs, and pollution. These problems could be avoided if the defects were identified on the floors before they show up at the surface because in general they begin in the underlying layers of the asphalt coverage. This paper proposes the use of GPR to identify problems in pavements based on numerical simulations of the GPR and on field surveys. Simulation of two physical models has been made: i) pavement in use, in which pipe and the most common defects (voids and infiltration) have been inserted, and ii) recent floors, both above a substrate. The interfaces of the pavement layers and the channeling were easily individualized whereas the imperfections show similar patterns of reflection, differing in the polarity of the signal amplitude and in its attenuation (smaller in the voids and higher in the infiltration). Differently from what occurs in other places, the layer interfaces in recent pavements were more easily identified with the frequency of 400 MHz than with a frequency of 900 MHz because of the conductivity of the products deriving from weathering, which occurs in the Amazon. These responses were used then to investigate two places in the city of Belém (PA): a sector of MauritiTv. which presents recurrent defects on pavement, and a newly paved stretch at Federal University of Pará (UFPA). The first survey identified and mapped defects and permitted to infer their possible causes (water loss from the drainage system) while the latter helped in delineating layers and the contact with the substrate (showing that the thickness of pavement layers differ from the projected ones). The results show how the GPR can be an important tool in maintaining and planning the recovery of paved roads by providing a diagnosis in a fast, safe, and low cost.

Keywords: Prospecting–Geophysical methods. Geophysics.GPR.Ground penetratingradar.Asphalt.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Corte esquemático de dois tipos de pavimentos	27
Figura 2.2– Quadro resumo dos principais defeitos em pavimentos	29
Figura 3.1 – Modos de aquisição de dados GPR: a) reflexão comum; b) CMP; c) WARR e d) transiluminação.	45
Figura 3.2 – Fluxograma com as etapas adotadas no processamento. A parte de aquisição é incluída no pré-processamento porque ainda no campo é possível fazer algumas modificações nos dados.	48
Figura 3.3 – Exemplo de radargrama (a) antes e (b) depois da correção estática. Parte hachurada de amarelo corresponde às partes dos traços removidos na correção estática.....	49
Figura 3.4 – Esquema de filtro passa-banda no domínio da frequência	51
Figura 4.1 – Mapa do município de Belém-PA (contorno em vermelho).....	53
Figura 5.1 – Modelo físico de camadas usado nas simulações dos Casos 1 e 2.	62
Figura 5.2 – Hipérbole de difração, na camada Agregado 2, mostrando ajuste com a velocidade da camada (0,15 m/ns).	63
Figura 5.3 – Resposta do modelo físico da Figura 5.1, com velocidade de 0,07 m/ns.	63
Figura 5.4 – Resposta do modelo físico da Figura 5.1, com velocidade de 0,12 m/ns	63
Figura 5.5 – Resposta do modelo físico da Figura 5.1, com velocidade de 0,1 m/ns	64
Figura 5.6 – Tubulação vazia: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo da tubulação, bem como a mudança de cores é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	65
Figura 5.7 – Resposta da simulação para tubo semipreenchido com água.	66
Figura 5.8 – Resposta da simulação para tubo totalmente preenchido com água.	66

Figura 5.9 – Vazio na camada Agregado 2, representado por linha azul-claro: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo do vazio é é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	68
Figura 5.10 – Tubulação e vazio na camada Agregado, representado por linha azul-claro 2: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo do vazio e da tubulação é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	69
Figura 5.11 – Vazio na camada de aterro, representado por linha azul-claro (a) modelo físico e (b) resposta da simulação. A sombra abaixo do vazio é é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	70
Figura 5.12 – Tubulação sob vazio: (a) modelo físico; b) resposta. A sombra abaixo do vazio e da tubulação é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	71
Figura 5.13 – Infiltração na camada Agregado 2, representada por linha vermelha: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo da infiltração é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	72
Figura 5.14 – Tubulação sob infiltração: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo da infiltração e da tubulação é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	73
Figura 5.15 – Infiltração na camada de aterro: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo da infiltração é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	74
Figura 5.16 – Tubulação e infiltração sobre tubulação: (a) modelo físico; (b) resposta. A sombra abaixo da infiltração e da tubulação é um artefato indesejável produzido pelo <i>software</i>	75
Figura 5.17 – Modelo físico usado nas simulações do item 5.4.....	77
Figura 5.18 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,14 m/ns.....	77
Figura 5.19 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,07 m/ns. Frequência: 900 MHz	78
Figura 5.20 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,12 m/ns. Frequência: 900 MHz	78
Figura 5.21 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,1	

m/ns. Frequência: 900 MHz	78
Figura 5.22 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,14 m/ns. Frequência: 400 MHz	78
Figura 5.23 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,07 m/ns. Frequência: 400 MHz	79
Figura 5.24 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,12 m/ns. Frequência: 400 MHz	79
Figura 5.25 – Resposta do modelo físico da Figura 5.17, com velocidade de 0,1 m/ns. Frequência: 400 MHz	80
Figura 6.1 – Imagem de satélite da área do Experimento 1, Belém-Pará (mapa base extraído de Google Earth®).	84
Figura 6.2 – Disposição dos perfis do levantamento realizado na Tv. Mauriti. LL: linha longitudinal, as quais correspondem aos Radargramas 107 a 112).....	85
Figura 6.3 – Mapa e seção esquemáticos da galeria do sistema de drenagem da Tv. Mauriti.	86
Figura 6.4 – Radargrama 18. Estimativa da velocidade por meio do ajuste de hipérboles de difração. Velocidade = 0,1 m/ns.....	89
Figura 6.5 – Radargrama 24. Fortes reflexões coincidentes com os limites da tubulação	89
Figura 6.6 – Radargrama 11 mostrando deslocamento horizontal para esquerda (em relação à Figura 6.4) das prováveis reflexões da tubulação.....	90
Figura 6.7 – Radargrama 11 mostrando deslocamento horizontal para esquerda (em relação à Figura 6.4) das prováveis reflexões da tubulação.....	90
Figura 6.8 – Radargrama 30 com hipérboles de difração relacionadas à galeria	91
Figura 6.9 – Radargrama 7: a) exemplo de polaridade invertida da amplitude;b) detalhe do radargrama.	92
Figura 6.10 – Radargramas 9 (a) e 23 (b): refletores marcados por feições irregulares.	92
Figura 6.11 – Radargrama 13. Exemplos de refletores horizontais e descontínuos.	93

Figura 6.12 – Radargrama 72 mostrando eventos de reflexões isolados.	94
Figura 6.13 – Radargrama 7, exemplos de escavação e substituição de material ...	95
Figura 6.14 – Radargramas 26 (a) e 27 (b). Áreas destacadas indicam correlação dos radargramas com o aprofundamento da pista.	95
Figura 6.15 – Radargrama 47, com refletores “arqueados”	96
Figura 6.16. Radargramas longitudinais à pista da Tv. Mauriti, sentido Av. João Paulo II – Tv. São Pedro. Frequência da antena: 400 MHz. LL: linha longitudinal.....	98
Figura 6.17 – Radargramas longitudinais à pista da Tv. Mauriti, sentido Av. João Paulo II – Tv. São Pedro. Frequência da antena: 400 MHz. LL: linha longitudinal.....	99
Figura 6.18 – Radargramas longitudinais à pista da Tv. Mauriti, sentido Av. João Paulo II – Tv. São Pedro. Frequência da antena: 900 MHz; LL: linha longitudinal..	100
Figura 6.19 – Bloco diagrama de trecho da Tv. Mauriti com corte em 0,13 m. Duas anomalias assinaladas em preto.	103
Figura 6.20 – Bloco diagrama de trecho da Tv. Mauriti com corte em 0,46 m. Setas indicam anomalia retilínea e elipses em preto assinaladas por A, B e C, anomalias de amplitude alta.....	104
Figura 6.21 – Corte perpendicular ao bloco diagrama da Figura 6.19.	105
Figura 6.22 – Bloco diagrama de trecho da Tv. Mauriti com corte em 0,75 m. Elipses em preto assinaladas por A, B e C indicam anomalias de amplitudes baixa a negativa.	106
Figura 6.23 – Bloco diagrama de setor defeituoso.	107
Figura 6.24 – Setor defeituoso. Cortes em 0,2 m, 0,6, 1, 1,4 e 1,8 m.....	108
Figura 6.25 – Setor defeituoso. Cortes em 0,4, 0,8, 1,2 e 1,6 m.	109
Figura 7.1 – Imagem de satélite da área do Experimento 2 (mapa base extraído de Google Earth®). Linha vermelha corresponde à Linha Longitudinal (Radargrama 149), A1: área dos radargramas transversais. P1 posição do furo.	115
Figura 7.2 – Disposição das linhas coletadas em frente ao CEAMAZON. Início das linhas de SO (Sudoeste) para NE (nordeste), sentido direita para esquerda, 0 a 7 m.	116

Figura 7.3 – (a) Radargrama 149, correspondente à linha longitudinal, no centro da pista em frente ao CEAMAZON. Marcas azul e vermelha indicam (b) trecho sobre o qual foi feito o furo.....	117
Figura 7.4 – a) Descrição do furo realizado e b) Espessuras determinadas para a execução da obra. Concreto Betuminoso Usinado a Quente: CBUQ.	118
Figura 7.5 – Radargrama 147. Valor de velocidade usado na conversão de tempo em profundidade ($v = 0,1 \text{ m/ns}$)	119
Figura 7.6 – Radargrama 134. Padrão das reflexões observadas na maioria dos dados.	120
Figura 7.7 – (a) Trecho do radargrama 149 longitudinal, sobre o qual foram delimitadas (b) as camadas do pavimento.	121
Figura 7.8 – Modelo de camadas, baseado nas interfaces delimitadas no radargrama 128 transversal.	122
Figura 7.9 – Cortes feitos proximoamente às interfaces das camada, de acordo com o furo.	125
Figura 7.10 – Cortes feitos proximoamente às interfaces das camada, de acordo com o projeto da obra.	126
Figura 7.11 – Possíveis limites do contato pavimento-aterro. Intervalo de profundidade: 0,45 – 0,5 m.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Malha viária brasileira.....	24
Tabela 2.2 – Matriz do transporte.....	24
Tabela 2.3 – Mortes por acidente de trânsito (International Transport Forum, European Commission Transport.....	25
Tabela 3.1 – Condutividade e permissividade relativa de materiais sob frequência de 100 MHz.	40
Tabela 4.1 – Dados do clima da cidade de Belém.	56
Tabela 5.1 – Parâmetros da simulação dos Casos 1 e 2.	62
Tabela 5.2 - Estimativa de erros entre a posição das interfaces do modelo e as respostas obtidas com diferentes velocidades.	64
Tabela 5.3 – Parâmetros da simulação de embasamento de pavimento.....	80
Tabela 5.4 – Estimativa de erro entre a posição das interfaces do modelo e as respostas obtidas com frequências de 900 MHz e 400 MHz, para várias velocidades.	81
Tabela 6.1 – Demonstrativo do fluxo de veículos da Tv. Mauriti, esquina com Av. João Paulo II.	85
Tabela 6.2 – Parâmetros usados na aquisição dos dados da Tv. Mauriti.	86
Tabela 7.1 – Parâmetros usados na aquisição dos dados da UFPA.	116
Tabela 7.2 – Espessuras das camadas, em metros, conforme projeto, furo e Radargramas 128 (transversal) e 149 (longitudinal), bem como média, desvio padrão e erro entre elas.	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGC – AutomaticGainControl

AT – Acidentes de Trânsito

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CEAMAZON – Centro de Excelência e Eficiência Energética da Amazônia

CMP – Common Midpoint

CMZ - CEAMAZON

CNM – Confederação Nacional dos Municípios

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CTBel – Companhia de Trânsito de Belém

DEOV – Departamento de Obras Viárias

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DPVAT – Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre

DURB – Departamento de Drenagem Urbana

EM – Eletromagnético

FDFD – Finite Difference Frequency Domain

FDTD – Finite Difference Time Domain

FHWA – Federal Highway Administration

FWD – Falling Weight Deflectometer

GPR – Ground Penetrating Radar

GSSI – Geophysical Survey Systems Inc

IGG – Índice de Gravidade Global

IG-UnB – Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

LGPSR-UFC – Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Ceará

LL – Linha Longitudinal

MRT – Mauriti (Travessa Mauriti)

RMB – Região Metropolitana de Belém-PA

SEICOM – Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração do Pará

SEC – Spherical and Exponential Compensation

SESAN – Secretaria Municipal de Saneamento de Belém

SNRA – Swedish National Road Administration

TER – Terminologia

VSA – Valor da Serventia Atual

WARR – Wide Aperture Reflection or Refraction

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	20
2 PAVIMENTOS	23
2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	25
2.2 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	28
3 METODOLOGIA	32
3.1 INTRODUÇÃO	32
3.2 TEORIA.....	36
3.3 Equações de Maxwell	36
3.4 Relações Constitutivas da Matéria	37
3.5 Propagação da onda	40
3.6 LEVANTAMENTO	43
3.7 Geometria de aquisição	44
3.8 Parâmetros de aquisição	45
3.9 PROCESSAMENTO.....	47
4 ÁREAS DE ESTUDO:MAURITI E UFPA	52
4.1 GEOLOGIA LOCAL.....	53
4.2 SOLO	55
4.3 CLIMA	56
5 MODELAGEM NUMÉRICA	57
5.1 O MÉTODO FDTD	57
5.2 ESTRUTURA EM PAVIMENTOS.....	59
5.3 Caso 1 – Canalização	64

5.4	DEFEITOS NO PAVIMENTO	67
5.5	Caso 2 – Vazio	67
5.6	Caso 3 – Infiltração.....	71
5.7	EMBASAMENTO DE PAVIMENTO.....	75
6	EXPERIMENTO DE CAMPO 1 – MAURITI.....	82
6.1	INTRODUÇÃO	82
6.2	RADARGRAMAS	88
6.3	Radargramas transversais à pista com antena de 400 MHz.....	88
6.4	Radargramas longitudinais à pista com antena de 400 MHz	96
6.5	VISUALIZAÇÃO 3D.....	101
6.6	Trecho de 50 m com antena de 400 MHz	101
6.7	Detalhe de Setor Defeituoso com antena de 900 MHz	102
7	EXPERIMENTO DE CAMPO 2 – UFPA.....	110
7.1	INTRODUÇÃO	110
7.2	RADARGRAMAS	111
7.3	VISUALIZAÇÃO 3D.....	124
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	128
	REFERÊNCIAS	134

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT) a malha rodoviária representa a maior parte das vias de circulação do país, sendo responsável por mais da metade do total de circulação de cargas e pessoas (CNT, 2009a).

Apesar de sua importância, o sistema rodoviário brasileiro é, dentre os demais sistemas, um dos que mais apresentam problemas. A pavimentação das vias é ínfima, quando comparada à sua extensão, já que menos do que 13% são pavimentadas (op. cit.). Os problemas se agravam quando se atenta para as condições dessas vias.

Grande parte das rodovias pavimentadas apresenta algum tipo de defeito que leva, por exemplo, ao aumento dos custos do transporte (combustível, diminuição da velocidade de operação) e aumento da poluição.

O número de acidentes de trânsito é elevado no país. Mesmo não sendo possível inferir que acidentes de trânsito são causas diretas de problemas de pavimentação, não se pode excluir esse fator.

Atualmente, a falta de financiamento para a conservação e a manutenção das rodovias brasileiras, como apontado pela CNT, levam à degradação das mesmas e uma consequência direta para a sociedade é o aumento da insegurança nas rodovias (CNT, 2009b).

Um entrave a uma política de conservação e manutenção das vias é a carência de métodos de avaliação eficientes de pavimentação que sejam de baixo custo. A maioria dos métodos usados nas avaliações baseia-se em técnicas destrutivas, como furos de sondagem ou ensaios de carga e simuladores de tráfego, as quais oneram a análise.

Este trabalho ilustra o uso de um método geofísico conhecido como radar de penetração do solo ou, simplesmente, GPR (do inglês *Ground Penetrating Radar*) para avaliação de pavimentos de forma não destrutiva e de baixo custo. O GPR usa ondas eletromagnéticas para investigar a subsuperfície. Uma antena emite a onda que penetra na subsuperfície que, ao retornar à superfície, é registrada pela mesma

antena ou por outra antena. A resposta é exibida na forma de ondas eletromagnéticas, na qual se podem ver as amplitudes e o tempo de propagação.

Mudanças na amplitude da onda são devidas às variações nas propriedades elétricas do meio, possibilitando inferir mudança no meio. Tais variações são causadas principalmente pelo conteúdo de água e ar (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980¹, apud DAVIS; ANNAN, 1989).

O GPR é amplamente usado em investigações das mais variadas como meio ambiente, investigações arqueológicas, investigações geotécnicas, prospecção mineral, prospecção de água subterrânea, engenharia civil, entre outros (JOL, 2009). Este trabalho se deterá à aplicação do método no estudo de problemas relacionados a pavimentos. O GPR é amplamente empregado em estudos de pavimentos em diversos países, mas no Brasil esse uso ainda é pouco difundido.

O uso do GPR para esta finalidade baseia-se na busca de feições relacionadas a defeitos no pavimento, como fraturas, “vazios”, infiltração de água, argila ou areia, além de investigações da espessura de cada camada que compõe o pavimento. Vazios e fraturas quando preenchidos com ar causam atenuação na amplitude, enquanto a presença de água ou umidade causa aumento da amplitude. A espessura de camadas é estimada por padrões de reflexão horizontal.

Este trabalho objetiva: i) identificar defeitos relacionados principalmente à presença de vazios e ao aumento do teor da umidade nas camadas subjacentes à cobertura asfáltica e ii) delimitar camadas do revestimento. Adicionalmente, é apresentada uma simulação numérica do GPR em pavimentos asfálticos, com modelos físicos constituídos de camadas e defeitos mais comuns. Com isso mostram-se os padrões de resposta esperados do GPR na estrutura investigada e como relacioná-los com defeitos, interfaces de camadas e com o substrato.

No capítulo 2 mostram-se a importância das rodovias para o país, a definição das principais terminologias usadas pela engenharia civil, relativas aos pavimentos e seus defeitos, bem como os principais métodos usados em avaliações.

¹ TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, n.3, p. 574-582. 1980.

O capítulo 3 corresponde ao método GPR – definição, aplicações, breve revisão bibliográfica, teoria e definição dos parâmetros de aquisição e do levantamento dos dados.

No capítulo 4 é feita uma descrição da área de estudo, com enfoque na geologia local, classificação do solo e do clima. O capítulo 5 corresponde à modelagem, com a definição do método usado e descrição dos exemplos desenvolvidos nesse trabalho. Nos capítulos 6 e 7 são apresentados os resultados dos levantamentos de campo feitos nos dois locais escolhidos para estudo. Por fim, no capítulo 8 são discutidos os resultados e apresentadas conclusões e algumas recomendações.

2 PAVIMENTOS

As rodovias constituem a principal via de transporte do país. Segundo o Boletim Estatístico de 2009 da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2009a), a malha rodoviária, com mais de 1,6 milhões de quilômetros de extensão, representa 92,63% das vias de circulação do país Brasil. Os 7,37% restantes correspondem aos sistemas ferroviário, aquaviário (hidrovia) e aeroviário (Tabela 2.1). Essa malha responde pelos maiores percentuais de circulação de cargas e pessoas, tendo 61% de participação na movimentação anual de carga e 53,53% na movimentação de pessoas (Tabela 2.2).

Apesar de sua importância, o sistema rodoviário brasileiro é, dentre os demais sistemas, um dos que mais apresentam problemas. Ainda de acordo com a CNT, do total de rodovias brasileiras, apenas 12,95% são pavimentadas, dos quais 95% com revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2006). Os problemas se agravam quando se atenta para as condições dessas vias pavimentadas.

A pesquisa CNT de Rodovias 2009 mostrou que dos 89.552 km de rodovias pavimentadas pesquisadas – entre rodovias federais, estaduais ou concessionadas – em 54,2% (ou 48.599 km) o pavimento apresentava algum tipo de imperfeição, sendo classificado em regular, ruim ou péssimo (CNT, 2009b).

A mesma pesquisa, em uma análise socioeconômica da situação das rodovias, conclui que os principais impactos negativos são aumento médio de 28% do custo operacional dos veículos; acréscimo de até 5% do consumo de combustível; queda de velocidade operacional e maior emissão de poluentes. Somem-se a isso dados mais alarmantes.

Em estudo recente, a Confederação Nacional dos Municípios (CNM, 2009), tomando três importantes bases de dados, mostrou que em 2008 o país registrou 57.000 mortes por acidentes de trânsito (AT), o equivalente a uma média de 156 mortes por dia ou aproximadamente seis mortes por hora. A Tabela 2.3 faz uma comparação entre os números apresentados pelo Brasil, Estados Unidos e União Europeia.

Tabela 2.1 – Malha viária brasileira.

MALHA VIÁRIA	Extensão (Km)
Rodoviária	1.647.881
Ferrovária	58.131
Aquaviária (hidrovias)	73.000
Total	1.779.012

Fonte: CNT (2009a)

A partir dos dados da Tabela 2.3, pode-se dizer que, proporcionalmente à população, o número de mortes por AT no Brasil é 2,5 vezes maior do que nos Estados Unidos e 3,7 vezes maior do que na União Europeia.

Mesmo não sendo possível inferir que acidentes de trânsito têm como causas diretas problemas de pavimentação, não se pode excluir esse fator. Atualmente, a falta de financiamento para a conservação e manutenção das rodovias brasileiras, conforme estudo da CNT (2009b), levam à degradação das mesmas e uma consequência direta para a sociedade é o aumento da insegurança das rodovias.

Tabela 2.2 – Matriz do transporte

Modal	Transporte de Carga		Passageiros Transportados
	Milhões (TKU)	Participação (%)	
Rodoviário	485.625	61,1	131.561.738
Ferrovário	164.809	20,7	1,67 milhões
Aquaviário	108.000	13,6	—
Dutoviário	33.300	4,2	—
Aeroviário	3.169	0,4	113.225.968
Total	794.903	100,0	246.457.706

Fonte: CNT (2009a).

Pode-se apontar como entrave a uma política de conservação e manutenção das vias a carência de métodos de avaliação eficientes e de baixo custo. A maioria dos métodos usados em avaliações de pavimentos baseia-se em técnicas destrutivas, como furos de sondagem ou ensaios de carga e simuladores de tráfego, as quais oneram a análise.

Tabela 2.3 – Mortes por acidente de trânsito (InternationalTransportForum, EuropeanComissionTransport).

País	Mortes por AT – 2008	População (2008) em milhões	Coefficiente de mortalidade por 100 mil habitantes
Brasil	57.116	189,6	30,1
Estados unidos	37.261	304,0	12,5
União Europeia	38.876	498,0	7,8

Fonte: CNM(2009).

2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Pavimento é uma estrutura formada por camadas sobrepostas a uma superfície de terraplenagem ou terreno natural. Os pavimentos podem ser classificados em três tipos, de acordo com a composição: rígido, semirrígido e flexível (BERNUCCI, et al., 2006; ALVES, 2007).

O pavimento rígido é constituído por duas camadas: sub-base e base. A sub-base é composta de material granular (seixo), estabilizada ou não com cimento, e a base é composta de lajes armadas ou não com barras de aço (BERNUCCI, op. cit.; ALVES, op. cit.).

O pavimento semirrígido tem uma camada de material granular estabilizada com cimento e, sobre esta, uma ou duas camadas de material betuminoso.

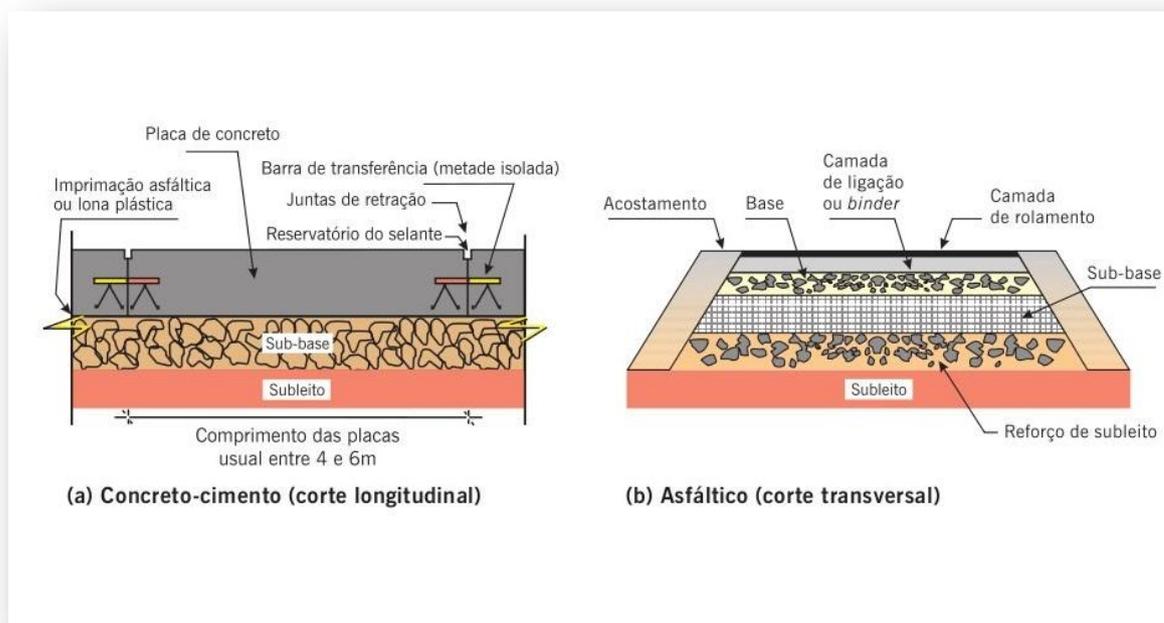
O pavimento flexível ou asfáltico compreende quatro camadas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. O reforço do subleito é formado por

material granular, enquanto a sub-base, por agregados de granulometria variada. A base, por sua vez, é composta por uma mistura betuminosa (asfáltica) à base de agregados (ALVES, 2007). Por fim, tem-se o revestimento que é constituído de mistura asfáltica e agregados resistentes (BERNUCCI, 2006).

O pavimento asfáltico é o tipo mais encontrado em vias públicas. Isso ocorre principalmente porque o asfalto é um bom impermeabilizante, resistente e durável. Em primeiro lugar, o revestimento de mistura asfáltica o torna impermeável, impedindo que líquidos invadam o pavimento. Além disso, as camadas superiores são formadas por misturas asfálticas que reagem pouco com sais e ácidos, sendo praticamente estáveis na presença de água da chuva, por exemplo (BERNUCCI op. cit.). Por fim, essas camadas também apresentam alto grau de deformação, resistindo melhor que os pavimentos rígidos e semirrígidos quando da aplicação de tensões provocadas pelo tráfego de veículos (ALVES, op. cit.).

A Figura 2.1 mostra esquematicamente dois dos tipos de pavimentos supracitados. Os pavimentos têm como principal função melhorar as condições de trânsito. Esta função está relacionada ao estado de preservação de toda a estrutura, pois o conforto, a segurança e a resistência aos esforços do tráfego são avaliados pelo desempenho do pavimento. O desempenho de um pavimento pode ser avaliado de duas formas: por sua característica funcional e estrutural (DNIT, 2005).

Figura 2.1 – Corte esquemático de dois tipos de pavimentos



Fonte: BERNUCCI et al. (2006).

O desempenho funcional é a capacidade do pavimento de proporcionar uma superfície adequada à qualidade de rolamento (DNIT, 2005). Esta avaliação é geralmente feita de forma subjetiva, baseada na opinião de usuários.

O desempenho estrutural, por sua vez, é a capacidade do pavimento de se manter inteiro, sem falhas na sua estrutura.

Os defeitos nos pavimentos são responsáveis pela perda de seu desempenho, seja funcional ou estrutural. O conhecimento de tais irregularidades é importante porque auxilia na escolha das técnicas de monitoramento e processo de restauração. Um quadro resumo, baseado nas definições da norma DNIT 005/2003 – TER, com ilustrações de alguns defeitos associados a pavimentos é mostrado na Figura 2.2.

No próximo item serão apresentadas as principais metodologias empregadas na avaliação de pavimentos asfálticos.

2.2 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A degradação do pavimento é um processo inerente à sua existência (YODER ; WITCZAK, 1975², apud ALVES, 2007). A avaliação deste processo deve seguir critérios pré-estabelecidos. O DNIT (2003) estabelece alguns critérios para a avaliação dos pavimentos, dentre os quais se podem citar as condições de superfície e as estruturais. A primeira avalia os problemas superficiais que influenciam no desempenho do pavimento, baseada em parâmetros de referência regulamentados em normas e procedimentos, enquanto a segunda baseia-se principalmente no nível de desempenho mecânico do pavimento.

A avaliação das condições de superfície baseia-se, entre outros, na identificação de defeitos, em avaliações objetiva e subjetiva e em levantamentos visuais da superfície. Os defeitos são identificados e classificados de acordo com a terminologia estabelecida pela NORMA DNIT 005/2003 (Figura 2.2). A avaliação objetiva, por sua vez, baseia-se na classificação do estado de um trecho do pavimento, em função da incidência de defeitos. Esta avaliação é feita pelo Índice de Gravidade Global (IGG). A avaliação subjetiva da superfície determina qualidades como suavidade e conforto de rolamento. Esta avaliação é feita principalmente por meio do Valor da Serventia Atual (VSA). Por fim, o levantamento visual combina procedimentos de avaliações objetivas e subjetivas da superfície, a fim de estabelecer porcentagem de áreas com defeitos.

²²YODER, E. J; WITCZAK, M.W. **Principles of Pavement Design**. 2nd edition. J. Wiley & Sons, New York, United States, 1975.

Figura 2.2– Quadro resumo dos principais defeitos em pavimentos

FENDAS Qualquer descontinuidade na superfície do pavimento.					
FISSURA Fenda delgada no revestimento, perceptível somente a uma distância inferior a 1,50 m. Não representam problemas sérios ao revestimento, sendo negligenciadas nos métodos de avaliação das condições de superfície.	TRINCAS Fenda facilmente perceptível, de diâmetro maior que o da fissura, podendo estar isolada ou interligada.				
	ISOLADAS		INTERLIGADAS		
	TRANVERSAIS Direção ortogonal ao eixo da via.	LONGITUDINAIS Direção paralela ao eixo da via.	RETRAÇÃO Trinca isolada causada por retração térmica do revestimento ou da base rígida ou semirrígida.	TIPO "COURO DE JACARÉ" Trincas interligadas imitando couro de jacaré. Podem apresentar erosão nas bordas.	TIPO BLOCO Trincas interligadas com forma de blocos. Podem apresentar ou não erosão nas bordas.
	CURTA: extensão inferior a 1m. LONGA: extensão superior a 1m.	CURTA: extensão inferior a 1m. LONGA: extensão superior a 1m.			
AFUNDAMENTO Depressão permanente na superfície do pavimento. Pode apresentar soergimento.					
PLÁSTICO Causado por movimentação plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito, seguido de soergimento. PLÁSTICO LOCAL: extensão inferior a 6m. PLÁSTICO DA TRILHA DE RODA: extensão superior a 6m, ao longo da trilha de roda.		DE CONSOLIDAÇÃO Causado pela diferença de consolidação de uma ou mais camadas do pavimento. Não apresenta soergimento. DE CONSOLIDAÇÃO LOCAL: extensão inferior a 6m. DE CONSOLIDAÇÃO DA TRILHA DE RODA: extensão superior a 6m, ao longo da trilha de roda.			
ONDULAÇÃO OU CORRUGAÇÃO Ondulações ou corrugações transversais à superfície.					
ESCORREGAMENTO Deslocamento do revestimento relativo à camada subjacente					
EXSUDAÇÃO Ligante betuminoso excedente na superfície, proveniente do revestimento.					
DESGASTE Resultado da perda gradual de agregados do pavimento, levando à aspereza da superfície do revestimento. É causado por esforços tangenciais do tráfego.					
PANELA OU BURACO Cavidade no revestimento que pode atingir camadas inferiores e levar à desagregação. É causada principalmente pela baixa coesão das camadas que leva à soltura de camadas.					
REMENDO Panela preenchida com uma ou mais camadas de pavimento nos reparos "tapa-buraco".					
PROFUNDO Troca do revestimento e às vezes de uma ou mais camadas do pavimento. Apresenta forma retangular.		SUPERFICIAL Correção local do revestimento, com aplicação de camada betuminosa.			

Fonte: DNIT (2003).

A avaliação estrutural é feita por métodos destrutivos e não-destrutivos.

Os métodos destrutivos baseiam-se na coleta de amostras do pavimento para análise em laboratório. Esta análise pode fornecer informações como teor de umidade, espessura das camadas, uniformidade do material das camadas, intrusão de materiais de outras camadas, teor de asfalto e granulometria (DNIT, 2006).

Os métodos não-destrutivos, por sua vez, baseiam-se principalmente em

medidas de deformação do pavimento por meio de ensaios de carga. Essa deformação pode ser de dois tipos. O primeiro é o elástico, efeito de flexão alternada do pavimento, chamada deflexão, a qual é a principal forma de avaliação estrutural de um pavimento em uso (BERNUCCI et al., 2006). O segundo tipo de deformação, o permanente, leva ao afundamento de trilha de roda e é critério de definição da vida útil estrutural e funcional de um pavimento.

Os ensaios de carga fornecem a capacidade estrutural do pavimento, informando como cada camada influencia o comportamento estrutural do conjunto a partir de medidas de deflexões em vários pontos ao longo do pavimento (ALVES, 2007). As medidas de deflexão são feitas por equipamentos chamados deflectômetros. No Brasil, os mais usados são a Viga de Benkelman e o *FallingWeightDeflectometer* (FWD) (BERNUCCI op. cit.).

A Viga de *Benkelman* é um dispositivo simples e muito difundido para medidas de deflexões em pavimentos (DNIT, 2006). É formado por uma viga horizontal sobre três pés, um traseiro e dois dianteiros. Um braço de prova é posto na parte frontal da viga de referência, com a porção maior posicionada adiante da viga e a menor sob ela. A ponta do braço de prova alcança o pavimento no ponto a ser medido, e na outra extremidade está um extensômetro, instrumento que mede deformações dos corpos quando sujeitos a uma carga (DNER, 1997). A viga é fixada em um caminhão com eixo traseiro de roda dupla e com uma determinada carga (geralmente de 8,2t), a qual é aplicada ao pavimento, permitindo que se meça a deflexão (DNIT, op. cit.).

O levantamento consiste em quatro etapas. Primeiro, em um dos lados, posiciona-se a ponta do braço de prova entre os pneus da roda dupla da traseira do caminhão. Depois, faz-se a leitura inicial L_i no extensômetro. Feito isso, afasta-se o caminhão até que o extensômetro não acuse variação e, por fim, faz-se a leitura final L_f no extensômetro (BERNUCCI op. cit.). A deflexão d_0 será então dada por:

$$d_0 = (L_i - L_f) \cdot K \quad (2.1)$$

em que K é a constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor (op. cit.).

Os equipamentos que usam o impacto de uma carga sobre o pavimento

para medidas de deflexão são chamados dispositivos dinâmicos de impacto, FWD ou deflectômetros de impacto. A carga é elevada até uma altura pré-estabelecida e posta em queda livre para atingir uma placa sobre do pavimento a qual, por sua vez, transmite parte do esforço ao pavimento (DNIT, 2006). A resposta ao impacto é registrada por sensores dispostos de forma longitudinal a partir da placa. Estes sensores são conectados a um veículo que carrega outra parte do sistema de aquisição e um computador, no qual os dados são registrados. Assim, o levantamento baseia-se na aplicação da carga e na leitura dos deslocamentos por meio dos sensores (BERNUCCI et. al., 2006).

A viga de *Benkelman* e os deflectômetros de impacto são usados em avaliações de pavimentos, com algumas restrições. A principal vantagem dos deflectômetros de impacto é simular aproximadamente as condições de carga do tráfego. Além disso, possibilitam obter com rapidez a curva de deflexão do pavimento em função da distância. Os equipamentos, contudo, são de alto custo.

A viga de *Benkelman* tem a vantagem de ser um equipamento simples e as versões automáticas melhoraram sua aplicação, mas a lentidão e a baixa precisão de seu uso tornam suas respostas pouco confiáveis (DNIT, op. cit.). Por isso, a busca por método de avaliação que reproduza de forma confiável o estado do pavimento, em um intervalo mínimo de tempo e com baixo custo é fundamental. O GPR semostra-se compatível com as exigências acima mencionadas e sua aplicação vem sendo comprovada em diversos trabalhos envolvendo avaliação de pavimentos, como será visto mais adiante.

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

O *GroundPenetrating Radar*(GPR) é um método geofísico que consiste na propagação de pulsos eletromagnéticos de frequência entre 10 MHz e 2,5 GHz (SAARENKETO, 2006) ou mesmo até 3,2 GHz (BORGES, 2011, informação verbal³). Uma antena emite o pulso e o seu retorno é recebido também por uma antena, sendo exibido na forma de uma onda eletromagnética, na qual se podem ver as amplitudes e o tempo decorrido entre a transmissão e a reflexão do pulso. O método baseia-se no fato de que contrastes nas propriedades elétricas do meio propagante causam mudanças no padrão das reflexões, permitindo caracterizar diferentes meios. As mudanças nas propriedades elétricas do meio são controladas principalmente pelo conteúdo de água: o aumento do conteúdo de água ocasiona aumento das reflexões (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980⁴, apud DANIELS, 2004; ANNAN, 1989).

O trabalho de Hulsenbeck (1926) figura como o primeiro no uso de pulsos eletromagnéticos para localizar estruturas na subsuperfície (HULSENBECK, 1926⁵, apud DANIELS, op. cit.). Hulsenbeck (op. cit.) percebeu que variações nas propriedades dielétricas – e não somente a condutividade – poderiam causar reflexões. Outros trabalhos usando a técnica de reflexão de pulsos eletromagnéticos também foram realizados a partir da década de 1930 (DANIELS, op. cit.).

O interesse ressurgiu na década de 1970, com a expansão da exploração espacial. Desde então, as aplicações da técnica expandiram-se rapidamente, incluindo investigações arqueológicas; supervisão de minas, túneis e pontes; construção civil (op. cit.).

³ BORGES, W. R. Laboratório de Geofísica Aplicada. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 2011.

⁴ TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. e ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research** 16, (3), 574-582.1980.

⁵HULSENBECK, & CO. **Verfahren zurelektrischen Bodenforschung**. German patent 489434.1926.

Na construção civil, especificamente em obras de infraestrutura como pavimentação, o uso do GPR baseia-se na detecção de feições que possam ser relacionadas a defeitos no pavimento como fraturas; “vazios”; intrusão de água, argila ou areia, entre outros, além da investigação da espessura de cada camada que compõe o pavimento. Fraturas e vazios são detetados pela atenuação que provocam na resposta. A presença de água ou o aumento da umidade acentuam o padrão de resposta (refletores acentuados, descontínuos). Argila e areia podem ter efeitos opostos: a primeira provoca atenuação, enquanto com a presença de areia, isso não ocorre. A espessura de cada camada do pavimento pode ser inferida pela continuidade de refletores horizontais.

O primeiro trabalho com GPR para monitoramento de pavimentos foi realizado nos Estados Unidos em meados da década de 1970. O trabalho, executado pela *Federal Highway Administration* (FHWA), testou a aplicabilidade do método para avaliações das condições de pavimentos de túneis e pontes (MOREY, 1998⁶, apud SAARENKETO, 2006). Ainda nos Estados Unidos, More e Erhard (1978⁷, apud SAARENKETO, op. cit.) empregaram o GPR para detecção de vazios sob pavimento de concreto.

Segundo Saarenketo (op. cit), apesar de terem sido realizados trabalhos em vários países europeus e de terem sido obtidos bons resultados (por exemplo, ULRIKSEN, 1982⁸; JOHANSSON, 1987⁹; CARLSTEN, 1988¹⁰; BERG, 1984¹¹, apud SAARENKETO, op. cit.), o uso do GPR em monitoramento de pavimentos não teve grande relevância na época. Na Finlândia, entretanto, trabalhos realizados por este autor na década de 80 impulsionaram o uso do GPR como uma ferramenta

⁶MOREY, R. Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities. Synthesis of Highway Practice 255, **National Cooperative Highway research Program**. Transportation Research Board. National Academy Press. Washington, DC. 1998. 46 p.

⁷MORE JR & ERHARD JD. Radar detection of voids under concrete highways. **IEEE International Radar Conference**. Georgia Institute of Technology, Atlanta. 1978.

⁸ULRIKSEN, CPF. **Application of impulse radar to civil engineering**. Doctoral Thesis. Lund University of Technology. Department of Engineering Geology. 1982. 179 p.

⁹ JOHANSSON, HG. 1987. **Använding av Georadar I Olika Vägverksprojekt**. Vägverket, Serviceavdelning Väg och Brokonstruktion, Sektioner för geoteknik, Publ 1987, 59. Sweden.

¹⁰CARLSTEN, P. **Peat, geotechnical properties and up-to-date methods of design and construction**. Varia 215. Statens geotekniska institut, Linköping, Sweden. 1988. 35 p.

¹¹BERG, F. **Ikke Destruktiv Måling af Lagstykkelse I Vejbefæstelse**. Vejdirektoratet, Statens Vejlaboratorium, Notat 157. Denmark. 1984.

importante na elaboração de projetos de reabilitação de pavimentos e posteriormente como ferramenta de controle de qualidade.

Trabalhos como o de Hugenschmidt, Partl e Witte (1998) apresentam um exemplo de aplicação do GPR para inspeção de pavimentos na Suíça. Os objetivos foram determinar os limites entre as camadas dos pavimentos, identificar zonas porosas preenchidas com água e mapear danos como fissuras, fraturas, e rachaduras. O trabalho possibilitou identificar a base do pavimento, a espessura da cobertura asfáltica e limites entre as camadas do pavimento.

A despeito de metodologias tradicionais de monitoramento de pavimentos como os furos de amostragem, com o GPR foi possível identificar zonas de danos previamente desconhecidas, além da extensão e profundidade do problema. Essas informações foram usadas como suporte ao planejamento do trabalho de manutenção e substituição da cobertura asfáltica.

Hickman et al. (2000) fizeram um levantamento ao longo de uma rodovia interestadual nos limites do estado de Missouri, Estados Unidos. Os objetivos eram: determinar as espessuras das camadas do pavimento; atualizar as informações do projeto inicial de construção da rodovia, relativamente à composição e identificar áreas com danos. Os resultados permitiram identificar as camadas do pavimento como a base e zonas de reforço de concreto, além de indicar os limites destas com a cobertura asfáltica. Ademais, zonas em que houve perda de qualidade nos sinais do GPR foram associadas a danos no pavimento como afinamento do asfalto e solapamento.

Lenngren, Bergström e Ersson (2000) realizaram um trabalho de supervisão de pavimentos que incluiu o GPR e outras metodologias como deflectômetro FWD, medidas de rugosidade e levantamento visual da superfície do asfalto. Além de identificar danos e problemas relacionados ao pavimento e de dar suporte à recuperação, o trabalho também buscava indicar qual seria a metodologia mais eficiente. Dentre elas, os autores destacaram o GPR como principal ferramenta, tanto por sua natureza não destrutiva quanto pelo registro contínuo dos dados.

Ainda segundo os autores, outras metodologias podem ser usadas para corroborar as respostas obtidas com o GPR. Todos os resultados foram usados na

elaboração do primeiro inventário da Central de Administração de Ruas da Suécia (SNRA) que incluiu o GPR como teste obrigatório na avaliação de pavimentos.

Maser (2002) descreve o uso do GPR para determinar a espessura do pavimento na cidade de Nova Iorque, Estados Unidos, em cinco rodovias. Além da espessura, em três dos casos foi possível avaliar a condição da base do pavimento. As espessuras foram determinadas a partir do tempo de trânsito da onda; enquanto danos como zonas com alto teor de umidade no pavimento foram associados à ausência de reflexão. Os resultados serviram para elaboração do projeto de reabilitação, com substituição de parte da cobertura asfáltica.

Angióet al. (2003) destacam que o desempenho do pavimento está diretamente relacionado com a espessura de cada camada e com a espessura total da estrutura, razão pela qual a avaliação da espessura das camadas é fundamental no monitoramento. Os autores supracitados apresentam uma proposta de processamento automático e identificação das espessuras das camadas. Como resultado, foi possível determinar as espessuras de camadas de 40-70 mm com erro de 10 mm, ou seja, 25 a 13% de erro.

Lahouar e Al-Qadi (2008) apresentam uma solução para o problema de detecção de múltiplas camadas em sistemas de pavimento, com o uso do GPR. Os autores usaram dois tipos de filtros: um detetor e um detetor combinado. No primeiro assume-se que um sinal detetável está acima do nível de ruído especificado enquanto no segundo um sinal é declarado presente se a razão sinal/ruído excede um limite estabelecido. Os pulsos detetados foram usados em um modelo de reflexão para simular um sinal semelhante ao sinal medido. Feito isso, o sinal modelado é então subtraído do sinal medido a fim de revelar reflexões antes ausentes. Em uma aplicação a dados reais, esta técnica de filtragem mostrou ser possível determinar camadas múltiplas com um erro de 2,5%.

Alves (2007) apresenta uma alternativa de inspeção de pavimentos flexíveis integrando dados de GPR e de deflectômetro de impacto. Os resultados permitiram definir espessura e composição das camadas, bem como determinar o comportamento estrutural de cada camada.

No Brasil, ainda são raros os trabalhos sobre o tema. Destacam-se os trabalhos de Aguiar (2005) e Lopes (2009).

Aguiar (2005) testou a aplicabilidade do GPR na avaliação de pavimentos flexíveis, delimitação da interface pavimento-substrato e proximidade do nível freático, integrando dados geodésicos à resposta GPR obtida em um trecho da Rodovia Alça Rodoviária, no estado do Pará, que liga a BR-316 à PA-151. Os resultados permitiram correlacionar defeitos identificados na observação direta com feições nos radargramas. Além disso, foi possível delinear o nível freático e classificar o substrato como argiloso.

Lopes (2009) apresenta um estudo com GPR realizado em trechos do pavimento do campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Os dados de GPR foram correlacionados a dados de deflectometria obtidos com a *Viga de Benkelman*. Os resultados obtidos com o GPR permitiram localizar dutos sob o pavimento; distinguir camadas que compunham o pavimento e avaliar a compactação do subleito. A combinação dos dois grupos de resultados possibilitou avaliar a variação das espessuras das camadas, tipo de material e posição das mesmas em relação ao substrato.

3.2 TEORIA

3.3 Equações de Maxwell

A teoria do método GPR baseia-se no princípio de propagação de ondas eletromagnéticas, fundamentado nas equações de Maxwell e nas relações constitutivas do meio (DANIELS, 2004). As equações de Maxwell descrevem o comportamento da onda a partir dos seguintes campos vetoriais: campo magnético \vec{H} (A/m), densidade de corrente \vec{J} (A/m²), deslocamento elétrico \vec{D} (C/m²), campo elétrico \vec{E} (V/m) e indução magnética \vec{B} (em Weber/m²). Estes, por conseguinte, estão relacionados por meio das seguintes equações:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

3.4 Relações Constitutivas da Matéria

A interação entre estes campos e o meio no qual estão sendo aplicados pode ser descrita a partir de relações constitutivas, estabelecidas pelas propriedades elétricas desse meio que influenciam a propagação dos campos na subsuperfície. Estas propriedades são: condutividade elétrica, permeabilidade magnética e permissividade elétrica.

A condutividade elétrica refere-se a cargas livres que podem se deslocar na presença de um campo elétrico. Estão compreendidas nas soluções eletrolíticas (água e íons provenientes de minerais de rochas) que preenchem os poros das rochas da subsuperfície. A condutividade age de forma a atenuar a energia da onda eletromagnética e é relacionada ao campo elétrico por meio da Lei de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.3)$$

em que σ é a condutividade elétrica, em Siemens por metro (S/m). Seu inverso, ρ , $\rho=1/\sigma$ corresponde à resistividade elétrica (Ohm.m).

Em outra relação constitutiva é possível relacionar o vetor indução magnética \vec{B} ao campo magnético \vec{H} , por meio de uma constante de proporcionalidade:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.4)$$

em que a constante de proporcionalidade μ representa a permeabilidade magnética, cujo valor assumido para o vácuo é $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Em trabalhos geofísicos usa-se a permeabilidade relativa, dada segundo a razão:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.5)$$

Em que μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

A permeabilidade magnética da maioria dos materiais encontrados na subsuperfície tem seu valor aproximado para o correspondente no vácuo e como

não há variações significativas desta propriedade com a frequência, seu valor não afeta a velocidade de propagação (POPINI, 2001; SAARENKETO, 2006).

A terceira relação constitutiva estabelece uma relação linear entre o campo elétrico \vec{E} e o deslocamento elétrico \vec{D} , por meio da permissividade elétrica. A permissividade elétrica refere-se ao comportamento do campo elétrico e ao fluxo de corrente em um determinado meio:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

em que ε é a permissividade elétrica, cujo valor no vácuo é $\varepsilon_0 = 8.54 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

Em trabalhos práticos usa-se comumente a permissividade elétrica relativa ε_r ou constante dielétrica k que equivale à razão entre o valor da permissividade do meio e o valor da permissividade no vácuo:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

A velocidade de propagação é controlada principalmente pela permissividade relativa do material o qual, por sua vez, depende do conteúdo de água. Materiais com conteúdo de água considerável comportam-se como condutores elétricos, principalmente se a água contiver íons. A maior parte das águas que ocorrem na natureza apresenta certo grau de condução iônica, agindo então como uma solução eletrolítica. Para frequências baixas, incluindo a faixa em que o GPR opera, a água tem permissividade relativa ε_r igual aproximadamente a 80, ao passo que para asfalto seco, por exemplo, oscila entre 2-4 (DANIELS, 2004).

A permissividade elétrica também varia com a frequência, mas geralmente permanece constante para a maioria dos materiais quando da aplicação de frequências usadas em levantamentos com o GPR (op. cit.). A Tabela 3.1 apresenta valores de condutividade e permissividade relativa de alguns materiais encontrados em pavimentos.

Ao se propagar em um meio, a onda sofre perdas de energia que levam à atenuação do sinal. Em materiais dielétricos, considerando apenas o efeito da condutividade e da permissividade elétricas, esta atenuação é causada tanto pelo efeito da condução como pelos efeitos dielétricos, não sendo possível distinguir qual

é o efeito predominante (op. cit). A permissividade e a condutividade podem ser definidas como números complexos:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.8)$$

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \quad (3.9)$$

com $j = \sqrt{-1}$.

ε' relaciona-se à permissividade elétrica, a qual pode também ser expressa em termos da permissividade relativa, enquanto ε'' , às perdas causadas pela condutividade e pela frequência. Em trabalhos com frequências inferiores a 1 GHz e condutividades até a ordem de 0,1 S/m, o efeito de perdas é tão ínfimo que pode ser desprezado.

Na Natureza, os parâmetros medidos são a permissividade aparente $\tilde{\varepsilon}$ e a condutividade aparente $\tilde{\sigma}$ dadas por:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''_e \quad (3.10)$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma' - j\sigma''_e \quad (3.11)$$

O comportamento de um meio quando da propagação da onda pode ser descrito em termos da permissividade ou da condutividade aparentes:

$$\bar{\sigma} = j\omega\bar{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Na equação de propagação da onda, o efeito de ambas – permissividade e condutividade aparentes – ocorre combinado:

$$\sigma + j\omega\varepsilon = \sigma'_e - j\omega\varepsilon_e \quad (3.13)$$

em que σ'_e é a condutividade efetiva e ε'_e é a permissividade efetiva.

Tabela 3.1 – Condutividade e permissividade relativa de materiais sob frequência de 100 MHz.

Material	Condutividade (mS/m)	Permissividade relativa ϵ_r
Ar	0	1
Água doce	$10^{-4} - 10^{-2}$	81
Areia (seca)	$10^{-7} - 10^{-3}$	4 – 6
Areia (saturada)	$10^{-4} - 10^{-2}$	10 – 30
Argila (seca)	$10^{-3} - 10^{-1}$	6 – 12
Argila (saturada)	$10^{-1} - 1$	15 – 40
Asfalto (seco)	$10^{-3} - 10^{-2}$	2 – 4
Asfalto (úmido)	$10^{-2} - 10^{-1}$	6 – 12
Concreto (seco)	$10^{-3} - 10^{-2}$	4 – 10
Concreto (úmido)	$10^{-2} - 10^{-1}$	10 – 20
Solo arenoso (seco)	$10^{-4} - 10^{-2}$	4 – 6
Solo arenoso (úmido)	$10^{-2} - 10^{-1}$	15 – 30
Solo argiloso (seco)	$10^{-4} - 10^{-1}$	4 – 6
Solo argiloso (úmido)	$10^{-1} - 1$	10 – 15

Fonte: DANIELS (2004).

3.5 Propagação da onda

O fenômeno de propagação das ondas eletromagnéticas pode ser representado, de forma simplificada, pela propagação de uma onda plana. Isto é possível principalmente se o meio considerado for resistivo (ou seja, de baixas perdas de energia) como é o caso de ambientes com pouca ou nenhuma umidade. Frentes de ondas mais complicadas podem ser assumidas como superposição de ondas planas (DANIELS, 2004). Uma onda unidimensional propagando-se na direção perpendicular ao campo elétrico \vec{E} e campo magnético \vec{H} é descrita por:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (3.14)$$

A velocidade de propagação v é dada por

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}. \quad (3.15)$$

Como dito anteriormente, a permeabilidade magnética não afeta os resultados dos trabalhos com GPR, de forma que, tomando-se o seu valor no vácuo ($=1$), a velocidade de propagação toma a forma:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.16)$$

com c igual à velocidade da luz no vácuo, dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (3.17)$$

A solução da equação 3.14, considerando-se a propagação da onda EM para baixo da subsuperfície (sentido positivo de z), é:

$$E(z,t) = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3.18)$$

em que α e β correspondem às constantes de atenuação e de fase, respectivamente.

A primeira exponencial corresponde ao termo de atenuação e a segunda, ao termo de propagação. Na primeira exponencial, quando $z = 1/\alpha$, o alcance é de $1/e$; essa profundidade alcançada é chamada *skindepth*, sendo útil para estimar a profundidade de penetração do GPR. Deve-se considerar, entretanto, que a profundidade de penetração é afetada por outros fatores como a energia da reflexão do alvo (DANIELS, 2004). De um modo geral, ela diminui principalmente com o aumento da distância ao alvo e da frequência.

A equação também pode escrita resumidamente como

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-jkz}, \quad (3.19)$$

sendo k , a constante de propagação, escrita em sua forma simplificada como:

$$k = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} (1/m) \quad (3.20)$$

O comprimento de onda λ é definido como a distância que a onda se

propaga em um período de oscilação e dado por:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\kappa} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v}{f} (m), \quad (3.21)$$

que relaciona o comprimento de onda, a fase, a frequência e a velocidade de propagação da onda.

O padrão das reflexões em um radargrama depende do contraste entre as propriedades elétricas dos materiais da subsuperfície – geralmente a permissividade elétrica. Em uma camada de gelo, por exemplo, não há absorção da energia da onda eletromagnética e possivelmente essa estrutura não seria vista em um radargrama, enquanto que em uma camada de argila saturada há praticamente a absorção total da energia, a qual seria representada em um radargrama por uma “zona de sombra” (LIMA, 2007). A quantidade de energia refletida, bem como a parte transmitida ao meio, pode ser representada pelo coeficiente de reflexão r o qual, por sua vez, é descrito em termos da impedância intrínseca η , assim chamada porque seu valor depende apenas das propriedades do meio (DANIELS, 2004):

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}, \quad (3.22)$$

com 1 e 2 representando os dois meios, com η sendo dado por:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\mu} \left(\varepsilon' \left(1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

Em um meio não condutivo, como solo ou concreto seco, essa expressão pode ser simplificada para (op. cit.):

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2}} - \sqrt{\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r2}} + \sqrt{\varepsilon_{r1}}}, \quad (3.24)$$

em que ε_r é a permissividade relativa do meio.

Atenuação ocorre quando há mudança entre dois meios, à medida que a onda se propaga em profundidade. Adicionalmente, objetos ou interfaces com as mesmas dimensões do comprimento da onda refletida causam dispersão da energia, fenômeno conhecido como difração que representam ruídos de alta amplitude nos

dados de GPR.

A resolução do sistema GPR refere-se à capacidade do mesmo em distinguir entre dois sinais próximos, relativamente ao tempo entre si, ou seja, refletores próximos (DAVIS; ANNAN, 1980 apud DANIELS,2004.). A resolução é tanto melhor quanto maior for a frequência, sendo que para alguns autores a resolução ideal seria igual a um quarto do comprimento de onda (BERES e HAENI, 1991¹², apud POPINI, 2001). Esta estimativa, entretanto, deve considerar fatores como variações na velocidade e na forma da onda durante a propagação.

Teoricamente, portanto, melhores resoluções verticais são obtidas com as maiores frequências ao passo que maiores profundidades de penetração são obtidas com as menores frequências.

3.6 LEVANTAMENTO

O passo fundamental para se decidir ou não pelo uso do GPR em um trabalho consiste em avaliar se o método é aplicável ao objetivo proposto, o que implica em uma definição acurada do problema (ANNAN, 1992¹³, apud POPINI, 2001). Essa avaliação pode ser feita a partir das seguintes questões:

Quais as propriedades elétricas do alvo e do meio? Propriedades como a constante dielétrica e a condutividade elétrica devem ser, no mínimo, estimadas, pois para que o método seja exequível, é importante que haja contraste entre essas propriedades no meio.

Qual é a profundidade do alvo? Tal pergunta informará se o mesmo está dentro da faixa de profundidade de alcance do GPR.

Qual a forma do alvo? Informações como geometria ou mergulho serão úteis quando da identificação do alvo nos dados.

¹²BERES, M; HAENI, F. P. Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies. **Ground Water**. 1991. v. 29. n. 3, p 375-385.

¹³ ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar workshop notes**: Mississauga, Sensors & Software, Inc., 130 p. (Internal Report).1992.

Qual é a área do levantamento? Esta questão visa avaliar, por exemplo, como a presença de fontes de ruído e a variação na topografia podem afetar os resultados da pesquisa.

3.7 Geometria de aquisição

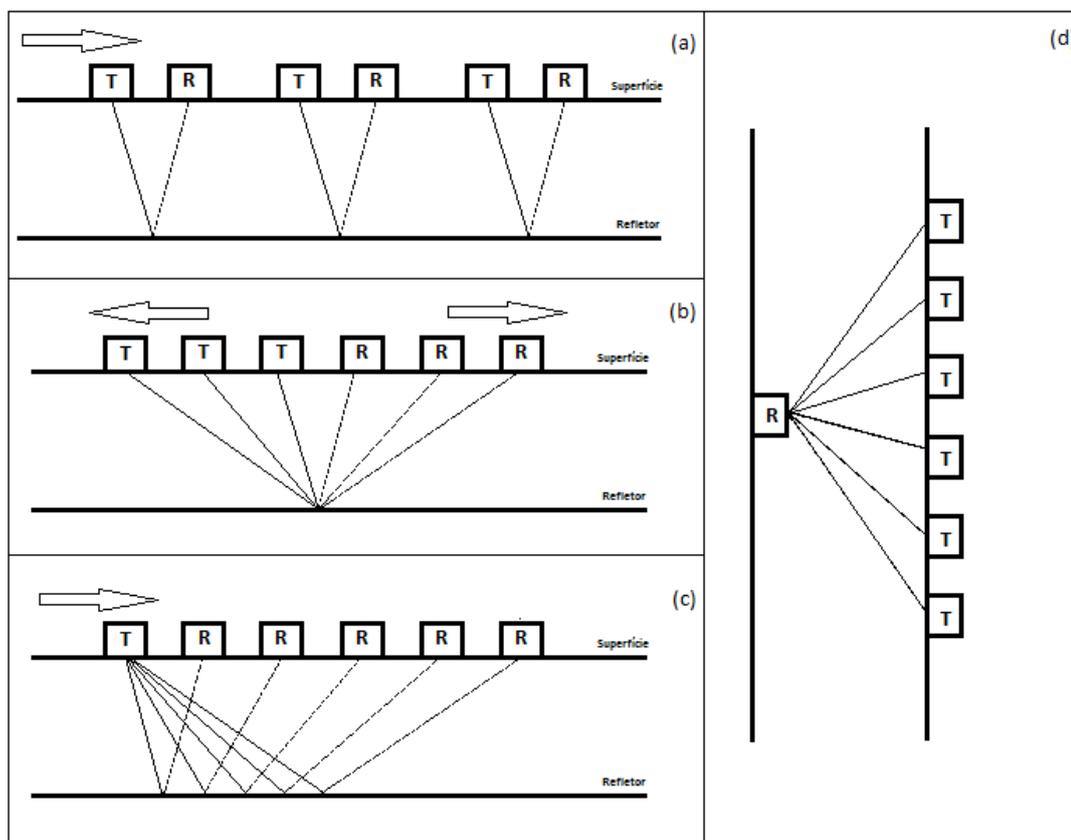
A aquisição de dados GPR pode ser feita de quatro modos: a) reflexão simples (*Common Offset*); b) ponto médio comum ou *Common Midpoint*(CMP), c) reflexão ou refração de grande abertura angular ou *WideApertureReflectionOrRefraction*(WARR) e d) transiluminação ou tomografia (Figura 2.2).

No primeiro modo, reflexão simples, o mais usado, as antenas transmissora e receptora são separadas por uma distância fixa e percorrem uma linha reta, cujo resultado é um radargrama, no qual o eixo horizontal corresponde à distância percorrida pelas antenas e o vertical, ao tempo duplo de reflexão. Esta é a técnica geralmente usada quando se tem uma mesma antena para recepção e transmissão.

No segundo modo, ponto médio comum, as antenas são deslocadas em sentidos opostos de um ponto central, de forma que a cada nova posição, as antenas encontram-se equidistantes do ponto central. No terceiro modo, reflexão ou refração de grande abertura angular, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é afastada lateralmente, com um incremento de distância. Esses dois modos são usados para avaliar a variação da velocidade do pulso do GPR em função do tempo. Na ausência de tal informação, entretanto, os valores da velocidade podem ser estimados por meio de correlação de sinais refletidos em uma interface a uma profundidade conhecida (calibração).

Por fim, no modo de transiluminação uma antena é fixada em um pilar ou em um poço, enquanto a outra é deslocada verticalmente. Esta técnica é raramente aplicada, sendo seu uso direcionado para avaliações estruturais – construção civil – ou quando do desenvolvimento de minas e poços (JOL, 2009).

Figura 3.1 – Modos de aquisição de dados GPR: a) reflexão comum; b) CMP; c) WARR e d) transiluminação.



Fonte: LIMA (2007).

3.8 Parâmetros de aquisição

Os principais parâmetros de aquisição a serem ajustados de acordo com os objetivos do levantamento são: frequência da antena; frequência de amostragem; abertura da janela temporal; amostragem espacial; espaçamento entre as antenas; orientação do perfil e orientação das antenas que serão sucintamente descritos de acordo com Popini (2001) e Lima (2007).

A profundidade de alcance e a resolução são intimamente dependentes da frequência. Assim, a frequência da antena ou frequência central constitui o mais importante parâmetro a ser ajustado. Ela corresponde à frequência em torno da qual há maior concentração de energia dos pulsos. A maioria dos sistemas GPR usa uma banda ao invés de uma única frequência central. A frequência de amostragem f_a é obtida por meio da definição da frequência de Nyquist:

$$f_N = \frac{f_a}{2} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.25)$$

em que Δt é o intervalo de amostragem do tempo, ou seja, o intervalo em que novos sinais sejam amostrados.

A frequência de Nyquist representa o limite entre as frequências amostradas corretamente e aquelas que se apresentam em álias¹⁴, sob certo intervalo de tempo (ROSA, 2010).

O tempo que um pulso demanda entre a antena refletora e a receptora é chamado abertura da janela temporal T_W . Este parâmetro também é definido pela frequência de Nyquist:

$$T_W = \frac{n_s}{f_N} \cdot 1000 \quad (3.26)$$

dado em nanossegundos, em que n_s é o número de amostras no tempo.

A amostragem espacial é o intervalo entre as estações, que preferencialmente deve estar entre um quarto a meio comprimento de onda. A distância ideal entre as antenas, por sua vez, deve ser de cerca de 20% da profundidade estimada do alvo (ANNAN, 1992).

A orientação do perfil bem como das antenas são parâmetros que devem ser definidos de acordo com as características estimadas do alvo. É preferível que o perfil seja orientado perpendicularmente à direção do alvo. Ressalte-se que isso dificilmente é possível.

A orientação das antenas é geralmente perpendicular à do perfil, já que assim o campo elétrico gerado pelo pulso transmitido será transversal ao perfil, aumentando a área iluminada.

¹⁴Álias: caracterização de um sinal de alta frequência na forma de um evento de frequência mais baixa.

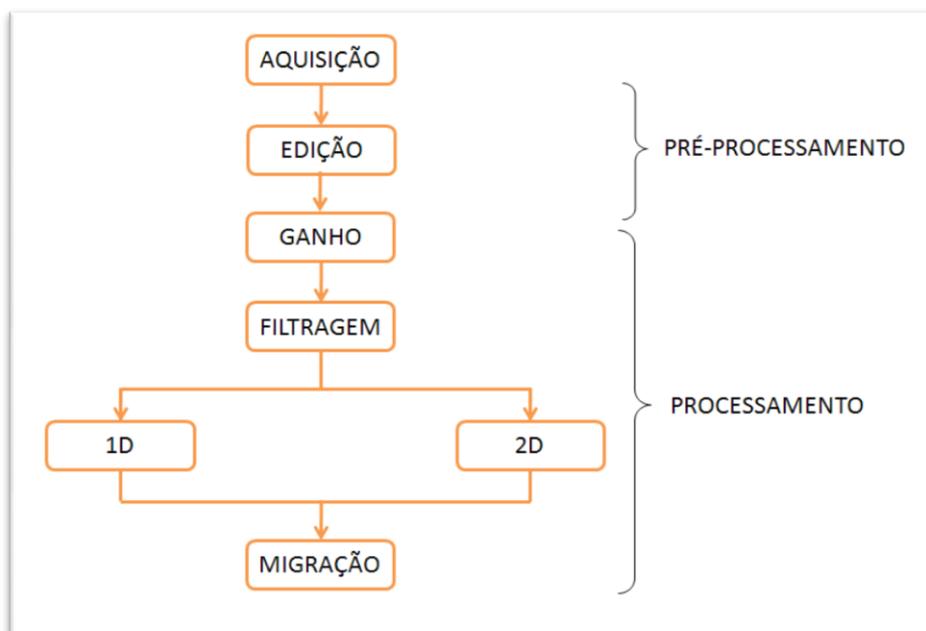
3.9 PROCESSAMENTO

O processamento dos dados GPR visa facilitar sua visualização e interpretação. Há muitas semelhanças entre o método sísmico de reflexão e o método GPR – salvo algumas exceções como a natureza da onda – de modo que muitas técnicas usadas no processamento sísmico podem ser adaptadas ao processamento de dados GPR. Dada a subjetividade das investigações geofísicas em geral, e não apenas do GPR, é importante lembrar que o processamento e todas as suas etapas devem ser feitos de acordo com o objetivo do trabalho. A Figura 3.2 apresenta um fluxograma com as etapas do processamento adotado neste trabalho, as quais coincidem com as etapas do processamento básico de Annan (1999).

Durante a aquisição, frequentemente é feita a visualização dos dados em tempo real e informações como a presença de possíveis refletores em superfície ou fontes de ruído como redes elétricas e tubulação devem ser especificadas (ANNAN, op. cit; AGUIAR, 2005).

Após a aquisição, os dados registrados passam pelo primeiro tratamento que é a edição. Nesta etapa é feita a reorganização dos dados para remover amplitudes anômalas e corrigir possíveis erros de amostragem do sinal; correção de cabeçalho (*header*), com inclusão ou atualização de informações de campo – topografia, identificação de fontes de ruído, quando disponíveis.

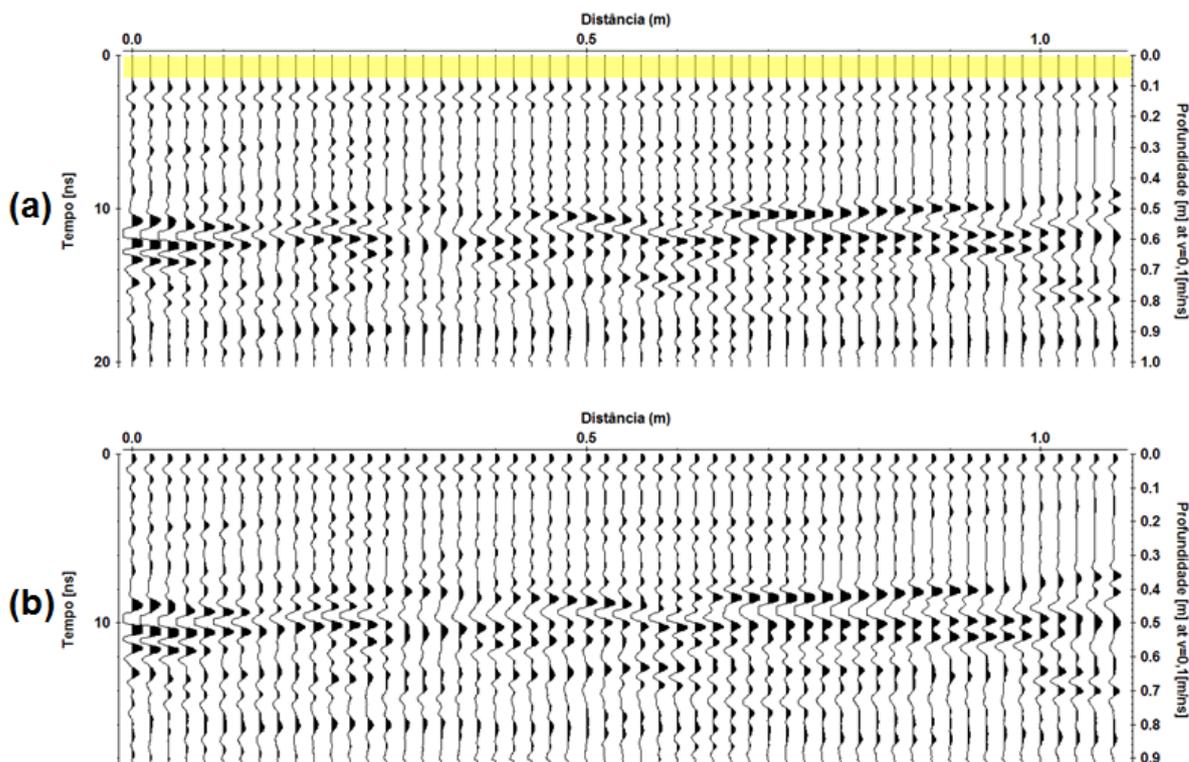
Figura 3.2 – Fluxograma com as etapas adotadas no processamento. A parte de aquisição é incluída no pré-processamento porque ainda no campo é possível fazer algumas modificações nos dados.



Essa etapa inclui também a correção estática ou correção do “tempo-zero”. Ela é feita para corrigir variações no primeiro registro da onda – correspondente à interface ar-superfície – causadas por instabilidade da antena durante a aquisição, como mau acoplamento da antena com a superfície, por exemplo (JOL, 2009). A correção estática coloca o primeiro registro dos traços em uma mesma posição, eliminando do traço a parte na qual não há registro (Figura 3.3).

O ganho é uma função usada para compensar perdas de amplitude nos dados, causadas pela atenuação da subsuperfície. Esta função age como um equalizador dos sinais registrados. Os tipos de ganhos mais comuns são o controle de ganho automático (*AutomaticGainControl*– AGC) e o ganho de compensação esférica e exponencial (*SphericalandExponentialCompensation* – SEC), conhecido também como ganho de decaimento de energia (ANNAN, 1999; POPINI, 2001; LIMA, 2007; JOL, op. cit.).

Figura 3.3 – Exemplo de radargrama (a) antes e (b) depois da correção estática. Parte hachurada de amarelo corresponde às partes dos traços removidos na correção estática.



No ganho AGC, as amplitudes dos traços são amplificadas ou atenuadas para um valor de amplitude média da janela temporal. O ganho SEC compensa a perda de energia na amplitude do sinal devido ao efeito de espalhamento geométrico da frente de onda (JOL, 2009). No ganho SEC simula-se a variação da amplitude do sinal quando este se propaga em subsuperfície, mantendo as relações entre as amplitudes verdadeiras (ANNAN, 1999; POPINI, 2001, LIMA,2007).

Os filtros são aplicados para remover dos dados efeitos indesejáveis como ruídos cultural, eletrônico ou operacional e melhorar a qualidade visual dos dados. Também são importantes para destacar feições auxiliando, dessa forma, na interpretação dos dados. Podem ser classificados em dois tipos: temporal (age em cada traço no tempo) e espaciais (agem em um número de traços na distância). Os dois tipos podem ser combinados para produzir filtros 2D que agem tanto no espaço quanto no tempo.

Os filtros básicos (1D) alteram os dados pela remoção, supressão ou realce de determinada frequência (ou faixa de frequência) ou de certo número de traços ou amostras (JOL, op. cit.). Os dois filtros usados no processamento dos

dados desse trabalho foram passa-banda (1D, filtro temporal) e remoção do *background* (2D, filtro espacial).

O filtro passa-banda (*band-passfrequency*) especifica uma região no espectro de frequência na qual abaixo e acima dela as frequências serão “zeradas” (Figura 3.4).

O filtro de remoção do *background* toma a média de todos os traços da seção e subtrai esse valor de cada traço. O filtro remove ruídos de *background* e do instrumento, mas pode remover refletores horizontais. O filtro é importante no processamento e interpretação de dados GPR relativos a ambientes de altas perdas, como ambientes úmidos, pois nestes o acoplamento antena-superfície e as camadas superficiais podem causar reverberações que se sobrepõem a outros eventos (JOL, 2009).

Um radargrama representa o registro dos dados de GPR no domínio espaço-tempo. A migração consiste em converter tais dados para o domínio espaço-profundidade (excetuando-se, obviamente, os casos de arranjos como o de transiluminação), corrigindo a posição, o mergulho e a profundidade dos refletores e eliminando os efeitos de difração (JOL, op. cit.).

A migração requer uma boa estimativa da velocidade de propagação na subsuperfície, de forma que a determinação deste valor é essencial para seu êxito. Existem vários tipos de migração – Kirchoff, Stolt, reversa no tempo, diferenças finitas – muitos dos quais originalmente sísmicos, mas aplicáveis a dados de GPR. No caso de dados GPR a migração tenta compensar variações na direção da antena (op. cit.).