



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DE GEORADAR (GPR) E RETROANÁLISES DE DEFLEXÕES
COMO SUPORTE A ANÁLISES PROBABILÍSTICAS DE
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS**

**DOUTORANDO: LUÍS ANSELMO DA SILVA
ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS
COORIENTADOR: WELITOM RODRIGUES BORGES**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-101/14**

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO/2014



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

USO DE GEORADAR (GPR) E RETROANÁLISES DE DEFLEXÕES COMO SUPORTE A ANÁLISES PROBABILÍSTICAS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

LUÍS ANSELMO DA SILVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR

APROVADA POR:

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS
(ORIENTADOR)**

**WELITOM RODRIGUES BORGES
(COORIENTADOR)**

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO ENC/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA ENC/UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUCIANO SOARES DA CUNHA, IG/UNB
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, DNIT
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO/2014

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, LUÍS ANSELMO.

Uso de Georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos (2014)

192 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2014)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. GPR 2. Pavimentos

3. Retroanálise

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, L. A. (2014). Uso de Georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos. Tese de Doutorado, Publicação Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luís Anselmo da Silva

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Uso de Georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos

GRAU / ANO: Doutor /2014

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Luís Anselmo da Silva

Avenida Presidente Médici, 388

Campo Velho - 78.065-250 – Cuiabá/MT - Brasil

fio14_2004@yahoo.com.br

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais. Eles me trouxeram a este mundo, impregnado das suas características espirituais e materiais. Deles eu herdei a vida, a educação, o caráter, a personalidade. A partir daí vieram as minhas filhas e os meus netos. Devo a eles, portanto, a minha vida e a vida das minhas filhas e de seus filhos, meus netos. Peço a Deus que os conserve com saúde enquanto viverem aqui neste mundo.

Obrigado Sr. Edne e Dna. Maria. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Em tudo o que faço Deus está presente. Na minha vida, no meu trabalho, junto à minha família. Este trabalho não teria sido realizado, sem a Sua presença. Acredito piamente no que diz o inconsciente coletivo: “Faça a sua parte, que Deus lhe ajudará.”. Agradeço, portanto, a Deus e ao Messias Meishu-Sama pela proteção, pela luz, pela inteligência, pela vontade e determinação; e principalmente pela permissão para concluir este trabalho no Plano Espiritual – estamos apenas materializando aqui, o que já foi realizado lá.

Aos meus pais, por acreditarem em mim a vida toda. Devo a eles tudo o que sou.

A minha esposa Monalisa Letúcia pela paciência, pela abnegação, pelo companheirismo, pelo crédito que me concedeu para que eu pudesse ausentar quando foi necessário e, principalmente, pelo amor que me dedicou quando eu deixava por vezes de acreditar que seria capaz de conseguir terminar este trabalho. Ao meu sogro João Lira e minha sogra Marci Barros pelo apoio.

As minhas filhas Maida, Tessa, Élide, Vanessa Emanuelle e Mábilly Victória que souberam entender tantas vezes, quantas eu tive que dizer “não” às suas necessidades porque estava me dedicando a este trabalho.

Aos meus netos Guilherme, Thaís, Ana Luísa, Eloísa e Beatriz que foram solicitados diversas vezes a silenciarem as suas brincadeiras durante os meus estudos e que tiveram paciência quando eu pedi muitas vezes para que esperassem um pouco, até eu concluir uma etapa deste trabalho para dar-lhes atenção.

Aos meus irmãos Edna Maria, Denise Maria, Antônio Carlos e Dometila e aos meus sobrinhos que me toleraram com as minhas rabugices durante esse período de estudo.

Ao meu orientador Professor Dr. Márcio Muniz de Farias por facilitar o acesso aos seus conhecimentos e compartilhá-los comigo sempre que precisei. A sua generosidade não me poupou de algumas chamadas de atenção, necessárias para o polimento dos fundamentos que nortearam o meu trabalho na área de pavimentos. A sua paciência em repetir, e repetir mais uma, duas, três vezes um conceito a qual me permitiu assimilar/aprender cada ensinamento, gradativamente até formar uma ideia mais completa sobre essa estrutura geotécnica e as suas peculiaridades. Sinceramente, muito obrigado professor Muniz.

Ao meu co-orientador Professor Dr. Welitom Rodrigues Borges que me acompanhou desde o meu trabalho de mestrado, me apresentando à geofísica. Nesse caminho nos tornamos amigos. Na sua companhia ampliei não só o meu conhecimento nessa área fantástica, como também o meu círculo de amizades. Tenho uma gratidão enorme por tudo o que aprendi com ele, por ter merecido a sua confiança e o seu respeito, e pela sua amizade: isso não tem preço. Aproveito para agradecer à Aline Silveira sua esposa, que me acolheu com amizade sincera e sempre se mostrou confiante na finalização deste trabalho. Muito obrigado, de coração Welitom e Aline.

Aos professores da UnB, Geotecnia professor Dr. Ennio Marques Palmeira, professor Dr. José Camapum de Carvalho, professor Dr. Wilson Conciani, professor Dr. Newton de Moreira de Souza, professor Dr. Renato, professor Dr. Manoel Porfírio, professora Dra. Edi

Guimarães, professor Dr. André Brasil Cavalcante que se dispuseram a vir até Cuiabá para compartilhar conosco dos seus conhecimentos durante a aquisição dos créditos do Dinter.

Aos professores Dra. Adalene, UnB – Instituto de Geociências e Dr. Fabian, Colômbia por terem me aceito nos cursos de Aerofotogrametria/Gamaespectrometria e de Hidrologia, respectivamente importantes para a minha formação na Geotecnia.

Aos professores da UnB - Instituto de Geociências, Dr. Luciano Soares da Cunha, Dr. Marcelo Peres Rocha, Dr. Marco Ianniruberto, Dra. Catarina Labourè Toletto, Dra. Tati de Almeida, dentre outros, pelo carinho que me concederam ao me acolherem no IG, fazendo-me sentir em casa durante a minha estada na UnB.

Aos alunos da UnB do curso de Geofísica, sem os quais não teria conseguido realizar os trabalhos de campo em Brasília e que me fizeram sentir mais jovem pelo tratamento despojado e acolhedor: Eduardo Xavier Seismits; Márcio M. Cavalcanti, Pedro Pedro Vencovsky Nogueira, Paulo, Karine Santos, Aline Isabel de Pádua, Isabela Resende, assim como o técnico Péricles sempre disposto e dedicado. Vocês são a minha família, em Brasília.

Aos amigos Gustavo de Assunção Mello, Luiz Roberto Cunha Freitas Junior e Joyce Fiori pelo carinho com que me trataram todas as vezes que estive em Brasília. É sempre gratificante saber que temos pessoas como vocês pra nos acolher, quando nos afastamos da nossa família.

A UnB que me acolheu durante os meus estudos. Agradeço a todos da Geotecnia, do Instituto de Geociências e do INFRALAB, locais onde peregrinei durante a minha estada em Brasília para estudar, ser orientado e desenvolver o meu trabalho. Agradeço também ao amigo Nonato pela atenção e pela acolhida nos Apartamentos de Trânsito da UnB, Colina.

Faço um agradecimento especial ao professor e colega Enio Fernandes Amorim por ter permitido que eu desenvolvesse o meu trabalho em sua área de estudo a Pista Experimental de Campo Verde (PECV), e ao seu orientador e professor da UnB, Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro.

Ao Engº Civil Ricardo Rausch por ter cedido a pista da Avenida Antártica, Cuiabá-MT, em construção sob sua gestão, para área de estudo deste trabalho. Agradeço à empresa Guaxe Encomind Engenharia Ltda. que permitiu o acompanhamento da construção do trecho referente à duplicação da pista Cuiabá-Sucurí, com aproximadamente 600 metros de extensão.

Agradeço com muito carinho os meus colegas de Dinter: Patrícia Mota Rausch, Márcio Antunes da Silva, João Manoel Michiati Farto, Luiz Carlos de Figueiredo, Suzana Dias Silva. Não há como esquecer os períodos de plena “ralação” durante a obtenção dos créditos exigidos pelo programa e pela nossa união durante os momentos que ficamos juntos em Brasília. Obrigado, Silvana Marchezini Fava por sua companhia, participação nos trabalhos e pela sua preciosa colaboração na formatação desta tese.

Aos professores Charles de Araújo e Osvaldo José de Oliveira do IFMT, Campus São Vicente, Unidade Campo Verde, aos alunos Lucas e Leandro, à secretária Ana Paula e ao vigilante Paulo pela cooperação nos trabalhos nessa área de estudo.

Ao professor Aluizio e os alunos do Curso de Agrimensura do IFMT pelo suporte que me deram nos trabalhos de Geodésia e de Topografia: Ary Guilherme, Frederico Gallón, Danilo Gonçalves, Willian Galindo, Fabrício Assis, Sthefani Figueiredo, Juliano Alves, Iury

Franco, Allan Thierry, Danyllo Amaral, Matheus Maciel, Nicolas Lúcio, João Victor, Liandra Gonzaga, André Torres, Willian Ederson, Lucas Jim, João Matheus.

Aos alunos dos cursos de Controle Tecnológico de Obras e de Edificações do IFMT que me acompanharam nos meus trabalhos em Cuiabá e em Campo Verde: Raquel dos Santos Santiago, Edilamar Roza Benites, Laura Dias do Carmo, Danielly Lima Santos, Kellen Fernanda Cebalho, João Medeiros Escola, Lucas Martins da Costa, Suélen Patrocínio Dias, Kárita Pereira Carvalho, Éder Almeida, Fábio Gomes, Rafaela Conceição Soares, Wilson Gomes de Siqueira, Everton Queiroz Moura, Luiz Ledur e Claudeir Santana, dentre outros. Aproveito para agradecer o aluno Danilo de Almeida Cruz que participou da extração dos núcleos da camada de revestimento da Pista da Avenida Antártica e que me ofereceu o seu artigo “Controle Tecnológico da Camada de Revestimento de CAUQ de Cuiabá: Análise das Propriedades” que escreveu com os colegas do IFMT Silvana Fava Marchezini e Luiz Carlos de Figueiredo.

Aos colegas Antônio Fernandes de Melo e Klauber Henry dos Reis por sua colaboração durante a aferição e a aquisição de dados com a viga Benkelman, em Cuiabá e em Campo Verde.

Agradeço a CAPES e ao CNPq pelo patrocínio concedido para a realização deste curso, Dinter IFMT/UnB.

Agradeço o IFMT – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso por ter firmado o convênio com a UnB – Universidade de Brasília permitindo que pudéssemos realizar esse Dinter. Nesta oportunidade desejo agradecer a todos os meus colegas servidores pelo apoio que me deram todas as vezes que precisei dos recursos administrados por eles.

Aos colegas Chefes de Departamento de Área de Eletro-eletrônica professor Ronan Marcelo Martins e da Área de Construção Civil, professora Ângela Santana de Oliveira, por terem tido o real entendimento das dificuldades que enfrentamos durante a realização dos nossos trabalhos, nos poupando, muitas vezes, de sobrecarga de trabalho no IFMT.

A todos os que, de forma direta ou indireta, participaram da minha vida nesse período que estive me dedicando na elaboração desta tese. Muito obrigado, sinceramente, a todos.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."

José Alencar

RESUMO

Neste trabalho o equipamento de Georadar ou radar de penetração de subsolo (GPR) é apresentado como um recurso para a investigação indireta das espessuras das camadas da estrutura de pavimentos flexíveis e rígidos. O GPR, após calibração com os procedimentos destrutivos tradicionais, oferece a método não destrutivo de visualização em subsuperfície das camadas da estrutura do pavimento, com rapidez na aquisição de dados, no processamento e na interpretação. O GPR foi aplicado a duas pistas experimentais de pavimentos rodoviários flexíveis, uma em Campo Verde (PECV) e outra em Cuiabá (PAA), Mato Grosso. O método também foi empregado em pavimentos rígidos, um na rodovia BR-101/NE e outro no pátio do aeroporto Santos Dumont (RJ). O trabalho realizado com esse método geofísico apontou grande variabilidade dos valores das espessuras das camadas de todos os pavimentos analisados. Os valores médios foram inseridos em um programa computacional, o Kenlayer, e forneceram informações sobre os módulos de resiliência das camadas constituintes dos pavimentos flexíveis, após um processo de retroanálise. Neste, o usuário busca iterativamente os parâmetros (módulos, neste caso) até fazer coincidir as bacias de deflexões superficiais teóricas com as de deflexões medidas com uma viga Benkelman. De posse das espessuras, obtidas com o GPR, e dos módulos de resiliência dos materiais obtidos na retroanálise, o programa Kenlayer é usado novamente para obter a deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento e a deformação de compressão no topo do subleito. Estas deformações são utilizadas, *a posteriori*, nas equações de desempenho prescritas pelo *Asphalt Institute*, que permitem estimar o número de passadas críticas para o consumo de fadiga do revestimento asfáltico e para as deformações permanentes do subleito. A resposta do pavimento calculada pelo programa Kenlayer fornece um valor determinístico de deformações, baseado na Teoria da Elasticidade para múltiplas camadas, a partir dos valores médios das espessuras e dos módulos. Entretanto, estas variáveis apresentam forte dispersão, o que justifica o uso de uma análise probabilística. Neste trabalho optou-se pela aplicação do Método FOSM, uma vez que este permite uma análise de sensibilidade de modo a verificar quais fatores têm maior influência na estimativa das grandezas de deformações e número de passadas permitidas nas camadas de revestimento e subleito. A investigação com GPR no pavimento rígido da BR-101/NE permitiu identificar a instalação inadequada das barras de ligação, indispensáveis para a estabilidade das placas. Verificou-se que, em apenas 5% das placas as barras de ligação estavam instaladas em número compatível com o seu projeto. As investigações com GPR foram ainda fundamentais para obtenção dos valores médios e das variâncias das espessuras das camadas dos quatro pavimentos investigados. Aliando-se estas informações às médias e variâncias dos módulos de resiliência obtidos nas retroanálises, foi possível inferir que o parâmetro mais relevante para a variância da deformação de tração no revestimento, e conseqüentemente na vida de fadiga desta camada, foi o módulo de resiliência da camada de base. As análises com o método FOSM permitiram ainda identificar que a variável mais relevante para as deformações de compressão no topo do subleito é a espessura da camada de base, seguida do módulo de resiliência do próprio subleito. Os resultados aqui obtidos apontam inequivocamente para a necessidade de maior controle construtivo com relação às espessuras das camadas do pavimento e, principalmente para o controle de compactação rigoroso de modo a obter os módulos de rigidez adequados ao projeto. Como alternativa ou complementação ao controle topográfico, o uso de GPR se mostrou extremamente eficiente na identificação das espessuras das camadas, quando há diferenças claras entre os materiais, como no caso de pavimentos rígidos. Entretanto, para pavimentos flexíveis que usam materiais granulares de origem semelhante, a identificação não é tão clara

e só foi possível com a introdução de refletores metálicos nas interfaces das camadas durante o processo construtivo. O uso de análise probabilística com o método FOSM também se mostrou bastante promissor, mas deve-se atentar para outras variáveis aleatórias relativas ao ambiente e ao tráfego, bem como a necessidade de melhores modelos de desempenho que incorporem a influência destes fatores.

Palavras-chaves: GPR. Pavimentos. Retroanálises.

ABSTRACT

The Ground Penetrating Radar (GPR) or Georadar is used in this thesis as an indirect surveillance tool to determine the thickness of layers of flexible and rigid pavements. After an adequate calibration using traditional trench opening procedures, the GPR provides a non-destructive means to obtain subsurface data, which can be swiftly processed and interpreted. GPR was applied to survey two experimental flexible pavement segments; one in Campo Verde (PECV), and the other in Cuiabá (PAA), both in Mato Grosso State, Brazil. The GPR was also applied to rigid pavements in the Federal Highway BR-101 (NE) and at the airplane parking area of Santos Dumont airport (RJ). The results show high variance of the thicknesses of layers for all pavements analyzed. The mean thickness values were used as input for a computational code, named Kenlayer, which can be used to estimate the moduli of resilience of each layer, with the aid of a back analyses procedure. In this case, the user must interactively search for the set of layer moduli which yields analytical surface deflections that best fit the experimental deflections obtained in field using the Benkelman beam method. After acquisition of the layers' thicknesses using the GPR and the estimates of moduli using the back analysis with Kenlayer, this program is run once more to determine the values of the maximum tensile strain acting in the lower fiber of the asphalt course layer and the maximum value of compressive strain acting at the top of the subgrade layer. These strains values are used, a posteriori, to estimate the critical number of passes of an equivalent single axis load that leads to fatigue failure of the surface course and excessive permanent deformation of the subgrade, using performance models proposed by the Asphalt Institute. The mechanist pavement analyses using Kenlayer give deterministic values of strains, based on the Theory of Elasticity for multiple layers. The analyses take as input the traffic load and the mean values of layer thickness and moduli; however these variables show high dispersion what justifies the use of probabilistic methods. Here the author chose to use the FOSM (First Order Second Moment) method, because it provides a means of sensitivity analyses to investigate which independent variables has greater influence on the output values of strains and critical number of load passes. The field surveillance using GPR along highway BR-101/NE clearly indicated the inadequate installation of the dowel bars in the rigid Portland concrete plates. It was verified that only 5% of the plates had the bars installed according to the design recommendations. Furthermore the GPR data was very important to determine the as built thicknesses of the pavement layers. The FOSM analysis using the information of mean values of thicknesses and their variance, together with the mean values and variance of the moduli, allowed to determine that the value of the modulus of resilience of the base layer was the most relevant single parameter for the determination of the tensile strain, and therefore the fatigue life of the surface course, in all cases investigated. The FOSM analysis also identified the modulus of resilience of the subgrade, as the most relevant parameter for the accumulated permanent strain of this layer. The results presented in this thesis unequivocally demonstrate the importance of a rigorous control of the constructive process of the pavement structure, mainly with respect to the topographical control of the layer thicknesses and a more rigid control of the compaction procedure, which ultimately determine the moduli of the constructed layers. The GPR could effectively determine the thicknesses of the layers of rigid pavements, due to the great difference in their electrical properties. However, this identification is not clear in the case of granular materials with similar properties, such as used in the case of the flexible pavements analyzed, but the identification was possible with the introduction of metallic reflectors in the interface of the layers during construction. Finally the use of probabilistic analyses using FOSM was effective, but attention must be paid

to other random variables such as climate and traffic load, and better performance models should be investigated to include the effect of these factors in the ultimate life of the pavement.

Keywords: GPR. Pavements. Back analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Gráfico ilustrando o investimento federal/PIB(%) em infraestrutura de transportes no período de 1975 a 2012.....	5
Figura 3.1 - Espectro eletromagnético com enfoque na faixa de operação dos sistemas de GPR	27
Figura 3.2 - Representação vetorial da propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre	28
Figura 3.3 - Componentes principais de uma onda eletromagnética.....	29
Figura 3.4 - Diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR.....	34
Figura 3.5 - (a) Aquisição de dados no modo <i>common offset</i> e (b) traços de GPR mostrando a chegada das ondas nas interfaces.....	35
Figura 3.6 - Representação gráfica de aquisições de GPR do tipo sondagem de velocidade: CMP e (b) WARR	35
Figura 3.7 - Esquema de transluminação (a) <i>common offset</i> ; (b) tomografia direta; (c) <i>Vertical radar profiling</i> ; (d) transluminação variável.....	36
Figura 3.8 - (A) Esquema de funcionamento de uma antena não blindada. (B) registro fotográfico de uma antena não blindada de 80MHz em operação	37
Figura 3.9 - (A) Esquema de funcionamento de uma antena blindada (B) Fotografia de uma antena blindada de 900MHz	37
Figura 3.10 - Detalhe de um pulso teoricamente irradiado e sua respectiva faixa de distribuição de frequência entre 0,5 a 1,5 vezes a frequência central da antena	38
Figura 3.11 - Pulsos de GPR com respectivas representações gráficas dos intervalos de amostragem vertical ou temporal (Δt) e amostragem horizontal ou espacial (Δx).....	39
Figura 3.12 - Representação esquemática do cone de dispersão de energia do sinal de GPR	40
Figura 3.13 - Esquema da seção transversal de um pavimento	42
Figura 3.14 - Largura e comprimentos recomendados para placas de pavimento rígido Localização das barras de ligação (junta longitudinal) e das barras de transferência (junta transversal) nas placas de concreto do pavimento.....	43
Figura 3.15 - Fluxograma ilustrando o roteiro para a realização do dimensionamento mecânico de um pavimento	48
Figura 3.16 - (A) Carga aplicada na superfície de um pavimento pela ação do pneu de um veículo (B) Carga concentrada num ponto sobre a superfície (coordenadas retangulares)....	49
Figura 3.17 - Coeficiente de Empuxo aplicado para determinar as tensões nas direções horizontais	50
Figura 3.18 - Carga concentrada num ponto sobre a superfície (coordenadas retangulares)..	50
Figura 3.19 - Estrutura de um pavimento constituído de múltiplas camadas.....	52

Figura 3.20 - Esquema da Retroanálise de um pavimento, indicando os dados inseridos - conjunto de módulos (E_k, ν_k) estimados e espessuras das camadas (h_1, h_2, h_3) e a ilustração da busca pelo ajuste das bacias medida e calculada.....	53
Figura 3.21 - Variabilidade dos parâmetros de cálculo na Análise Probabilística do comportamento de pavimento	58
Figura 4.1 - Croqui com a localização da PECV, no Campus São Vicente do IFMT, Campo Verde/MT	62
Figura 4.2 - Foto panorâmica evidencia a PECV, no Campus São Vicente do IFMT, Campo Verde/MT	62
Figura 4.3 - Croqui da estrutura do pavimento da PECV - corte e planta, ilustrando os três trechos construídos com estruturas específicas para cada segmento.....	63
Figura 4.4 - Curvas granulométricas do solo da camada de subleito	66
Figura 4.5 - Curvas granulométricas do solo laterítico da camada de base (AMORIM, 2013)	67
Figura 4.6 - Curvas granulométricas para as misturas de solo + RCD.....	68
Figura 4.7 - Croqui de localização dos pontos de aquisição de dados da pista durante os ensaios com Viga Benkelman.....	70
Figura 4.8 - Bacias deflectométricas obtidas no trecho de base constituída de solo laterítico puro, nos três Sentidos 1, 2 e 3	71
Figura 4.9 - Bacias deflectométricas obtidas no trecho de base constituída de solo laterítico puro e sub-base constituída de uma mistura de solo+RCD, nos três sentidos	71
Figura 4.10 - Bacias deflectométricas obtidas no trecho de base constituída de uma mistura com 75% de solo laterítico e 25% de RCD, nos 3 Sentidos.....	72
Figura 4.11 - Fotos ilustram a implantação de vergalhões e placas de aço no pavimento de Campo Verde. (a) vergalhões sobre o subleito; (b) placas de aço sobre o subleito; (c) e (d) vergalhões sobre a camada de base imprimada	74
Figura 4.12 - Croqui com a localização das barras (vergalhões) e das placas de aço instaladas entre as camadas do pavimento da Pista Experimental de Campo Verde.....	74
Figura 4.13 - Fotos ilustram a aquisição de dados de GPR, com o sistema SIR 3000 acoplado a uma antena blindada de 900 MHz	75
Figura 4.14 - Croqui com a localização dos perfis de GPR adquiridos ao longo da Pista Experimental de Campo Verde.....	75
Figura 4.15 - Fluxograma de processamento dos perfis de GPR	77
Figura 4.16 - Parte de um radargrama com ênfase nas hipérboles relacionadas a barras de aço dispostas nas interfaces das camadas dos pavimentos. Na esquerda o traço no local da hipérbole relacionada a barra de aço disposta na interface revestimento/base, e na direita o traço sobreposto a hipérbole relacionada a barra de aço disposta na interface base/subleito .	78
Figura 4.17 - Croqui ilustrando a localização onde foram adquiridos os dados do ensaio com viga Benkelman em março/2014	79
Figura 4.18 - Ilustração da página inicial do Programa KENLAYER (HUANG, 2004), Versão 2003	80

Figura 4.19 - Fluxograma de Retroanálise	81
Figura 4.20 - Programa Kenlayer (Huang, 2004). Janela inicial do programa destinada a escola das janelas que permitirão a parametrização do programa para a retroanálise e a análise de danos do pavimento	81
Figura 4.21 - Programa Kenlayer (Huang, 2004). Janela do programa em uso, destinada a caracterizar o pavimento a ser retroanalísado e que permite a opção por realizar a análise de dano	82
Figura 4.22 - Programa Kenlayer (Huang, 2004). Janela do programa com os dados inseridos, destinada a caracterizar a carga vertical aplicada e as coordenadas dos pontos onde se deseja obter os deslocamentos verticais no revestimento.....	83
Figura 4.23 - Dados fornecidos para o programa KENPAVE para as coordenadas dos locais onde se deseja obter os deslocamentos verticais referidos à bacia de deflexão calculada	85
Figura 4.24 - Imagem de satélite do trecho de 660 metros de extensão da pista da Avenida Antártica, em fase de construção entre as estacas 98 (Lat. 15°33'31,04"S; Lon.56°8'18,20"O) e 131 (Lat. 15°33'17,69"S; Lon.56°8'37,14"O) compreendendo a área de estudo.....	87
Figura 4.25 - Folhelhos de filito encontrado durante os trabalhos de regularização da área (a) e o reforço de subleito compactado sobre o solo regularizado(b).....	88
Figura 4.26 - (a) e (d) Topografia primitiva (linha preta) e projetada (linha vermelha) da pista da Avenida Antártica com a indicação da numeração das estacas; (b) fotografia da camada de reforço de subleito compactada e o material para a camada de base/sub-base esperando para ser espalhado, como em (c)	89
Figura 4.27 - Localização dos pontos amostrados por extração de núcleos de revestimento, com relação às estacas; (A) fotografia evidencia a extração de um núcleo de revestimento .	90
Figura 4.28 - (a) Detalhe do momento da aferição da viga Benkelman; (b) Ensaio com a viga na margem esquerda da pista e; (c) ensaio na margem direita da pista da Avenida Antártica	91
Figura 4.29 - Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de viga Benkelman nas primeiras estacas - Sentido 1, estacas pares; Sentido 2, estacas ímpares.....	92
Figura 4.30 - (a) Placa de aço usada como referência entre os contatos das camadas da estrutura do pavimento da Avenida Antártica, em Cuiabá-MT, para produzir um refletor hiperbólico no perfil de GPR e identificar essas interfaces entre as camadas; (b) Dimensões das placas de aço.....	94
Figura 4.31 - Localização das placas instaladas nas interfaces das camadas da estrutura da pista - (a) No lado esquerdo - sentido Cuiabá/Sucuri (b) Na interface das camadas de reforço de subleito e base e (c) No lado direito da pista - sentido Cuiabá/Sucuri	94
Figura 4.32 - Localização das placas de aço	94
Figura 4.34 - Fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR, com o equipamento SIR3000 e uma antena blindada de 900MHz, ao longo da pista da Avenida Antártica.....	97
Figura 4.35 - Aquisição de dados com equipamento SIR3000/GSSI, com antena blindada de 900MHz - (a) perfis curtos e paralelos no sentido longitudinal à pista (b) perfis curtos em malha nos sentidos longitudinal e transversal da pista.	98
Figura 4.36 - Aquisição de dados com equipamento SIR3000/GSSI, com antena blindada de 900 MHz (a) Equipamento: módulo de controle e antena (b) Antena posicionada para adquirir dados no sentido longitudinal da pista (c) Antena posicionada para adquirir dados no sentido	

transversal da pista (d) Aquisição de dados no sentido longitudinal da pista (e) Aquisição de dados no sentido transversal da pista.....	98
Figura 4.37 - Croqui com a localização dos perfis de GPR adquiridos ao longo do pavimento da PAA	100
Figura 4.38 - Fluxograma de processamento dos perfis de GPR, Avenida Antártica.....	101
Figura 4.39 - Lotes 7 e 8 da Rodovia BR-101/ NE, em Pernambuco	105
Figura 4.40 - Croqui mostrando o posicionamento das barras de ligação (barras de aço) dentro do pavimento rígido da BR-101, conforme consta no Projeto Construtivo	106
Figura 4.41 - Croqui do posicionamento dos perfis de GPR realizados nas faixas de rolamento da BR-101/NE	106
Figura 4.42 - Aquisição de dados na pista de rolamento da BR-101/NE com o equipamento SIR 3000, conectado a antena blindada de 900 MHz.....	107
Figura 4.43 - Placas destruídas com o objetivo de adquirir os dados reais de espessura das placas e localização das barras de ligação para calibração do Método GPR	108
Figura 4.44 - O registro fotográfico é da trincheira aberta para fins de calibração da velocidade de propagação da onda eletromagnética no pavimento rígido da BR101	108
Figura 4.45 - Fluxograma com as etapas de processamento dos perfis de GPR.....	109
Figura 4.46 - Representação dos perfis GPR realizados na BR 101 NE - sentido Recife-Maceió: Perfil FILE_009 na interface das placas da Faixa de Segurança (FS) e das placas da faixa de rolamento (seta cor vermelha); Perfil FILE_010 na interface das placas de rolamento (seta cor cinza).....	110
Figura 4.47 - Croqui com a localização do perfil 2 (linha vermelha) de GPR adquirido e de três poços de sondagem perfurados no pátio de manobras de aeronaves do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro/RJ.....	111
Figura 5.1 - Padrões de reflexão encontrados no pavimento da PECV.....	113
Figura 5.2 - Registros fotográficos (a) e (b) de uma trincheira aberta próximo da estaca de 50m e obtenção dos valores medidos de H_b e H_r que se destinam à calibração do método; (c) do perfil do radargrama associado a esse trecho do pavimento e, em destaque, os refletores hiperbólicos referidos aos vergalhões de ferro enterrados	114
Figura 5.4 - Perfil de GPR do pavimento da PECV com modelo de camadas.....	118
Figura 5.5 - Interpolação dos valores de espessura do revestimento (H_r), para o pavimento de Campo Verde.....	119
Figura 5.6 - Interpolação dos valores de espessura de base (H_b), para o pavimento de Campo Verde	119
Figura 5.7 - Modelo quase-3D dos perfis de GPR para o pavimento da PECV, com slice na interface revestimento/base	121
Figura 5.8 - Modelo quase-3D dos perfis de GPR para o pavimento da PECV, com slice na interface base/subleito	122
Figura 5.9 - Sentidos 1 e 2 de aquisição de dados com viga Benkelman.....	123
Figura 5.10 - Gráfico das curvas de deflexão médias para o Trecho 1 da PECV	124
Figura 5.11 - Gráfico das curvas de deflexão médias para o Trecho 2 da PECV	126

Figura 5.12 - Gráfico das curvas de deflexão médias para o Trecho 3 da PECV	127
Figura 5.13 - Gráfico representando o melhor ajuste das bacias deflectométricas medida e calculada para a PECV, Trecho 1	129
Figura 5.14 - Gráfico da influência das variáveis aleatórias, sobre o valor da deformação de tração na base da camada de revestimento do pavimento da PECV com o Método FOSM	133
Figura 5.15 - Gráfico da influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da deformação de compressão no topo da camada de subleito do pavimento da PECV, Trecho 1, com incremento centrado de $\pm 10\%$, com o Método FOSM	135
Figura 5.17 - Gráfico da influência das variáveis aleatórias sobre o número de passadas permitidas para a camada do subleito do pavimento da PECV, Trecho 1.....	138
Figura 5.18 - Padrões de reflexão encontrados no pavimento da PAA.....	143
Figura 5.19 - Identificação das interfaces das camadas pela presença dos refletores hiperbólicos nos perfis associados às placas de aço implantadas no pavimento da PAA.....	144
Figura 5.20 Perfis paralelos de 1,2m de comprimento e distantes entre si de 0,1m, na Estaca 103, adquiridos na PAA, no lado esquerdo da pista, do centro para a borda, no sentido Sucuri-Cuiabá.....	145
Figura 5.21 - Imagens da extração do núcleo de revestimento na estaca 103 e perfil de GPR da estaca 105 com destaque para os refletores hiperbólicos e planos	146
Figura 5.22 - Perfis curtos de GPR adquiridos na direção da estaca 108 (a) Pick sobre a hipérbole da interface revestimento/. (b) Pick sobre a hipérbole da interface base/sub-base.	146
Figura 5.23 - Perfil de GPR adquirido na direção longitudinal do pavimento da PAA, entre as estacas 98 e 115, com 320 m de comprimento	149
Figura 5.24 - Processamento Quase-3D dados de perfis GPR adquiridos na direção transversal do pavimento da PAA no local da Estaca 108	150
Figura 5.25 - Perfil de GPR adquirido na direção transversal do pavimento da PAA na direção da estaca 108	
Figura 5.26 - Processamento dos dados do perfil de GPR adquiridos na direção transversal do pavimento da PAA no local da Estaca 108 no programa SURFER que gerou imagens de iso-espessuras das camadas	152
Figura 5.27 - Ilustração com a localização dos pontos de aquisição de dados com viga Benkelman, destacando os Sentidos 1 e 2 para realização dos ensaios.....	153
Figura 5.28 - Gráfico das curvas de deflexão médias obtidas a partir dos dados adquiridos nos Sentidos 1 e 2 e curva da deflexão média dos dados obtidos nos dois sentidos, S1 e S2 da PAA	154
Figura 5.29 - Bacias deflectométricas medida e calculada para o PAA.....	157
Figura 5.31 - Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância da deformação de compressão no topo da camada de subleito do pavimento da Avenida Antártica, com incremento centrado de $\pm 10\%$, pelo Método FOSM.....	162

Figura 5.32 - Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância do número de passadas permitidas para a camada de revestimento do pavimento da Avenida Antártica, com incremento em avanço, em atraso e centrado de 10%, pelo Método FOSM	163
Figura 5.33 - Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância do número de passadas permitidas para a camada do subleito do pavimento da PAA, com incremento em avanço, em atraso e centrado de 10%, pelo Método FOSM.....	165
Figure 5.34 - Gráfico com as espessuras de concreto e macadame, medidas com o GPR e planejadas no projeto, em um trecho da BR-101/NE	166
Figura 5.35 - (a) radargrama de GPR obtido em uma área onde o número e a posição das barras de ligação estavam corretos; (b) detalhe das camadas do solo (base de macadame e subleito) da seção anterior (a); (c) radargrama de GPR obtidos em uma área onde o número e a posição das barras de ligação estão incorretos; (d) detalhe das camadas do solo (base de macadame e subleito) da seção anterior (c).....	167
Figura 5.36 - Porcentagem de placas com número de barras de ligação.(11 * = barras de ligação de acordo com o projeto; 11 ** = barras de ligação em desacordo com o projeto)..	168
Figura 5.37 - Croqui com a localização dos perfis de GPR adquiridos no pátio de manobras de aeronaves do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro/RJ, e dos furos de sondagem perfurados nos locais indicados. A linha cor verde indica o perfil adquirido e processado cujos dados estão comentados neste trabalho	169
Figura 5.38 - (a) Seção de GPR Perfil 2b com os principais refletores identificados. (b) Modelo geotécnico interpretado com a seção GPR e correlação com o poço TR 02.....	169
Figura 5.39 - (a) Seção de GPR Perfil 2d com os principais refletores identificados. (b) Modelo geotécnico interpretado com a seção GPR e correlação com o poço TR 03.....	170
Figura 5.40 - (a) Seção de GPR Perfil 2e com os principais refletores identificados. (b) Modelo geotécnico interpretado com a seção GPR e correlação com o poço TR 04.....	171
Figura 5.41 - Gráfico com as espessuras de concreto e macadame, medidas com o GPR e obtidas diretamente em furos de sondagem, na área do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro-RJ	172

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1.1 - Classificação das rodovias brasileiras (ESTADO GERAL) pesquisadas pelo CNT, 2013	3
Tabela 1.2 - Classificação das rodovias brasileiras (PAVIMENTO) pesquisadas pelo CNT, 2013	3
Tabela 1.3 - Classificação dos pavimentos (ESTADO GERAL), pesquisados pelo CNT, 2013	3
Tabela 1.4 - Classificação do estado geral do revestimento dos pavimentos pesquisados pelo CNT, 2013	4
Quadro 2.1 - Trabalhos publicados a partir da década de 90, que relacionam o Método GPR à pesquisa em estrutura de pavimentos	11
Quadro 2.2 - Trabalhos relacionados a pavimentos flexíveis realizados até a década de 60 (MONISMITH, 2012)	19
Tabela 3.1 - Permissividades dielétricas (parte real, $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2$), impedâncias (Z_1, Z_2) e coeficiente de reflexão (R_{GPR}) de camadas típicas de pavimentos (Dados extraídos de GORDON, 1998; e ANNAN, 1992)	33
Tabela 3.2 - Intervalos de velocidades de propagação da onda eletromagnética em alguns materiais constituintes de camadas de pavimentos (DANIELS, 1996; GONÇALVES e CERATTI, 1998)	34
Tabela 3.3- Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração (ANNAN, 1992; PORSANI, 1999)	38
Tabela 3.4 - Comprimento de onda de sinais de GPR em função da permissividade dielétrica relativa ε'_r do meio e da frequência central da antena (CONYERS, 2004)	40
Tabela 4.1 - Valores de γ_s, w_L, w_p e IP para a camada de subleito (AMORIM, 2013)	65
Tabela 4.2 - Parâmetros de compactação e CBR do solo da camada de subleito (AMORIM, 2013)	65
Tabela 4.3 - Valores de γ_s, w_L, w_p e IP para o solo laterítico da camada de base (AMORIM, 2013)	66
Tabela 4.4 - Parâmetros de compactação e CBR do solo laterítico da camada de base (AMORIM, 2013)	66
Tabela 4.5 - Valores de γ_s, w_L, w_p e IP para as misturas de solo + RCD (AMORIM, 2013) ..	67
Tabela 4.6 - Parâmetros de compactação e CBR para as misturas de solo + RCD (AMORIM, 2013)	68
Tabela 4.7 - Valores de Módulos de Resiliência obtidos a partir de ensaio triaxial dinâmico para os materiais de base do pavimento de Campo Verde (AMORIM, 2013)	69
Tabela 5.1 - Valores de velocidade obtidos com o ajuste de tempo x profundidade nos perfis de GPR para a PECV	114

Tabela 5.2a - Variabilidade dos valores de espessura para a camada de revestimento extraídos dos perfis de GPR do pavimento do pavimento da PECV	116
Tabela 5.2b - Variabilidade dos valores de espessura para a camada de base extraídos dos perfis de GPR do pavimento do pavimento de Campo Verde.....	116
Tabela 5.3 - Informações sobre os valores de espessura para a camada de revestimento e base extraídos dos perfis de GPR do pavimento do pavimento da PECV	117
Tabela 5.4 - Tabela com os valores médios das deflexões D0 a D150, para as aquisições de dados nos Sentidos 1 e 2, Trecho 1 da pista	124
Tabela 5.5 - Tabela com os valores médios das deflexões D0 a D150 (em 10^{-2} mm), para as aquisições de dados nos Sentidos 1 e 2, Trecho 2 da pista.....	125
Tabela 5.6 - Tabela com os valores médios das deflexões D0 a D150, para as aquisições de dados nos Sentidos 1 e 2, Trecho 3 da pista	127
Tabela 5.7 - Valores obtidos para as bacias de deflexão medida e calculada e para as diferenças verificadas para o ajuste das referidas bacias da PECV, Trecho 1	129
Tabela 5.8 - Valores inseridos no programa KENLAYER para o processamento da retroanálise da PECV.....	130
Tabela 5.10 - Dados complementares inseridos no programa KENLAYER para o processamento da análise de danos do pavimento da PECV.....	131
Tabela 5.11 - Dados necessários para a análise probabilística do pavimento da PECV - aplicação do Método FOSM - Trecho 1	132
Tabela 5.12 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento.....	133
Tabela 5.13 - Dados da análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento	133
Tabela 5.14 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV para o parâmetro deformação de compressão no topo da camada de subleito.....	135
Tabela 5.15 - Dados da análise probabilística do pavimento da PECV para a deformação de compressão no topo da camada do subleito	135
Tabela 5.16 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento.....	136
Tabela 5.17- Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%	136
Tabela 5.18 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito.....	137
Tabela 5.19 - Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%	138

Tabela 5.20 - Valores dos resultados dos ensaios de compactação (NBR 7182/86) e ISC/CBR (NBR9895/87) dos solos usados nas camadas de sub-base e base da estrutura da PAA	141
Tabela 5.21 - Dados de teor de betume, grau de compactação, granulometria, espessura da camada e parâmetros físicos como porcentagem de vazios (%Vv), relação betume vazios (%RBV) obtidos por ensaios de laboratório e de campo da PAA.....	142
Tabela 5.22 - Valores comparativos de espessuras entre os medidos nos furos e os calculados nos perfis de GPR. Valores de tempo e velocidade calculados.....	147
Tabela 5.23 - Valores de espessura e tempo para os perfis de GPR nas interfaces regularização do subleito e subleito da avenida Antártica, estimativa indireta	147
Tabela 5.24 - Dados da estrutura do pavimento da PAA	148
Tabela 5.25 - Média das deflexões obtidas nos dois sentidos de aquisição de dados, S1 e S2, representando a bacia de deflexão média da PAA	154
Tabela 5.26 - Valores fornecidos para o programa KENLAYER para o processamento da retroanálise do pavimento de Campo Verde	155
Tabela 5.27 - Valores encontrados para as bacias de deflexão medida e calculada e para as diferenças verificadas para o ajuste das referidas bacias para a PAA	156
Tabela 5.28 - Dados complementares fornecidos para o programa KENLAYER para o processamento da análise de danos do pavimento de Campo Verde	157
Tabela 5.46 - Dados necessários para a análise probabilística do pavimento da Avenida Antártica - aplicação do Método F.O.S.M	159
Tabela 5.29 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento.....	159
Tabela 5.30 - Dados da análise probabilística do pavimento da PAA, para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento	159
Tabela 5.31 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro deformação de compressão no topo da camada de subleito.....	161
Tabela 5.32 - Dados da análise probabilística do pavimento da PAA para a deformação de compressão no topo da camada do subleito	161
Tabela 5.33 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento	163
Tabela 5.34 - Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PECV para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%	163
Tabela 5.35 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito	164
Tabela 5.36 - Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%	164

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIATURAS

A	Amplitude
A/m	Ampère por metro
A/m ²	Ampère por metro quadrado
AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
\vec{B}	Campo indução magnética
BCI	Índice de curvatura da base
BDI	Índice de danos à base
BWG	Birmingham <i>wire gauge</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
c	velocidade da luz
CMP	<i>Common Mid Point</i>
CNT	Confederação Nacional de Transporte
cm	Centímetro
\vec{D}	Corrente de deslocamento
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagens
DCP	Penetração de cone dinâmico
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
D ₀	Deflexão máxima recuperável
\vec{E}	Vetor campo elétrico
E ₀	Módulo elástico inicial
E	Módulo elástico sob o invariante de tensão
EM	Onda eletromagnética
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
f	Frequência
f _c	Frequência central da antena
f _{máx}	Frequência máxima registrada
F/m	Farads por metro
FORM	Método de confiabilidade de primeira ordem
F.O.S.M.	<i>First Order, Second Moment</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GHz	Giga Hertz
GPR	Ground Penetrating Radar
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSSI	Geophysical Survey Systems
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>

H	Espessura do meio
\vec{H}	Vetor campo magnético
h_0	Altura inicial de referência do corpo-de-prova
H_r	Espessura da camada de revestimento
H_b	Espessura da camada de base
H_{sb}	Espessura da camada de sub-base
H_{rsl}	Espessura da camada de regularização de subleito
Hz	Hertz
IDS	<i>Ingegneria Dei Sistemi</i>
I_I	Invariante de tensão
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFMT	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
\vec{j}	Densidade de corrente de condução
km/h	Quilômetro por hora
k_1, k_2, k_3	Constantes determinadas experimentalmente
kPa	Quilo Pascal
K_0	Coefficiente de empuxo no repouso
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
ME	Mecanicista-empírica
MHz	Mega Hertz
mm	Milímetro
m	Metro
m/ms	Metros por mili-segundos
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de resiliência
mS/s	Mili-Siemens por segundo
$M_{r(R)}$	Módulo de resiliência da camada de revestimento
$M_{r(B)}$	Módulo de resiliência da camada de base
$M_{r(SB)}$	Módulo de resiliência da camada de sub-base
$M_{r(RSL)}$	Módulo de resiliência da camada de reforço de subleito
$M_{r(SL)}$	Módulo de resiliência da camada de subleito
MT	Mato Grosso
N_f	Número de Nyquist
N_{fi}	Número de repetições de carga
n_{pi}	Número de repetições previstas da carga na vida de projeto
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
P_i	Número de ciclos previstos para cada carga
PAA	Pista da Avenida Antártica
PECV	Pista Experimental de Campo Verde
PIB	Produto Interno Bruto

PMF	Pré-misturado a frio
Q	Carga vertical
R, r	Distâncias
R	Raio de curvatura
RBV	Relação betume vazios
R_{GPR}	Coefficiente de reflexão
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SCI	Índice de curvatura da superfície
SENAT	Serviço Social de Transporte Serviço Nacional de Aprendizagem de Transporte
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SORM	Método de confiabilidade de segunda ordem
S1/S2	Sentido1/Sentido 2
S/m	Siemens por metro
t	Tempo
T	Período da onda
$T_{máx}$	Período máximo amostrado
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USACE	<i>Army Corps of Engineers</i>
v	Velocidade
VL	Valor
V/m	Volt por metro
VRP	<i>Vertical radar profiling</i>
Vv	Volume de vazios
ω	Velocidade angular
WARR	<i>Wide Angle Reflection and Refraction</i>
WASHO	<i>Western Association of State Highway Officials</i>
Z	Impedância
%	Por cento
\approx	Aproximadamente
λ	Comprimento da onda
$\vec{\nabla}$	Operador diferencial gradiente
$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$	Corrente de deslocamento
σ	Condutividade elétrica
ϵ	Permissividade elétrica absoluta do material
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
ϵ_r , K	Permissividade elétrica relativa do material (constante dielétrica)
μ	Permeabilidade magnética do material
μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre
α	Atenuação
β	Constante de propagação no meio

ε_r'	Permissividade dielétrica relativa do material (parte real)
σ_0	Condutividade em corrente contínua
Δt	Largura da banda, resolução vertical (amostragem vertical ou temporal)
Δx	Resolução lateral, amostragem espacial
α	Coefficiente de atenuação
σ	Compressão
τ	Cisalhamento
σ_0	Tensão inicial
σ_l	Tensão no subleito
σ_t	Tensão de tração na fibra inferior do revestimento
σ_d	Tensão de desvio variável
σ_3	Tensão confinante
ε_1	Deformação resiliente axial (vertical)
$\varepsilon_{c(sl)}$	Deformação de compressão no topo da camada de subleito
$\varepsilon_{t(r)}$	Deformação de tração na base da camada de revestimento
Δ_h	Deslocamento vertical recuperável máximo
θ	Soma das tensões principais
ν	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS.....	7
1.1.1	Objetivo Geral	7
1.1.2	Objetivos Específicos	7
1.2	ESTRUTURA DA TESE	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	GROUND PENETRATING RADAR	9
2.2	PAVIMENTO FLEXÍVEL	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1	GROUND PENETRATING RADAR (GPR).....	26
3.1.1	Modos de Aquisição	34
3.1.2	Parâmetros de Aquisição	36
3.1.2.1	Tipos de antenas	37
3.1.2.2	Profundidade de Penetração e Frequência Central da Antena	38
3.1.2.3	Resolução	39
3.1.2.4	Número de Amostras.....	41
3.1.2.5	Frequência de Amostragem.....	41
3.2	PAVIMENTOS	41
3.2.1	Dimensionamento de Pavimentos	43
3.2.2	Retroanálise do Pavimento	53
3.2.3	Análise Probabilística do Pavimento.....	57
4	MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1	PISTA EXPERIMENTAL DE CAMPO VERDE (PECV)	62
4.1.1	Aquisição de Dados com o GPR	72
4.1.2	Aquisição de Dados com a Viga Benkelman	78
4.1.3	Elaboração dos Gráficos das Bacias Deflectométricas	79
4.1.4	Estudo da Retroanálise do Pavimento	80
4.1.5	Análise de Danos do Pavimento.....	85
4.1.6	Análise Probabilística do Pavimento.....	86
4.2	PISTA DA AVENIDA ANTÁRTICA (PAA), EM CUIABÁ-MT	86
4.2.1	Extração de Núcleos da Camada de Revestimento	90
4.2.2	Ensaio de Compactação das Camadas	91
4.2.3	Ensaio com a Viga Benkelman	91
4.2.4	Elaboração dos Gráficos das Bacias Deflectométricas	92
4.2.5	Instalação das Placas de Aço nas Interfaces das Camadas.....	93
4.2.6	Registro da Localização das Placas com a Equipe de Topografia	94

4.2.7	Aquisição de Dados com o GPR	97
4.2.8	Retroanálise do Pavimento	102
4.2.9	Análise de Danos do Pavimento.....	103
4.2.10	Análise Probabilística do Pavimento.....	104
4.3	RODOVIA BR 101-NE, LOTES 7 E 8, RECIFE – PE	105
4.4	AEROPORTO SANTOS DUMONT, RIO DE JANEIRO-RJ	110
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	112
5.1	PISTA EXPERIMENTAL DE CAMPO VERDE (PECV)	112
5.1.1	Medidas de Espessuras das Camadas do Pavimento com o GPR.....	112
5.1.2	Medidas de deflexão do Pavimento da PECV com Viga Benkelman.....	122
5.1.3	Retroanálise do Pavimento da PECV	128
5.1.4	Análise de Danos da PECV	130
5.1.5	Análise Probabilística do Pavimento da PECV.....	132
5.2	PISTA DA AVENIDA ANTÁRTICA (PAA)	139
5.2.1	Ensaio de Caracterização dos Materiais da Estrutura do Pavimento da PAA.....	168
5.2.2	Medidas de espessura das camadas com o GPR na PAA.....	170
5.2.3	Ensaio com Viga Benkelman na PAA	153
5.2.4	Retroanálise do Pavimento da PAA	155
5.2.5	Análise de Danos do Pavimento da PAA.....	157
5.2.6	Análise Probabilística do Pavimento da PAA	158
5.3	RODOVIA BR 101-NE, LOTE 7, RECIFE – PE	165
5.4	AEROPORTO SANTOS DUMONT, RIO DE JANEIRO – RJ	169
6	CONCLUSÃO	173
6.1	O MÉTODO GPR APLICADO NA MEDIDA DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DA PECV E DA PAA E RÍGIDOS DA BR-10/NE E DO PÁTIO DO AEROPORTO SANTOS DUMONT	173
6.2	RETROANÁLISE DOS PAVIMENTOS DA PECV E DA PAA	176
6.3	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DOS PAVIMENTOS DA PECV E DA PAA.....	177
6.4	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	178
	REFERÊNCIAS	180

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo destina-se a apresentar o assunto que motivou o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida os objetivos são discriminados e finaliza-se o capítulo com a apresentação de uma descrição sucinta da estrutura da tese.

O Relatório Gerencial de Pesquisa de Rodovias, produzido pela Confederação Nacional de Transporte (CNT) em parceria com o Serviço Social de Transporte (SEST) e o Serviço Nacional de Aprendizagem de Transporte (SENAT), comprova que o modal rodoviário brasileiro é responsável por 60% da movimentação de cargas e 90% da movimentação de passageiros no País, o que faz dele a maior e mais importante modalidade de transporte. No ano de 2013 registraram-se 1.713.885 quilômetros de rodovias no Brasil, dos quais apenas 202.589 são pavimentadas (11,8%). Destas extensões pavimentadas, 64.921 quilômetros são federais (58.342 km de pistas simples, 5.203 km de pistas duplas e 1.376 km de pistas em duplicação), 110.842 km são estaduais e 26.826 km são municipais (CNT, 2013). De 2004 a 2013, a extensão da malha rodoviária federal pavimentada cresceu apenas 12,1%, passando de, aproximadamente, 58.000 km para aproximadamente 65.000 km.

Segundo o Censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil é o quinto maior país em dimensão territorial. A área do país, de 8.515.767 km², faz com que a densidade da malha rodoviária brasileira pavimentada (23,8 km de rodovia para cada 1.000 km² de área; CNT, 2013) seja uma das menores do mundo comparada a países de dimensões territoriais semelhantes.

Os primeiros resultados definitivos do Censo de 2010 do IBGE, divulgados em novembro de 2010, apontaram uma população formada por 190.732.694 pessoas, que convive com uma reduzida malha rodoviária com graves problemas associados à sua conservação, aliada à ausência de serviços de manutenção e, conseqüentemente com custos elevados para os usuários, sobretudo com a operação dos veículos. Há eminente necessidade de investimentos contínuos objetivando a manutenção, a recuperação e a ampliação da malha rodoviária brasileira, principalmente a reduzida extensão pavimentada dessa malha e, por isso, é fundamental que o país invista em mecanismos de avaliação que permitam o monitoramento das condições da infraestrutura existente, como um fator preponderante na busca por um desempenho mais significativo do modal rodoviário brasileiro.

Em 2013, a CNT pesquisou 96.714 km de rodovias brasileiras com o propósito de diagnosticar três características importantes para garantir os níveis de segurança, de conforto dos usuários e de conservação da malha: pavimento, sinalização e geometria das vias. Para fazer esse trabalho, a CNT baseou-se nas normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT; normas DNIT 005/2003-TER; DNIT 006/2003-PRO; DNIT 008/2003-PRO e DNIT 009/2003-PRO) e de outras referências técnicas como o Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos (MID; Domingues, 1993) e o *Highway Capacity Manual* (HCM; TRB, 2010).

Sob a ótica dessas referências, as rodovias foram avaliadas pela observação visual das características de cada elemento constituído por um trecho de até 10 km de extensão, observados por um condutor dirigindo um veículo à velocidade máxima de 50 km/h, à luz natural e em boas condições de visibilidade.

Relativamente ao pavimento, identificaram-se as características das rodovias (condição da superfície, velocidade no pavimento central e no acostamento) onde o pesquisador insere informações acerca da condição de superfície, da velocidade devido ao pavimento e da presença de pontos críticos, quando o avaliador fotografa o local e anota suas características e localizações por meio das coordenadas fornecidas no *Global Positioning System* (GPS).

Segundo o relatório, um dos problemas encontrados no Brasil, relacionado à estrutura dos pavimentos flexíveis, é o não atendimento às exigências técnicas, tanto da capacidade de suporte das camadas do pavimento, como da qualidade dos materiais usados no revestimento. Falhas construtivas têm como consequência um processo de deformação mais acelerado, o que resulta em maiores custos com a reparação desses pavimentos para atingir condições ideais de tráfego.

Sob o aspecto do quesito Estado Geral dos pavimentos analisados, os resultados apontam que 36,2% dos trechos pesquisados apresentam condições satisfatórias, classificados como Ótimo ou Bom, e que em 63,8% foram identificados problemas no pavimento, na sinalização ou na geometria da pista, classificados como regular, ruim ou péssimo, conforme consta da Tabela 1.1. Os percentuais apresentados referem-se à extensão total das rodovias pesquisadas.

Tabela 1.1 - Classificação das rodovias brasileiras (ESTADO GERAL) pesquisadas pelo CNT, 2013.

Estado Geral	Extensão Total		Extensão Federal		Extensão Estadual	
	km	%	km	%	km	%
Ótimo	9.895	10,2	4.958	5,1	4.937	5,1
Bom	25.107	26,0	20.649	21,4	4.458	4,6
Regular	33.302	34,4	25.104	26,0	8.198	8,5
Ruim	20.676	21,4	11.568	12,0	9.108	9,4
Péssimo	7.734	8,0	3.164	3,3	4.570	4,7
Total	96.714	100,0	65.443	67,7	31.271	32,3

Ao considerar apenas o quesito Estado do Pavimento das rodovias pesquisadas, verificou-se que 53,1% da sua extensão foram classificadas como Ótima ou Boa e 46,9% foram classificadas como Regular, Ruim e Péssima. Portanto, um total de 13.319 km apresenta o estado de conservação crítico (Ruim ou Péssimo), sinalizando grande risco à segurança e necessidade de maior intervenção (Tabela 1.2). Os percentuais também estão referidos à extensão total das rodovias pesquisadas.

Tabela 1.2 - Classificação das rodovias brasileiras (PAVIMENTO) pesquisadas pelo CNT, 2013.

Pavimento	Extensão Total		Extensão Federal		Extensão Estadual	
	Km	%	Km	%	Km	%
Ótimo	44.672	46,2	35.025	36,2	9.647	10,0
Bom	6.667	6,9	5.193	5,4	1.474	1,5
Regular	32.056	33,1	18.993	19,6	13.063	13,5
Ruim	9.303	9,6	4.309	4,5	4.994	5,2
Péssimo	4.016	4,2	1.923	2,0	2.093	2,2
Total	96.714	100,0	65.443	67,7	31.271	32,3

Sob o ponto de vista das condições da superfície dos pavimentos, verificou-se que a maioria da extensão pesquisada (65,1%) apresenta-se desgastada, com algum tipo de defeito, sendo identificada, principalmente, a presença de trinca, enquanto que, em apenas 34,9% foi considerada perfeita (Tabela 1.3). Nessa tabela apresentam-se as extensões e as condições dos pavimentos administrados sob a gestão concedida a terceiros e aqueles geridos sob a administração pública.

Tabela 1.3 - Classificação dos pavimentos (ESTADO GERAL), pesquisados pelo CNT, 2013.

Condições da Superfície do pavimento	%	Gestão Concedida		Gestão Pública	
		km	%	km	%
Totalmente perfeito	34,9	8.694	54,8	25.020	30,9
Desgastado	43,0	5.632	35,5	35.980	44,5
Trinca em malha/Remendo	18,4	1.525	9,6	16.310	20,2
Afundamentos / Ondulações/Remendos	3,1	12	0,1	2.950	3,6
Totalmente destruídos	0,6	10	0,1	581	0,7
Total	100,0	15.873	100,0	80.841	100,0

Na Tabela 1.4 apontam-se os percentuais e extensão dos pavimentos indicando a classificação quanto ao estado de conservação do revestimento dos pavimentos administrados por concessão particular e daqueles administrados pela gestão pública.

Tabela 1.4 – Classificação do estado geral do revestimento dos pavimentos, pesquisados pelo CNT, 2013.

Situação	Extensão sob Gestão Concedida				Extensão sob Gestão Pública			
	Estado Geral		Superf. do Pavim.		Estado Geral		Superf. do Pavim.	
	km	%	km	%	km	%	km	%
Ótimo	7.698	48,5	12.460	78,5	2.183	2,7	32.256	39,9
Bom	5.698	35,9	1.032	6,5	19.402	24,0	5.659	7,0
Regular	2.270	14,3	1.952	12,3	31.043	38,4	30.073	37,2
Ruim	190	1,2	397	2,5	20.453	25,3	8.893	11,0
Péssimo	16	0,1	32	0,2	7.761	9,6	3.961	4,9
Total	15.873	100,0	15.873	100,0	80.841	100,0	80.841	100,0

Para a CNT (2013), o setor de transporte no Brasil é caracterizado por uma infraestrutura insuficiente, em más condições de conservação e que recebe um baixo volume de investimentos há décadas, apesar de sua importância para o funcionamento da economia. Desde 1975, o investimento público federal em infraestrutura de transporte, como proporção do Produto Interno Bruto (PIB), caiu de 1,84% para 0,29%, em 2012. Nos dois últimos anos, constatou-se uma diminuição no investimento público, que passou de 0,36% para 0,29% entre 2011 e 2012, o que reflete um cenário pouco promissor para o país (Figura 1.1). A manutenção do baixo investimento na infraestrutura de transporte em patamares abaixo do necessário restringe o crescimento e o desenvolvimento econômico do país, ofuscando e até mesmo os resultados positivos apresentados em setores da economia como a agricultura e a indústria (CNT, 2013).

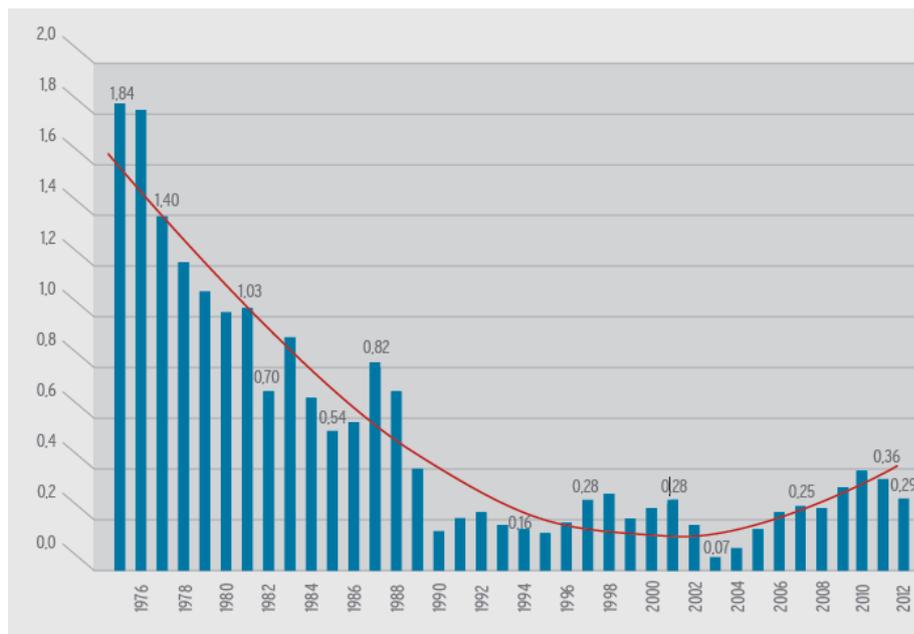


Figura 1.1 - Gráfico ilustrando o investimento federal/PIB(%) em infraestrutura de transportes no período de 1975 a 2012.
Fonte: CNT, 2013.

O pavimento visa prover segurança ao tráfego nas rodovias, suportar os efeitos das mudanças de clima, permitir o deslocamento suave, não causar desgaste excessivo de pneus e não apresentar nível alto de ruídos, ter estrutura adequada, resistir ao fluxo de veículos, permitir o escoamento da água (drenagem) e ter boa resistência a derrapagens (DNIT, 2010). Para atender a esses requisitos, a estrutura do pavimento é constituída por camadas que distribuam as solicitações de carga, o que limita as tensões e as deformações de maneira a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nesse sentido, os pavimentos flexíveis dividem-se em camadas, sendo pelo menos duas: a camada de revestimento e camada de base, que têm como objetivo, distribuir as tensões provenientes das cargas representadas pelos veículos para as camadas subsequentes, cujo propósito é o de reduzir os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego para oferecer proteção ao subleito.

O conhecimento da estrutura das camadas que compõem o pavimento é de grande importância para os trabalhos de prevenção contra desgastes prematuros devidos, como por exemplo, a fadiga dos materiais do revestimento em função do excesso de carga, ao mau dimensionamento das camadas ou problemas construtivos. Os projetos das camadas da estrutura, os projetos de drenagem, as especificações técnicas de controle tecnológico dos materiais, dentre outros dados de dimensionamento dos pavimentos são elaborados, porém,

nem sempre criteriosamente seguidos durante a sua construção. Portanto, as obras executadas das rodovias nem sempre correspondem aos projetos construtivos e não raro a falta do registro das condições construtivas finais (relatório “as built”). Na elaboração de um plano de recuperação de pavimentos, as informações da situação do pavimento em uso ao longo de certo período (espessura das camadas de revestimento, base, sub-base e profundidade da superfície do subleito) são essenciais a seleção de soluções adequadas.

As pesquisas realizadas pela CNT restringem-se ao revestimento, dentre outras características observadas visualmente como a geometria e sinalização dos pavimentos. Esses aspectos, fundamentais para a dirigibilidade com segurança e conforto de seus usuários, entretanto, informam pouco acerca da estrutura que compõe o pavimento enquanto uma obra geotécnica completa, porque não tem a profundidade de investigação que aponte para a situação das camadas subjacentes que protegem o subleito contra as ações das cargas impostas sobre o pavimento, sem dar qualquer prognóstico da sua vida útil remanescente.

Para o correto dimensionamento de pavimentos novos ou de medidas de restauração de pavimentos existentes, além das espessuras das camadas, o projetista precisa conhecer as propriedades mecânicas e físicas, principalmente o módulo de resiliência, dos materiais constituintes utilizados nas diversas camadas do pavimento.

Uma forma não destrutiva para determinação dos módulos das camadas é a utilização de retroanálises de bacias de deflexões. Estas bacias são obtidas por meio de ensaios de avaliação estrutural, sendo a Viga Benkelman e o FWD (*Falling Weight Deflectometer*) os mais utilizados. Nestes ensaios uma carga distribuída é aplicada na superfície do pavimento e são registradas as deflexões (na realidade os deslocamentos verticais) em diversos pontos ao longo da pista. Esta bacia de deslocamentos depende da rigidez relativa das diversas camadas, e a rigidez de uma camada, por sua vez, depende de sua espessura e do módulo de resiliência do material constituinte. Conhecidas as espessuras (por meio do levantamento com GPR, por exemplo), o objetivo da restroanálise é justamente a determinação dos módulos. Isto é possível pela aplicação da Teoria da Elasticidade para Múltiplas Camadas (BURMISTER, 1945) e pelo auxílio de programas computacionais.

Este trabalho apresenta a avaliação das condições da estrutura do pavimento que possibilita por meio da aquisição de dados contínuos com um método geofísico GPR e de ensaios de campo para avaliação estrutural, aliados ao processamento e a interpretação de informações adquiridas, estimar a vida útil da estrutura que compõe os pavimentos.

A pesquisa apresenta um estudo probabilístico sobre os principais parâmetros da estrutura dos pavimentos e a sua influência sobre as deformações e a vida de fadiga e, com isso, identifica os fatores que requerem maior controle durante a sua construção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia que permita estimar a vida útil restante de um pavimento existente, com base em ensaios não destrutivos que possibilitem a identificação das espessuras das camadas da estrutura do pavimento com o uso de métodos geofísicos (GPR) e a determinação dos módulos de resiliência dos materiais constituintes, com o auxílio de retroanálises de bacias de deslocamentos obtidos em ensaios de avaliação estrutural.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Adquirir informações acerca das espessuras das camadas de pavimentos flexíveis com o método do radar de penetração do solo (*Ground Penetrating Radar –GPR*);
- Correlacionar e executar uma análise da precisão dos resultados de espessura das camadas obtidos a partir do método GPR com os adquiridos por investigações diretas.
- Determinar os deslocamentos verticais do pavimento com o método da viga Benkelman para ajuste das bacias de deflexão na retroanálise;
- Estimar os módulos elásticos das camadas dos pavimentos pelo processo de retroanálise;
- Calcular os valores de deformação de tração na base do revestimento e de deformação de compressão no topo do subleito, pela análise de danos dos pavimentos;
- Realizar estudo estatístico dos parâmetros associados à estrutura dos pavimentos, e verificar a influência destes parâmetros na deformação, no número de passadas permitidas e no dano dos pavimentos, com base em métodos probabilísticos

- Fazer sugestões sobre o controle construtivo de pavimentos com base na análise dos parâmetros que mais afetam o desempenho estrutural de um pavimento.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está organizada em por seis capítulos, cuja ordem temática não corresponde, necessariamente, à ordem cronológica em que foi desenvolvida a pesquisa.

O Capítulo 1 refere-se à introdução do tema apresentando um panorama da situação das rodovias brasileiras, os objetivos e um resumo dos assuntos de cada capítulo.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica contendo os principais trabalhos relacionados Método *Ground Penetrating Radar* (GPR) aplicado à medida de espessura de camadas pavimentos. São também apresentados trabalhos que focaram as suas pesquisas na retroanálise e na análise probabilística de pavimentos, assuntos tratados nesta tese.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para dar embasamento a este trabalho, relativamente ao Método GPR e aos assuntos ligados ao pavimento.

O Capítulo 4 apresenta os principais métodos, procedimentos técnicos e materiais utilizados nas diferentes etapas do trabalho. Este capítulo está dividido em quatro áreas de estudo: duas referentes a pavimentos flexíveis e duas referentes a pavimentos rígidos. As áreas de pavimentos flexíveis, construídas durante a elaboração desta tese, serão contempladas com a retroanálise e a análise probabilística da sua estrutura. Os pavimentos rígidos terão importante análise sobre a variabilidade das espessuras das camadas de sua estrutura, medidas com o GPR.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa, enquanto o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões, algumas recomendações baseadas nas conclusões, bem como sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema estudado.

As referências bibliográficas da pesquisa estão apresentadas logo após o Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo serão apresentados, em ordem cronológica, os trabalhos mais relevantes desenvolvidos recentemente e que tratam de assuntos relacionados ao tema desta pesquisa.

Os Métodos Geofísicos têm sido cada vez mais usados para dar suporte às soluções de problemas geotécnicos e o *Ground Penetrating Radar* (GPR), dentre os Métodos Geométricos, um dos mais solicitados quando se trata de investigação rasa. Este é caso específico da estrutura de pavimentos, motivo pelo qual, neste Capítulo, será dada ênfase aos trabalhos científicos publicados sobre a aplicação do Método GPR na investigação das características das camadas de pavimentos.

Numa segunda abordagem, este Capítulo apresentará alguns trabalhos recentemente publicados sobre a retroanálise e também sobre a análise probabilística de pavimentos flexíveis, cujo assunto é o foco principal desta tese.

2.1 GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

O método do GPR é relativamente novo quando comparado com os demais métodos geofísicos. Os primeiros registros do uso de sinais eletromagnéticos são de Hülsmeier (1904), que detectou a presença de objetos de metal enterrados no solo (HÜLSMEYER, 1904 *apud* DANIELS, 2004).

Waite & Schmidt (1961) usaram o método para produzir informações sobre a constante dielétrica, os fatores de perda, o espalhamento e os dados de reflexão de interface de camadas no gelo. Durante a década de 60 pesquisadores continuaram a usar o método GPR na identificação de espessuras de placas de gelo com o propósito de controlar a altitude das aeronaves de pouso com segurança, com base no tempo duplo de viagem dos pulsos de radar, dessa vez no Ártico e na Antártida.

A partir de 1970 desenvolveram-se pesquisas em outros ambientes geológicos de baixa perda. Holser *et al.* (1972), Thierbach (1973) e Unterberger (1978) realizaram pesquisas em depósitos de sal com o método GPR (ANNAN, 2002). Cook (1973) utilizou o método em minas de carvão. Dolphin *et al.* (1978) utilizaram o método em aplicações arqueológicas. O serviço geológico do Canadá realizou diversas pesquisas nesse período para prever os

melhores trajetos para a instalação de oleodutos no Alasca e em minas de potássio no oeste do país (ANNAN, 2002). Owen (1981) relata pesquisas de detecção de túneis com GPR, desenvolvidas pelo exército americano. Benson *et al.* (1984) apresentam resultados de pesquisas com o GPR em terrenos contaminados com óleos combustíveis nos Estados Unidos.

Houve um aumento nas pesquisas com o método GPR, após a missão à Lua, por ocasião da nave Apollo 17 (ULRIKSEN, 1982). A partir da década de 80, o GPR foi incluído como método de exploração geofísica pela comunidade geocientífica mundial, devido ao grande número de artigos publicados em revistas científicas e ao desenvolvimento de equipamentos, com conseqüente melhoria na qualidade e na redução de preço. Nesse período os equipamentos deixaram de ser fabricados pelos próprios pesquisadores e passaram a ser produzidos e comercializados por grandes empresas, fato que os tornou mais compactos, com registro digital dos dados, e com a aquisição mais simples devido a sua portabilidade. A partir de 1990 houve mais avanços na tecnologia com a criação de grandes empresas (ANNAN, 2002). Uma nova aplicação para o método foi na classificação de solos (DOOLITTLE e ASMUSSEN, 1992). Avanços também aconteceram com o desenvolvimento do processamento de dados digitais (MAIJALA, 1992; GERLITZ *et al.*, 1993); simulação numérica 2D (ZENG *et al.*, 1995; CAI e McMECHAN, 1995); aplicações arqueológicas (GOODMAN, 1994); meio ambiente (BREWSTER e ANNAN, 1994); estratigrafia geológica (JOL, 1996) dentre outras áreas. Nesse período também houve grande desenvolvimento na parte computacional, o que possibilitou gerenciar grande volume de informações e visualização de dados 3D (GRASMUECK, 1996; ANNAN, 1997).

O GPR é destaque, dentre os métodos geofísicos, na investigação rasa pela sua portabilidade, praticidade, rapidez na aquisição de dados e agilidade no processamento. Como produto final, apresenta uma imagem de alta resolução com detalhes de ocorrências em subsuperfície, que auxilia na tomada de decisão por profissionais de diversas áreas.

Nas últimas três décadas, diversos trabalhos comprovam a utilização do GPR na investigação da estrutura de pavimentos. No início da década de 90, é importante citar o trabalho de Gartin (1991) que realizou um estudo relativo à propagação da onda de GPR em pavimentos e solos. Ele apresenta um histórico detalhado dos primeiros estudos realizados sobre essas pesquisas, dos primeiros trabalhos produzidos desde 1930. Pesquisas anteriores, como as de Maser (1986) e Carter (1986) com a aplicação de GPR em pavimentos atestam a aplicabilidade desse método.

A Tabela 2.1 apresenta alguns trabalhos que utilizaram o GPR na pesquisa de pavimentos, bem como observações gerais sobre a aplicação.

Quadro 2.1 - Trabalhos publicados a partir da década de 90, que relacionam o Método GPR à pesquisa em estrutura de pavimentos.

Autores	Uso do GPR
Ballard (1993), Adcock <i>et al.</i> (1995), Mesher <i>et al.</i> (1995), Daniels (1996), Maser (1996), Gordon <i>et al.</i> (1998), Gonçalves e Ceratti (1998), Saarenketo e Roimela (1998), Strieder <i>et al.</i> (1999), Hugenschmidt (2002), Loulizi <i>et al.</i> (2003), Fauchard <i>et al.</i> (2003), Jung <i>et al.</i> (2004), Hugenschmidt e Mastrangelo (2006), Willett <i>et al.</i> (2006), Loizos e Papavasiliou (2006), Lopes (2009), Morcous e Erdogmus (2010), Saarenketo e Scullion (2010), Xu <i>et al.</i> (2011), Leng e Al-Qadi (2011), Khweir (2011), Chen <i>et al.</i> (2012), Solla <i>et al.</i> (2013) e Liu, Takahashi e Sato (2014)	Determinação da espessura das camadas da estrutura de pavimentos
Puente <i>et al.</i> (2013)	GPR 3D
Shang e Umana (1999), Jaselskis <i>et al.</i> (2003) e Lai <i>et al.</i> (2009)	Propriedades dielétricas dos materiais usados nas camadas da estrutura de pavimentos
Adams <i>et al.</i> (1998) , Yehia <i>et al.</i> (2005), Zhong <i>et al.</i> (2011), Ni1 e Chieh (2011)	Detecção de espaços vazios
Grote <i>et al.</i> (2005), Benedetto e Pensa (2007), Pérez-Gracia <i>et al.</i> (2008), Chen e Zhang (2010), Tarefder e Bateman (2009), Chen e Wimsatt (2010), Li <i>et al.</i> (2010), Benedetto e Blasiis (2010), Barbosa <i>et al.</i> (2010), Plati e Loizos (2013) e Tosti <i>et al.</i> (2013)	Teor de umidade de materiais usados nas camadas de estrutura de pavimentos
Chang <i>et al.</i> (2009), Beben <i>et al.</i> (2012), Stryk <i>et al.</i> (2013), Daniels (1996)	Localização de barras de aço usadas na estrutura de pavimentos rígidos
Diamanti e Redman (2012), Kryszinski e Sudyka (2013) e Solla <i>et al.</i> (2014)	Detecção de fissuras em camadas de revestimento de pavimentos
Lahouar e Al-Qadi (2008)	Estudo de reflexões múltiplas
Losa <i>et al.</i> (2008), Scullion e Chen (2009) e Chen <i>et al.</i> (2012)	Avaliação das condições da camada de revestimento

Nesta tese apresentam-se os trabalhos mais representativos relacionados com o método GPR aplicados na detecção da espessura de camadas de pavimentos.

Ballard (1993) realizou pesquisas em trechos experimentais em rodovias, com a retirada de núcleos de amostras para comparação com os resultados das investigações indiretas com o GPR. Ele identificou significativas variações nas espessuras das camadas do pavimento investigado e atribui essas variações à construção e à degradação dos pavimentos estudados.

Adcock *et al.* (1995) usaram o GPR (antenas com frequências de 2,5GHz e de 900MHz) em pistas de pouso de aeronaves, a partir do qual detectaram variações significativas na espessura do pavimento e anomalias relacionadas a vazios e caminhos preferenciais de percolação de água. Os resultados de GPR possibilitaram a determinação da profundidade das camadas com acurácia de $\pm 5\%$.

Mesher *et al.* (1995) desenvolveram um sistema denominado *Road Radar Technology* para identificar as interfaces e medir a espessura de camadas de pavimentos usando um arranjo de múltiplas antenas. Os autores sugerem que a velocidade da onda nos materiais constituintes das camadas está fortemente correlacionada com a densidade e com a presença de água no pavimento e que, portanto, o teor de água é um fator importante e influente na velocidade de propagação da onda eletromagnética.

Daniels (1996) reúne inúmeras aplicações do método GPR na investigação de pavimentos rígidos e flexíveis, dentre os quais os relacionados à determinação da espessura das camadas da estrutura desses pavimentos, no espaçamento e na localização de barras de ligação e de transferência, bem como para detectar fissuras e vazios em subsuperfície.

Maser (1996) apresenta uma revisão de pesquisas realizadas com o uso do GPR na avaliação de pavimentos e em aplicações geotécnicas. Na medição de espessuras de camadas da estrutura de pavimentos, apresenta resultados para estruturas com 5 cm de espessura de revestimento, precisão de $\pm 7,5\%$ e, para a camada de base, de $\pm 12\%$, usando um equipamento GPR acoplado a uma antena de 1 GHz. Entretanto relata que os resultados da investigação de pavimentos de concreto não foram satisfatórios, em função da atenuação do pulso no concreto. Ressalta, ainda, que o fraco contraste entre as propriedades dielétricas do concreto e do material da base granular dificulta a identificação da interface entre as camadas de base e de revestimento, e que isso também é consequência do fato de que a água e os sólidos totais dissolvidos no concreto aumentam a atenuação da onda eletromagnética.

Gordon *et al.* (1998) desenvolveram uma pesquisa sobre as diferentes aplicações de GPR na investigação de pavimentos, em que faz críticas ao sucesso desse método, e discute os problemas a ele associados. Nas suas conclusões, destacam que camadas de espessuras menores que 20 cm criam especial problema para o GPR, visto que o comprimento de onda de um pulso de radar de antena com frequência central de 1 GHz, por exemplo, está na faixa de 0,9 a 2,1 cm, para velocidades de propagação da onda na camada de revestimento asfáltico, que variam entre 0,07 e 0,21 m/ns nas condições entre saturado e seco. Por isso, explicam os autores, na imagem de radar a interface revestimento-base nem sempre é claramente visualizada. Isso ocorre porque é relativamente complexo resolver os componentes individuais do sinal de radar, que incluem a resposta da parcela da onda transmitida diretamente da antena transmissora para a antena receptora, ou onda direta no solo (*ground wave*) e as reflexões produzidas pelas interfaces das camadas da estrutura do pavimento propriamente dito (as ondas refletidas).

Saarenketo e Roimela (1998) usam um GPR equipado com antena de 1 GHz fixada a um veículo que se desloca a uma velocidade de 50 a 70 km/h, para determinar a constante dielétrica, relacionada à flutuação do conteúdo de vazios dos materiais constituintes das camadas de pavimentos recém construídos, e para medir a espessura das camadas de revestimento de concreto asfáltico. Os resultados atestam que o método GPR é aplicável no controle da qualidade da densidade e da espessura dos pavimentos. Ressaltam os autores que a maior vantagem do sistema GPR é que o método fornece um perfil contínuo da seção do pavimento.

Hugenschmidt (2002) adquiriu dados de GPR em pontes, com o propósito de avaliar o nível de deterioração de suas estruturas para fins de planejamento, de manutenção e de reabilitação. A apresentação de resultados em perfis contínuos, a eficiência na aquisição de dados e o caráter não destrutivo, resumem as principais vantagens do sistema GPR segundo o autor.

Loulizi *et al.* (2003) desenvolveram um método para previsão de pulso de GPR baseado no espectro de frequência e em dados de campo. Os autores obtiveram erros da ordem de 3,6 % entre dados simulados e de campo na situação em que possuíam informações de constantes dielétricas e de espessuras das camadas de pavimento.

Fauchard *et al.* (2003) no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), investigaram a estrutura de pavimentos com o método GPR, pelas suas características construtivas. Os trabalhos relatam, inicialmente, a calibração do método por meio da comparação dos dados do GPR com as dimensões extraídas de núcleos de amostragem. Numa segunda etapa não foram utilizados núcleos extraídos do pavimento para evitar uma intervenção destrutiva do pavimento. Os autores atestaram o método para calcular a espessura e a velocidade da onda em cada camada do pavimento a partir de dados experimentais que, comparados com as amostras existentes, apresentaram erros de $\pm 5\%$ para a primeira camada, um nível de levantamento considerado satisfatório. Foram verificados valores de precisão $\pm 10\%$ para a segunda camada, e de 20% para a terceira camada.

Jung *et al.* (2004) utilizaram o GPR para estimar a deformação residual em um pavimento construído sobre um solo colapsível, com valores medidos da espessura do pavimento. Os autores usaram métodos tradicionais de amostragem, como extração de núcleos de revestimento, para comparar as espessuras reais com as obtidas com o GPR. Também atestaram que o método GPR não precisa prejudicar ou interromper o tráfego durante a aquisição de dados.

Hugenschmidt e Mastrangelo (2006) usaram o GPR para realizar inspeções em pontes de concreto, entretanto alertam para a necessidade do uso de normas e diretrizes disponíveis como referência para orientação das campanhas de aquisição de dados, processamento e interpretação e destacam que a qualidade dos resultados da pesquisa não depende apenas do objeto inspecionado, mas também da qualificação e da experiência da equipe que a realiza. Nos seus resultados, os autores afirmam que, nas pesquisas das pontes de concreto, em 77% das seções inspecionadas, a interface superior da camada que identifica a localização das barras de reforço foi visualizada. Afirmam, também, que foi possível medir a espessura das camadas da estrutura do pavimento em 95% das seções inspecionadas, cuja diferença média entre os resultados obtidos com radar e em campo foi de 0,9 cm. As velocidades encontradas variaram entre 0,058 m/ns e 0,104 m/ns para o revestimento de concreto, e 0,117 m/ns e 0,143 m/ns para o revestimento asfáltico.

Willett *et al.* (2006) realizaram pesquisas com o GPR para determinar as espessuras de camadas de revestimento de asfalto e de concreto. Atestaram que a retirada de quatro núcleos para realizar a calibração do método é o número ideal para minimizar os erros de modo a obter resultados mais seguros. Com esse procedimento, há uma simplificação na fase de pós-processamento que torna exequível a investigação de camadas finas de pavimentos, menores que 7,5cm.

Motivados por um projeto do Ministério Público Grego, Loizos e Papavasiliou (2006) realizaram um experimento de campo com o propósito de reabilitar pavimentos semirrígidos danificados. Para medir espessuras das camadas do pavimento, os autores usaram o GPR (antena de 1 GHz) cujos dados foram comparados com as dimensões de amostras obtidas em campo. A obtenção dos dados foi realizada à velocidade do tráfego. O uso do GPR permitiu determinar a espessura de duas camadas do pavimento constituídas de materiais diferentes. O valor médio da primeira camada foi de 9,9 cm e o coeficiente de variação dos resultados foi de 7,2%. Já a segunda camada apresentou valor médio de 24,5 cm com coeficiente de variação de 6%. Os coeficientes de variação apresentados foram compatíveis com os resultados obtidos com os dados de campo. Logo, o método atestou eficiência, mesmo nos casos em que não foi possível a retirada de amostras, devido ao tráfego intenso.

Loizos e Plati (2007) realizaram pesquisa com a finalidade de avaliar a precisão na medição da espessura de camadas de revestimento asfáltico nos levantamentos com o GPR (antenas de 250 MHz a 3 GHz). Foram analisados resultados obtidos com diferentes abordagens para a constante dielétrica, dentre as quais: (i) pela análise direta dos dados de GPR; (ii) pela comparação dos dados de GPR com as espessuras dos núcleos de pavimentos

extraídos, que permitiu realizar a conversão do tempo de propagação da onda eletromagnética em profundidade; e (iii) com base em ensaios de laboratório. As três abordagens tiveram resultados satisfatórios. Os valores obtidos com os núcleos de calibração apresentaram o menor erro quando comparado aos outros métodos, porém sua acurácia depende da quantidade de núcleos extraídos. Para uma avaliação rápida do pavimento a análise direta dos dados de GPR é satisfatória.

Morcous e Erdogmus (2010) utilizaram o GPR (antena de 1,6 GHz) para medição da espessura de camadas de pavimentos de concreto. Destacaram que a extração de núcleo, apesar de fornecer precisão nas medidas, afeta a durabilidade do pavimento, é um processo demorado e não fornece uma representação adequada da variação de espessura ao longo da camada de concreto porque é pontual. Sua pesquisa consistiu na avaliação do fator custo-benefício do método, que concluiu que o GPR tem custo inicial e operacional maior do que a perfuração de núcleos, porém, com a redução do número de perfurações, resulta em menor custo para a manutenção de pavimentos em longo prazo. Os autores usaram objetos de metal para produzir refletores para identificar as interfaces entre as camadas da estrutura de pavimentos e realizaram medidas de constantes dielétricas das camadas de revestimento de concreto.

Saarenketo e Scullion (2000) fizeram uma avaliação do método GPR na investigação de pavimentos de rodovias. O GPR foi usado na inspeção da estrutura e para estimar a espessura de suas camadas. Os autores resumem os princípios de operação do GPR com uso de antenas que se deslocam distantes do solo durante a aquisição de dados (*air-coupled*) e superpostas ao solo (*ground-coupled*), bem como a discussão sobre técnicas de interpretação e de processamento de sinais. Dentre as aplicações do GPR como ensaio complementar na investigação de pavimentos, os autores destacam o potencial do método na estimativa da variabilidade das espessuras das camadas da estrutura, na avaliação das propriedades mecânicas do solo das camadas de subleito e de base e, conseqüentemente, no auxílio a engenheiros de pavimento para o dimensionamento e na determinação de estratégias de recuperação de pavimentos em uso.

Xu *et al.* (2011) usaram o GPR para a medir as espessuras de camadas de pavimento, para avaliar o grau de compactação no solo nas camadas e para detectar segregação de mistura. Os autores estabeleceram uma relação entre a constante dielétrica e o grau de compactação do solo, onde o melhor grau de compactação do subleito apresentou-se mais adequado nos resultados do GPR.

Leng e Al-Qadi (2011) utilizaram o GPR (antenas com frequência central de 1,0 GHz e 2,0 GHz) para o controle de qualidade de pavimentos flexíveis. O GPR foi utilizado em cinco trechos de pavimentos construídos com estrutura de camadas constituídas de misturas de diferentes densidades. Destacaram a importância da escolha da frequência central das antenas para estabelecer a profundidade de alcance do sinal e a resolução desejada. Segundo os autores a constante dielétrica de uma mistura depende das propriedades elétricas de seus componentes. Para pavimentos, a mistura constituinte das camadas (ar, água, betume e agregados) e a redução do teor de vazios pelo processo de compactação aumentam o valor da constante dielétrica aparente. Os autores instalaram placas de aço entre as camadas do pavimento com o propósito de visualizar as interfaces com o GPR. Os resultados apresentaram um erro médio de 4,9% na determinação da espessura de camadas sem o uso de amostragem, núcleos de calibração, e um erro médio de 2,6% com o uso desse recurso.

Khweir (2011) analisou pesquisas com o GPR para determinar a vida residual de um pavimento e a espessura de camadas de reforço de revestimento. Para calcular as características da camada de reforço é necessário ter informações sobre a carga de tráfego, módulo de rigidez e o estado da interface, dentre outras. O método GPR fornece um conjunto de dados contínuos de espessura, que auxilia os engenheiros no cálculo para determinar a camada de reforço subsequente. Um margem de erro aceitável para estimativas de espessura é um erro de no máximo 10%, em geral 30 ou 40 mm em relação a espessura real com núcleos de calibração.

Chen *et al.* (2012) adquiriram dados contínuos de GPR em pavimentos no Texas. Durante os trabalhos foram utilizados métodos destrutivos e não destrutivos, dentre eles o GPR, que foi utilizado para caracterizar as espessuras das camadas e identificar anomalias na estrutura do pavimento. Após reunir todas as informações, concluíram que os problemas identificados, inclusive os verificados no subleito estão associados à expansão do solo, à percolação de água em solos argilosos, à alta quantidade de compostos orgânicos e à presença de sulfatos.

Puente *et al.* (2013) adquiriram dados de GPR (antena de 2,3 GHz) em uma rodovia ao norte da Galícia. Os autores identificaram as espessuras das camadas intermediária-base e base/sub-base de solo-cimento devido à baixa profundidade alcançada pela propagação do sinal do radar, de 0,4 m. Os resultados indicaram um erro máximo de 1,5 cm.

Liu e Sato (2014) utilizaram um equipamento GPR para medições da espessura e da permissividade dielétrica de uma camada de revestimento asfáltico. O arranjo da antena foi montado de acordo com o centro de fase (JADOON *et al.*, 2011) e o deslocamento da antena.

Experimentos em laboratório utilizaram modelos de gesso com propriedades dielétricas semelhantes às do pavimento, e às do concreto. Os resultados permitiram concluir que a calibração pelo centro de fase melhora a precisão das estimativas de velocidade e espessura quando comparada à calibração tradicional. A estimativa de erro para medidas de espessura das camadas do pavimento foi inferior a 10%.

Dentre os trabalhos encontrados no Brasil, Gonçalves e Cerrati (1998) desenvolveram pesquisa sobre GPR na avaliação de pavimentos por ser um método compatível com a realidade dos órgãos rodoviários brasileiros. Os levantamentos foram na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos - UFRGS/DAER. Foram realizados levantamentos contínuos ao longo de faixas de rolamento de estruturas de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico, com uma antena de 1 GHz e a uma velocidade de aquisição de 30 km/h. Na pesquisas alguns pontos não ficaram esclarecidos como a influência da velocidade de aquisição, o espaçamento de amostragem na resolução dos dados adquiridos e a interferência dos refletores externos na qualidade do sinal coletado. Foi possível identificar os refletores característicos correspondentes às interfaces revestimento asfáltico/camadas granulares e camadas granulares/subleito ao longo dos perfis levantados, a partir das velocidades de propagação da onda de radar nos diferentes meios estratigráficos obtidos com pontos de sondagem.

Strider *et al.* (1999) realizaram pesquisas na BR-101 e na Ponte Rio-Niterói para testar o uso do GPR no monitoramento de rodovias brasileiras. Destacam que o conhecimento sobre as propriedades dos materiais que constituem os pavimentos e as condições em que se encontram, são essenciais para o gerenciamento das rodovias. Os levantamentos foram executados de modo a obter a maior resolução possível com o GPR acoplado a uma antena com frequência central de 1 GHz. As aquisições foram feitas na velocidade de até 15 km/h, e atingiu uma profundidade de investigação de 1 m. Os resultados obtidos forneceram informações relacionadas à estrutura estratigráfica e à espessura das camadas, e identificaram a camada de CBUQ e a camada da base granular. Concluíram que o método possui alto potencial de investigação associado a outros métodos diretos ou indiretos para a determinação das características dos pavimentos.

Lopes (2009) utilizou o GPR em trechos de pavimentos asfálticos da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. A pesquisa foi realizada com GPR equipado com antenas de 600 MHz e 1,6 GHz, que atingem uma profundidade de investigação máxima de 10 m e 1 m, respectivamente. A velocidade de propagação da onda foi de 0,1 m/ns. Os padrões de reflexão observados caracterizaram os materiais em subsuperfície e os três furos de sondagem executados no local, confirmaram os resultados. A interpretação dos perfis do radar

possibilitou a localização de dutos enterrados, a verificação do material de reforço do revestimento, irregularidades das superfícies das camadas, aspectos relacionados à compactação do subleito, dentre outras informações. A presença de fortes refletores identificaram as interfaces nos perfis do radar e possibilitou determinar as espessuras das camadas. A camada de argila, material constituinte do subleito, foi identificada pela atenuação do sinal do GPR.

Faria (2010) teve como objetivo avaliar o desempenho do GPR para espessura de camadas do pavimento rodoviário flexível e para a avaliação da sua densidade, com uma antena de 1,6 GHz e localizados na BR116 (Rio de Janeiro) e na BR040 (Minas Gerais). Os resultados obtidos para a espessura das camadas foram satisfatórios para a identificação da camada de macadame, entretanto, nas camadas de revestimento e de subleito os refletores não apresentaram boa definição. O método se mostrou eficiente na determinação da densidade da camada de revestimento pela obtenção da constante dielétrica.

Vieira e Gandolfo (2013) apresentaram os resultados de pesquisas desenvolvidas no Instituto de Pesquisa e Tecnologia de São Paulo (ITP) onde foi demonstrada a potencialidade da utilização de métodos não destrutivos na determinação da espessura das camadas de pavimentos. Foi utilizada uma antena de 1,6 GHz que investigou até 0,5 m de profundidade, porém a resolução vertical não foi suficiente para identificar a camada superior do revestimento asfáltico ($\cong 3$ cm) da camada granular de base subjacente, devido sua pequena espessura. Para estas camadas a calibração dos dados foi realizada pelas profundidades observadas nas cavas abertas. A interface da base granular e o subleito regularizado ficou muito bem caracterizada.

Esses autores citados foram os que tiveram os seus trabalhos destacados dentre os mais diversos publicados sobre o uso e aceitação do método GPR na investigação das espessuras das camadas de pavimentos. No Brasil verificou-se que o método GPR tem sua aplicação ainda pouco explorada na investigação das características de pavimentos, atestado pelo pequeno acervo de publicações encontradas a esse respeito.

2.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL

Um breve histórico da pavimentação pode ser encontrado em Bernucci *et al.* (2008) que tece um estudo cronológico com dados que remontam as antigas estradas pavimentadas implantadas desde a construção das pirâmides, até os dias de hoje. Dentre os fatos históricos mais importantes ligados à história da pavimentação no Brasil, Bernucci destaca o período em

que o presidente Washington Luiz (1926 – 1930) tinha como lema “construir é abrir estradas” e, em 1928 inaugura a Rio-São Paulo, hoje conhecida como Presidente Dutra, com 506 km de extensão e, em seguida, a Rio-Petrópolis, representando um marco na nova política rodoviária federal. Destaca, também, em 1937 a criação do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER). Na década de 1940, o avanço da pavimentação foi fruto da tecnologia desenvolvida durante a segunda guerra mundial e os engenheiros brasileiros tiveram acesso aos conceitos estabelecidos pelos engenheiros americanos ligados ao ensaio CBR – o Brasil possuía apenas 1300 km de rodovias pavimentadas. A década de 1950 é lembrada pelo período em que a execução de pavimentos é realizada em escala industrial e pelo surgimento das grandes construtoras de pavimentos. Em 1953 a Petrobrás é criada e com ela a fábrica de asfalto da Refinaria Presidente Bernardes, em 1955. Em 1956 a indústria automobilística é implantada no Brasil e o presidente Juscelino Kubitschek (1956-1961) impulsionou a malha rodoviária pavimentada do país. No período do regime militar (1964-1984) saem do projeto a construção da Rodovia Transamazônica e a Ponte Rio-Niterói. Em 1985 o Brasil já possui 110.000 km de rodovias pavimentadas e em 1993 já são 133.000 km. Em 2005 levantamentos feitos pelo atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT indicam um crescimento da malha rodoviária brasileira para 196.000 km de rodovias pavimentadas (federais, estaduais e municipais) e em 2013 esse número chega aos 202.589 km.

A Tabela 2.2 faz um retrospecto dos principais acontecimentos que contribuíram para o desenvolvimento dos aspectos relacionados à análise do pavimento flexível e da metodologia de projeto desde o início do século passado e até a década de 60 e que repercutiram a partir da década de 1940 nos projetos e na construção dos pavimentos rodoviários brasileiros significativamente.

Quadro 2.2 - Trabalhos relacionados a pavimentos flexíveis realizados até a década de 60 (MONISMITH, 2012).

Contribuições		Trabalhos
Uso de pavimentos de testes pelos USA	Desde 1921	OLDER (1922)
Uso do procedimento Índice de Suporte Califórnia (CBR)	O Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (<i>Army Corps of Engineers, USACE</i>), desenvolveu um procedimento de projeto de pavimentos para pistas de aeroportos, inicialmente para aplicações militares.	PORTER (1938)
Alteração da curva de projeto de espessuras desenvolvida para carga de rodovia, para adequar às cargas de rodas de aeronaves.	Uso da Teoria de Boussinesq	Development of CBR Flexible Pavement Design Method for Airfields, A Symposium, 1950
Introdução do conceito da carga equivalente de roda única.	O B-29 foi introduzido com engrenagens de rodas duplas, 1945	AHLVIN e ULERY (1962); PEREIRA (1977)
Uso de testes acelerados de pavimentos para validar/modificar espessuras para diferentes configurações de cargas de aeronave.	Uso da Teoria de Boussinesq	<i>Army Corps of Engineers, USACE</i>
Área de Teste de Pavimentos da Associação dos Funcionários da Ocidental State Highway	<i>Western Association of State Highway Officials, WASHO</i> , em Malad, Idaho	<i>Special Report 18, 1954</i> <i>Special Report 21, 1955</i>
Área de Teste de Pavimentos da Associação Americana de Funcionários State Highway	<i>American Association of State Highway Officials, (AASHO)</i> no período de 1958-1960, em Ottawa, Illinois	<i>Special Report 61, 1962</i>
Introdução da viga Benkelman para medição de deslocamentos verticais de pavimentos	A.C. Benkelman (Ferramenta: medição rápida da resposta do pavimento; prévia indicação da vida futura do pavimento; melhor concepção para recapeamento). Introdução da HMA.	<i>Special Report 18, 1954</i> <i>Special Report 22, 1955</i>
Resposta de sistemas elásticos de duas e três camadas para as condições de carga representativas	Análise de pavimentos na década de 40 com o conceito de tratamento do pavimento como um sistema de camadas.	BURMISTER (1945)
Introdução do conceito de cargas de roda equivalentes (LEM)	Precursor das cargas por eixo individuais equivalentes (ESALs)	HVEEM (1948)
Relação entre deformações, carga de tráfego e falhas por fadiga no revestimento de pavimentos.	Medição de deformações do pavimento em uso.	HVEEM (1955)
O conceito de camada de equivalência com o uso do fator CBR	Metodologias baseadas em análises	HVEEM (1963)

Ao tratar da análise de tensões, deformações e deslocamentos as formulações dos modelos matemáticos das estruturas de pavimentos referem os modelos em meios homogêneos (Teoria de Boussinesq). Bussinesq foi um cientista francês (1842 – 1929) que, dentre outros, marcou a criação da teoria da elasticidade e a mecânica de materiais,

desenvolveu a solução geral formal para os vários tipos de carregamento do meio semi-infinito. A expressão matemática das curvas empíricas de dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo ensaio de CBR, por exemplo, decorre da aplicação da teoria da elasticidade, atribuída à Boussinesq. Quando a análise de tensões, deformações e deslocamentos trata de meios estratificados, referem-se os modelos à Teoria de Burmister. Atribui-se ao americano Donald Burmister (1943, 1945) a teoria da elasticidade de sistemas de duas e três camadas. Em 1943, Burmister desenvolveu a teoria para uma estrutura de pavimento com duas camadas (revestimento e subleito). Burmister, em 1945, também desenvolveu a teoria do sistema de três camadas elásticas, numa análise aproximada de deflexões, em que estendeu a aplicabilidade da teoria de duas camadas (MEDINA e MOTTA, 2005).

Nos trabalhos apresentados a seguir os autores desenvolveram pesquisas com viga Benkelman destinadas ao estudo da retroanálise de pavimentos; com materiais de camadas de pavimentos flexíveis; catalogação de valores de módulos de resiliência, e com a incorporação de métodos de confiabilidade e procedimentos probabilísticos de projeto para a concepção, a reabilitação e a manutenção de pavimentos. Esses enfoques e alguns resultados foram usados nesta pesquisa como referência. Estes trabalhos serão apresentados na ordem cronológica de suas publicações.

Rezende *et al.* (2014) preocuparam-se com a escassez de cascalho laterítico utilizado nas camadas subjacentes à de revestimento nas estruturas de pavimentos da região centro-oeste do Brasil e propõe o uso de materiais alternativos para a sua substituição. Neste estudo eles apresentam uma avaliação para o uso de resíduos de pedreiras finas para camadas de base e sub-base de pavimentos, atestando que esse material é capaz de fornecer os mesmos níveis de desempenho para baixo volume de tráfego, oferecendo vantagens ambientais e econômicas. Com os dados obtidos no teste de viga Benkelman e posterior retroanálise atestaram que os trechos construídos com esses materiais alternativos apresentaram comportamentos semelhantes e performances satisfatórias. Estes resultados mostram o potencial do uso de materiais de pavimentação alternativo.

Amorim (2013) realizou análises do comportamento mecânico e do desempenho funcional de um pavimento urbano por meio de ensaios geotécnicos de laboratório e de campo. Para isso, promoveu a execução de um trecho experimental em pavimentação asfáltica, onde se utilizou na camada de base, uma mistura contendo 25% em massa de Resíduo de Construção e Demolição - RCD, oriundo de restos de concreto, alvenaria e pisos, associado a um solo laterítico típico do município de Campo Verde - MT. Das análises realizadas a partir do ensaio do módulo de resiliência, observou-se que a presença do RCD

associado ao solo produziu um material de módulo de resiliência mais elevado que o solo puro. A presença desses resíduos promoveu uma maior estabilidade do material, elevando o módulo de resiliência em aproximadamente 50 MPa. Os resultados obtidos mostraram o potencial de aplicação do RCD como uma alternativa para aplicação em obras de pavimentos urbanos, de modo que se constatou a sua viabilidade técnica-econômica.

Dilip *et al.* (2013) fizeram um breve histórico do desenvolvimento dos conceitos ligados a projeto e construção de pavimentos antes e depois da década de 60. Destacaram a importância na incorporação de métodos de confiabilidade e procedimentos probabilísticos de projeto para a concepção, a reabilitação e a manutenção de pavimentos. Os autores chamam a atenção para o fato de que, na concepção mecanicista-empírica (ME) de pavimentos, os critérios de concepção aplicados na maioria dos métodos analíticos de projeto protegem a estrutura apenas contra trincas por fadiga no revestimento e afundamento de trilhas de rodas por deformação permanente do subleito, fatores geralmente considerados como eventos de falha independentes. Afirmam, ainda que, com uma análise de sensibilidade, o parâmetro mais crítico que afeta a confiabilidade de critérios de projeto de falhas tanto para fadiga quanto para trilhas de roda foi identificada como a espessura da camada de revestimento. A disposição de incorporar os métodos probabilísticos na concepção de pavimentos é reiterada pelo fato de que a probabilidade de ocorrência simultânea das duas falhas acontecerem é de aproximadamente 19%, o que é muito próximo ao das probabilidades de falhas de componentes. Assim, o estudo mostra que é fundamental considerar a probabilidade conjunta de falha na análise de confiabilidade do sistema de pavimento. Além disso, esta probabilidade de ocorrência simultânea de falhas é visto por aumentar consideravelmente com pequenos incrementos nas cargas de tráfego médios. Isso resulta em mais amplos limites de confiabilidade do sistema. Neste estudo realizaram-se a análise de confiabilidade para uma seção de pavimento flexível para estes critérios de falha com base no método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) e no método de confiabilidade de segunda ordem (SORM).

Chen *et al.* (2011) documentaram os módulos elásticos da camada de pavimento obtidos a partir de oito investigações medidas com FWD e testes de penetração de cone dinâmico (DCP). Além dos ensaios de campo, realizaram testes laboratoriais para avaliar as reações dos materiais de base aos estabilizadores (cal ou cimento) e a susceptibilidade à umidade. Destacaram que o critério de densidade para materiais de base é a prática mais comum no controle e garantia de qualidade para a construção de pavimentos. Destacam quem, apesar disso, existem casos em que o material de base atendeu ao requisito densidade, mas

apresentou uma falha prematura (cisalhamento). Com base nos resultados da análise, recomendam as seguintes faixas para módulos de resiliência de base para pavimentos flexíveis, com tráfego projetado para carga equivalente por eixo único com mais de $2,5 \cdot 10^6$ passadas: maior que 345 MPa (50 ksi) para a base de agregado; e de 1033 MPa (150 ksi) a 3445 MPa (500 ksi) para as bases estabilizadas.

Fonseca (2013) analisou as soluções de reforço estrutural para pavimentos flexíveis. Utilizou, para isso, método mecanístico empírico e módulos de resiliência obtidos por programas de retroanálise de bacias deflectométricas. As especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), norteiam a restauração de rodovias federais com base no Índice de Suporte Califórnia (CBR) e nas medidas de deflexões recuperáveis do pavimento. O autor, por retroanálise e com o uso do programa SisPav, fez a previsão da vida útil desses pavimentos, atendendo às especificações do DNIT. Nesta pesquisa, verificou-se que a estrutura dimensionada para uma vida útil de dez anos, nem sempre atende este prazo, com as hipóteses e critérios admitidos pelo dimensionamento empírico-mecanístico. Ao retroanalisar o pavimento com o programa SisPav, algumas estruturas projetadas mostraram-se potencialmente inadequadas quanto à compatibilidade de rigidez das camadas. Também não foi possível restabelecer a condição estrutural do pavimento somente pela execução de uma camada de reforço.

Lopes (2012) propôs uma metodologia simplificada de avaliação da condição estrutural de pavimentos asfálticos com base granular. O autor utilizou as medições de bacias deflectométrica obtidas com FWD e, conhecidos esses parâmetros, estimou a sua vida remanescente. Nesse trabalho alerta para o fato de que, duas bacias de deflexão, podem possuir condições estruturais diferentes, mesmo expressas por um valor de deflexão máxima recuperável (D_0) igual. O autor criou ábacos a partir de parâmetros deflectométricos do estudo paramétrico realizado por Lopes (2012). Utilizou informações como a deflexão máxima (D_0) e o raio de curvatura (R). Propôs a avaliação com base no índice de curvatura da superfície $SCI=D_0-D_{30}$, no índice de danos à base $BDI=D_{30}-D_{60}$, e no índice de curvatura da base, $BCI=D_{60}-D_{90}$. Esses ábacos permitiram indicar estruturas diferentes para pavimentos pesquisados com valores iguais de D_0 . Nesses pavimentos foram observadas deficiências em camadas diferentes, apesar de terem tido mesmas propostas de soluções de restauração de suas estruturas pela análise com base em D_0 (DNER PRO-11/79) para o cálculo de reforço.

Monismith (2012) trata, em seu trabalho, da evolução dos conceitos ligados às análises mecanicistas de pavimentos; sobre a caracterização de materiais usados na estrutura de pavimentos e rigidez das camadas; sobre a caracterização de materiais e sobre a evolução dos

materiais da estrutura de pavimentos em relação às características de rigidez; sobre as metodologias de projeto de pavimento mecanicista-empírico; sobre testes acelerados de pavimento; avaliação não destrutiva de pavimento (viga Benkelman, FWD) e projetos de reestruturação; gerenciamento de pavimentos; e, melhoria de práticas de construção. Por fim, o autor faz também algumas observações sobre a educação e a formação em engenharia de pavimentação.

Santos (2011) realizou pesquisa pela observação da variabilidade dos parâmetros de construção e de desempenho de um pavimento, sob uma abordagem probabilística. Em seus estudos, utilizou o Método Monte Carlo. Com isso, propôs alguns procedimentos para a determinação da confiabilidade da estrutura do pavimento asfáltico baseado nos métodos do DNIT e da AASTHO. O autor lembra que a utilização de técnicas e elementos da análise probabilística em projetos de pavimentação ainda é pouco abordada no Brasil. Após aplicar o método de simulação de Monte Carlo, o autor concluiu que a equação de dimensionamento do DNIT é inadequada para o tráfego pesado, e que os valores de CBR são elevados, atestando um comportamento diferente para a equação da AASTHO. Resulta disso em um valor para o desvio padrão de 0,41 para a distribuição do tráfego admissível para pavimento asfáltico para a AASTHO. Já para a equação do DNIT esse valor é de 1,0. O autor atesta que o valor para o desvio padrão igual a 1,0 é menos adequado para a consideração da variabilidade dos diversos parâmetros pertinentes ao dimensionamento.

Chen e Zhang (2010) realizaram uma revisão em profundidade de modelos de previsão de vida útil de pavimentos flexíveis pela retroanálise e abordaram um novo modelo de classificação que pode facilitar um padrão de seleção para os engenheiros de pavimento. Chen e Zhang consideram que os procedimentos para prever a vida útil restante de um pavimento ainda estão em fase preliminar. Constatam, ainda, que a determinação, a unificação dos valores limites dos índices de desempenho do pavimento e o desenvolvimento de modelos simples e confiáveis são cruciais para a pesquisa da expectativa de vida futura do pavimento.

Gedafa *et al.* (2010) estimaram a vida útil remanescente de pavimentos baseados em deflexões produzidas pelo primeiro sensor do FWD. Para isso, recolheram dados de deflexão com um equipamento FWD entre 1998 e 2006. Foram mais de 400 mil pontos de dados de deflexão coletados, entre 4 a 7 pontos por quilômetro. Os principais objetivos deste estudo foram desenvolver e validar modelos de vida útil remanescente de pavimentos usando a espessura da camada, o tráfego, a tensão, a deflexão, e dados estruturais. Além disso, investigaram a relação entre a deflexão do revestimento do pavimento e a sua vida útil remanescente. Os resultados mostraram que existe uma relação sigmoideal entre a vida útil

remanescente do pavimento e a deflexão central (primeiro sensor do FWD) para categorias de pavimentos com carga média a baixo volume de tráfego e os resultados mostram uma diminuição na vida útil depois de certo valor do limite da deflexão central. A análise de sensibilidade tem sido feita para os modelos sigmoidais de vida útil remanescente.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo propõe-se expor uma síntese dos conceitos acerca do Método GPR e do meio que foi escolhido para o estudo da propagação da onda eletromagnética (EM) no seu interior: o pavimento rodoviário.

Pretende-se, portanto, primeiramente, apresentar a teoria da propagação da onda EM, fundamental para o entendimento do método GPR, assim como as Equações de Maxwell e as relações constitutivas de propriedades eletromagnéticas dos materiais. Em seguida, descrever sucintamente os modos e os parâmetros de aquisição de dados com o GPR. Acerca dos conceitos relacionados aos pavimentos rodoviários, procura-se caracterizar os tipos de pavimentos, rígido e flexível, os parâmetros associados a sua estrutura e as formas de dimensionamento de pavimentos flexíveis. A reanálise e a análise probabilística dos pavimentos terão os seus conceitos mencionados neste capítulo, com o propósito de permitir o entendimento do estudo que se premede fazer neste trabalho.

3.1 GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

O radar de penetração no solo ou *Ground Penetrating Radar* (GPR) é um método geofísico que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas (EM) para imagear contrastes elétricos de objetos e materiais presentes no subsolo. Neste método as ondas eletromagnéticas são rapidamente irradiadas para o meio, por intermédio de uma antena transmissora. Os contrastes entre as propriedades elétricas do meio fazem com que partes do sinal sejam refletidas, refratadas e difratadas para a superfície. Este sinal refletido é então registrado e armazenado em uma unidade de controle. O registro contínuo de traços amostrados, ao longo de uma seção, gera um radargrama, que após a aplicação da rotina de processamento, converte-se em uma seção de alta resolução do meio.

O intervalo da frequência da radiação eletromagnética é bastante amplo, abrange frequências entre 10 Hz, correspondente às micro pulsações atmosféricas, passando pelas frequências de radar, entre 10^7 e 10^{10} Hz, e atingindo frequências da ordem de 10^{18} e 10^{24} Hz, que correspondem aos Raios-X e Raios- γ . A faixa de frequência dos sistemas de GPR (Figura 3.1) posiciona-se entre 10 MHz e 2500 MHz (SAARENKETO, 2009). Há, entretanto, equipamentos que trabalham com frequências centrais de até 3000 MHz, bem próximo ao

limite de operação do equipamento, que é a faixa de microondas.

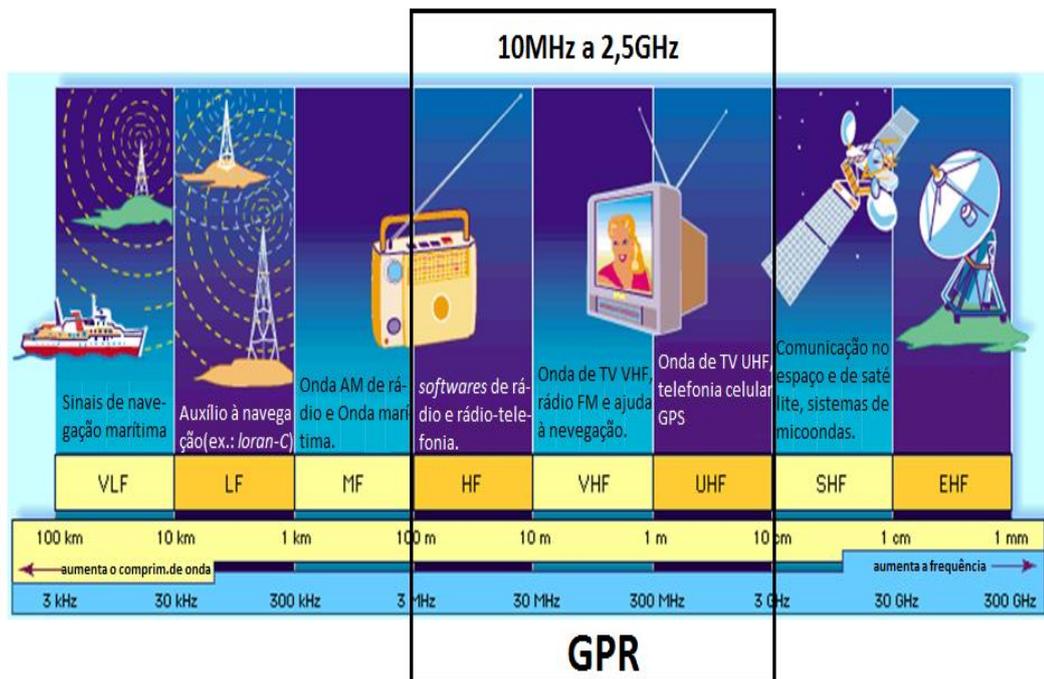


Figura 3.1 - Espectro eletromagnético com enfoque na faixa de operação dos sistemas de GPR.
 Fonte: Adaptado de *Encyclopédia Britannica, Inc.*, 1999.

O método GPR é usado em estudos geológicos (MELLET, 1995; VAN DAM, 2001; NEAL, 2004), geotécnicos (SILVA, 2004; ORLANDO *et al.*, 2010; PESSOA, 2012), ambientais (BENSON, 1995; DANIELS *et al.*, 1995; PORSANI *et al.*, 2004a), assim como em investigações arqueológicas (CONYERS e GOODMAN, 1997; RODRIGUES *et al.*, 2009) e investigação forense (STRONGMAN, 1992; HAMMON III *et al.*, 2000), dentre outros.

A teoria de propagação de ondas eletromagnéticas é a base para o entendimento do método GPR, essencialmente as equações de Maxwell e as relações constitutivas de propriedades eletromagnéticas dos materiais (DANIELS, 1996; ANNAN, 2001; JOL, 2009). O desenvolvimento matemático da teoria do GPR encontra-se nos trabalhos de Annan (1992; 2001) e Porsani (1999).

O campo eletromagnético (EM) é composto de dois vetores: o vetor campo elétrico (\vec{E}) e o vetor campo magnético (\vec{H}), conforme ilustrado na Figura 3.2. Para Daniels (2004), a propagação de ondas EM é representada por uma equação de onda unidimensional, ao longo do eixo-z, com o campo elétrico e o magnético, perpendiculares entre si. O campo elétrico atua como principal fator de alteração do campo eletromagnético, uma vez que variações magnéticas são, em sua maioria, muito fracas (DANIELS *et al.*, 1988).

As ondas eletromagnéticas possuem a particularidade de se propagarem à velocidade da luz c ($\approx 2,9979 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$) através do espaço sem necessitarem de matéria sólida (propagação no vácuo). A radiação eletromagnética caracteriza-se pelas mesmas propriedades inerentes ao movimento de qualquer onda periódica (ver Figura 3.3): frequência (f); período de onda (T); comprimento de onda (λ) e amplitude (A).

O comprimento de onda λ tem uma relação inversa com a frequência f , a velocidade de repetição de qualquer fenómeno periódico. Quando se lida com radiação eletromagnética no vácuo, essa velocidade é igual à velocidade da luz ($c=0,3 \text{ m/ns}$); para sinais (ondas) no ar, essa velocidade é a velocidade a que a onda viaja. Esta relação é dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (3.1)$$

As equações de Maxwell descrevem o movimento oscilatório do campo eletromagnético. A primeira equação de Maxwell, conhecida como Lei de Ampère, descreve a propagação do campo magnético (\vec{H}), cuja unidade é ampères por metro (A/m), em função das correntes de condução e de deslocamento:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

Onde $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ é o operador diferencial gradiente ou “del”, \vec{J} é a densidade de corrente de condução, A/m²; e $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ é, a corrente de deslocamento.

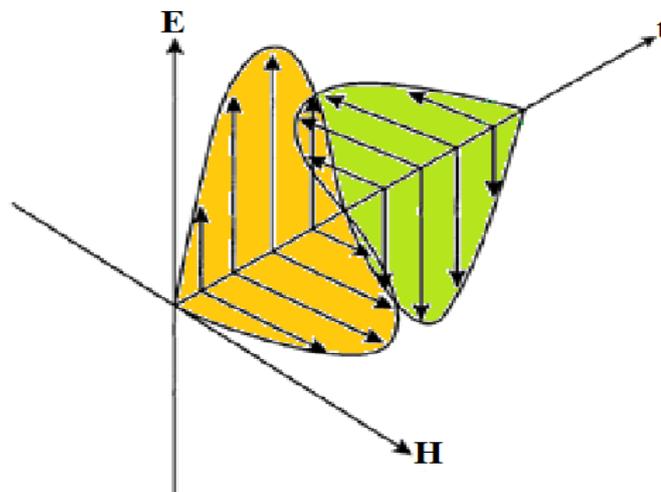


Figura 3.2 - Representação vetorial da propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre.
Fonte: DANIELS, 2004.

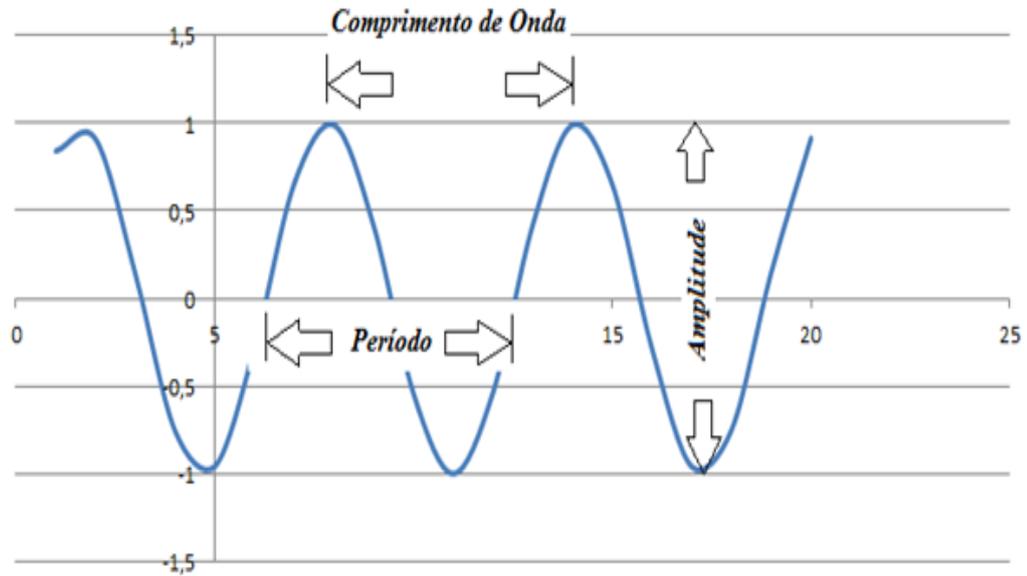


Figura 3.3 - Componentes principais de uma onda eletromagnética.

Na segunda equação de Maxwell, conhecida como Lei de Faraday, o campo elétrico (\vec{E}), cuja unidade é volt por metro (V/m), é produzido pela variação do campo indução magnética (\vec{B}) em relação ao tempo:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

As equações de Maxwell descrevem o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio. Essas equações não estão associadas às propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética), sendo necessário introduzir as relações constitutivas do meio (PORSANI, 1999).

Borges (2007) descreve a primeira relação constitutiva do meio, conhecida como Lei de Ohm (Equação 3.4), que relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao campo elétrico (\vec{E}). Nos solos e nas rochas, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ), expressa em Siemens por metro (S/m), que é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987).

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (3.4)$$

Descreve a segunda relação constitutiva do meio (Equação 3.5) que relaciona diretamente o campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento, ou à polarização (\vec{D}), e a

constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ), expressa em farads por metro (F/m). O deslocamento é caracterizado pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas da posição de equilíbrio neutro, para outra posição, polarizada, devido à influência de um campo elétrico externo. A corrente de deslocamento, ou de polarização é a taxa de variação da densidade de momentos de dipolo do meio, pelo tempo.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.5)$$

Nas aplicações com o GPR usa-se a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), em alguns casos denominada de constante dielétrica (k), que é a razão entre permissividade dielétrica do material (ϵ) e a permissividade dielétrica do vácuo, $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

A condutividade elétrica afeta diretamente a atenuação e a permissividade dielétrica, afeta a propagação das ondas de radar (ANNAN, 1996). Ward e Hohmann (1987) sugerem que a condutividade é dominante para ondas EM de baixas frequências (<1 MHz), enquanto que em altas frequências (>1 MHz) a permissividade dielétrica é dominante.

A terceira relação estabelece a dependência direta do campo magnético (\vec{H}) com o campo indução magnética (\vec{B}),

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde μ é uma constante de proporcionalidade, chamada permeabilidade magnética do material, expressa em newtons por ampére quadrado ou henries por metro (H/m). A permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos é essencialmente independente da frequência e não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do vácuo (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987); (μ) e (ϵ) são constantes e independentes do tempo, sendo $\mu = \mu_0$ para a maioria das rochas, onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ é a permeabilidade magnética do espaço livre (ANNAN, 1996). Ainda segundo Annan (1992), os efeitos de uma forte permeabilidade magnética podem não ser totalmente ignorados nas seções de GPR.

Substituindo-se as relações constitutivas nas equações de Maxwell; supondo que os campos \vec{E} e \vec{H} variam harmonicamente com o tempo na forma $e^{i\omega t}$, e que $\frac{\partial}{\partial t} \equiv i\omega$, onde $\omega = 2\pi f$; considerando-se que não há acúmulo de cargas em um meio condutor, obtém-se a equação da onda plana para o campo elétrico. O resultado é que as propriedades das rochas (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética) e a frequência, agrupam-se em um único termo, conhecido como “número de onda”, expressa pela formulação:

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - i \omega \mu \quad (3.8)$$

Na maioria dos métodos eletromagnéticos, a faixa de frequência e a faixa dos valores dos parâmetros, (μ) e (ε), fazem com que a relevância do primeiro termo da equação do número da onda seja tão pequena, que a corrente de deslocamento pode ser desprezada. Por outro lado, se a frequência for muito elevada, a corrente de condução pode ser desprezada. Para as altas frequências do GPR ($\geq 1\text{MHz}$), nenhum dos dois termos de k^2 deve ser desprezado.

Este meio é definido como meio dielétrico de baixa perda, que é mais favorável ao funcionamento do GPR (ANNAN, 1996; PORSANI, 1999). Nessas frequências o termo (k) é descrito conforme a Equação 3.10, onde (α) representa a atenuação e (β) a constante de propagação no meio (STRATTON, 1941).

$$k = \alpha + i\beta \quad (3.10)$$

onde (α) e (β) são definidos nas equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.11)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \quad (3.12)$$

Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM, num determinado meio são a velocidade (v) e a atenuação (α). Substituindo-se as relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell, obtém-se as equações de propagação da onda

eletromagnética num determinado meio.

Para condutividades menores que 100mS/s, a velocidade permanece em um valor quase constante e o campo eletromagnético propaga-se sem apresentar dispersão (DAVIS e ANNAN, 1989). Para materiais geológicos com baixa perda, o campo eletromagnético propaga-se com uma velocidade que depende principalmente da constante dielétrica relativa do meio, de acordo com a seguinte expressão:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (3.13)$$

onde c é a velocidade da luz, dada por $c=2,997.10^8$ m/s $\cong 0,3$ m/ns e (ϵ_r') é a parcela real da constante dielétrica dos materiais. O comprimento de onda (λ) é dado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (3.14)$$

Na prática, a constante de atenuação (α) é expressa por:

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (3.15)$$

Onde (σ_0) é a condutividade em corrente contínua em mS/m.

A amplitude do coeficiente de reflexão é normalmente escrita em termos da impedância elétrica (Z). Uma onda se propagando através de um meio é atenuada com a distância até encontrar uma interface na qual ocorra um contraste na impedância elétrica. Na interface, uma parte do sinal é refletida, e a outra parte do sinal é transmitida.

A impedância (Z_{xy}) é definida pela relação entre o campo elétrico $E_x(z,t)$ e o campo magnético $H_y(z,t)$:

$$Z_{xy} = \left| \frac{E_x(z,t)}{H_y(z,t)} \right| \quad (3.16)$$

Para uma incidência normal, o ângulo de incidência é igual a zero, deste modo a amplitude do coeficiente de reflexão do GPR é escrita em função das impedâncias dos meios, como expresso por:

$$r_{GPR} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.17)$$

Onde (Z_1) e (Z_2) são as impedâncias elétricas acima e abaixo da interface refletora, respectivamente. O coeficiente de reflexão depende principalmente das propriedades elétricas do meio, ou seja, da condutividade elétrica e da permissividade dielétrica (Tabela 3.1). Para as aplicações práticas, calcula-se o coeficiente de reflexão pela relação entre as constantes dielétricas dos meios, da seguinte forma:

$$r_{GPR} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - \sqrt{\varepsilon_2'}}{\sqrt{\varepsilon_1'} + \sqrt{\varepsilon_2'}} \quad (3.18)$$

A frequência do sinal emitido e as propriedades físicas dos materiais, principalmente, a condutividade elétrica (σ), a permissividade elétrica (ε) e a permeabilidade magnética (μ), determinam a propagação do sinal e a profundidade investigada.

Os materiais com elevado valor de condutividade elétrica como, por exemplo, água salgada, solos argilosos e minérios condutores, atenuam muito o sinal eletromagnético o que provoca uma perda das altas frequências transmitidas. Já em ambientes dielétricos a atenuação será menor, porque esses materiais têm baixa condutividade elétrica.

Tabela 3.1 - Permissividades dielétricas (parte real, $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2$), impedâncias (Z_1, Z_2) e coeficiente de reflexão (R_{GPR}) de camadas típicas de pavimentos (Dados extraídos de GORDON, 1998; e ANNAN, 1992).

Interface	ε'_1	ε'_2	Z_1	Z_2	R_{GPR}
Asfalto seco - solo úmido	2 - 4	25	267	75	-0,56 / -0,37
Asfalto seco - solo seco	2 - 4	4	267	189	-0,17 / 0,00
Asfalto molhado - solo úmido	6 - 12	25	154	75	-0,34 / -0,18
Asfalto molhado - solo seco	6 - 12	4	154	189	0,10 / 0,26
Concreto seco - solo úmido	4 - 10	25	189	75	-0,43 / -0,22
Concreto seco - solo seco	4 - 10	4	189	189	0,00 / 0,22
Concreto molhado - solo úmido	10 - 20	25	119	75	-0,23 / -0,05
Concreto molhado - solo seco	10 - 20	4	119	189	0,23 / 0,38

Segundo Daniels (1996) e Gonçalves e Ceratti (1998) as velocidades de propagação da onda eletromagnética no concreto, no asfalto e em solos encontrados em camadas subjacentes da estrutura de pavimentos variam de 0,067 a 0,212 m/ns (Tabela 3.2). Essa velocidade é importante na determinação das espessuras das camadas dos pavimentos.

Tabela 3.2 – Intervalos de velocidades de propagação da onda eletromagnética em alguns materiais constituintes de camadas de pavimentos (DANIELS, 1996; GONÇALVES e CERATTI, 1998).

	Daniels (1996)	Gonçalves (1998)
Concreto seco	0,095 - 0,150	-
Concreto molhado	0,067 - 0,095	-
Asfalto seco	0,150 - 0,212	-
Asfalto molhado	0,087 - 0,122	-
CBUQ	-	0,104 – 0,129
PMQ	-	0,090 – 0,099
Macadame	-	0,085 – 0,104
Solo cimento	-	0,091 – 0,097
Areia	0,122 – 0,150	0,079 – 0,100
Saibro	-	0,074 – 0,098
Argila	0,122 – 0,212	0,073 – 0,089

3.1.1 Modos de Aquisição

O sistema de aquisição de dados de GPR, ilustrado na Figura 3.4, consiste basicamente em uma unidade que controla a geração e o registro do sinal de radar (unidade de controle), um conjunto de antenas transmissora e receptora (transmissor, receptor e antenas), e uma unidade de armazenamento de dados (computador). A antena transmissora tem a função de governar a forma temporal do pulso de radiação, e a antena receptora mede a intensidade do sinal recebido em função do tempo.

As principais técnicas de aquisição de dados de GPR são: Perfil de reflexão com afastamento constante (*common offset*, que usa antenas biestáticas); Sondagem de velocidade do tipo *Common Mid Point* (CMP); Sondagem de velocidade do tipo *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR); e, Transiluminação ou tomografia de radar.

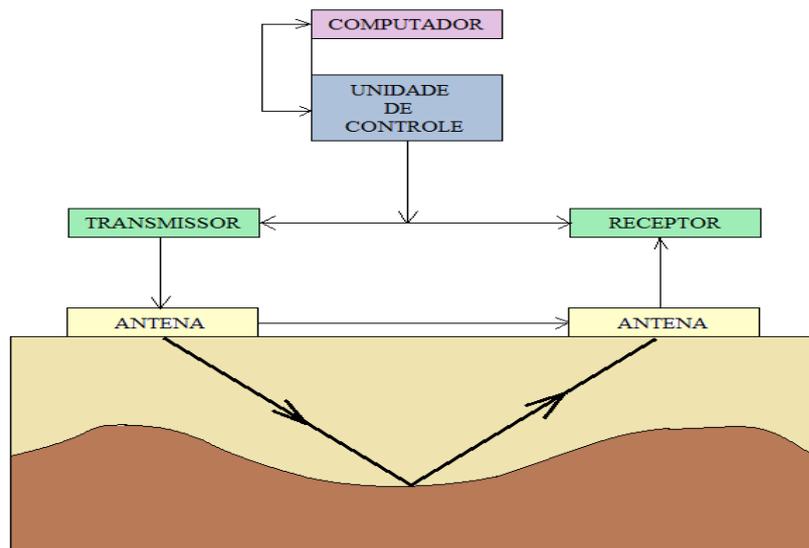


Figura 3.4 - Diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR.
Fonte: BORGES, 2013.

Nos perfis *common offset* ou *constant offset*, usado em todas as aquisições de dados com GPR neste trabalho, o afastamento entre as antenas permanece constante ao longo da aquisição. O resultado é uma imagem de GPR (radargrama) que registra a variação de amplitude do sinal eletromagnético em função do tempo de trânsito duplo (Figura 3.5).

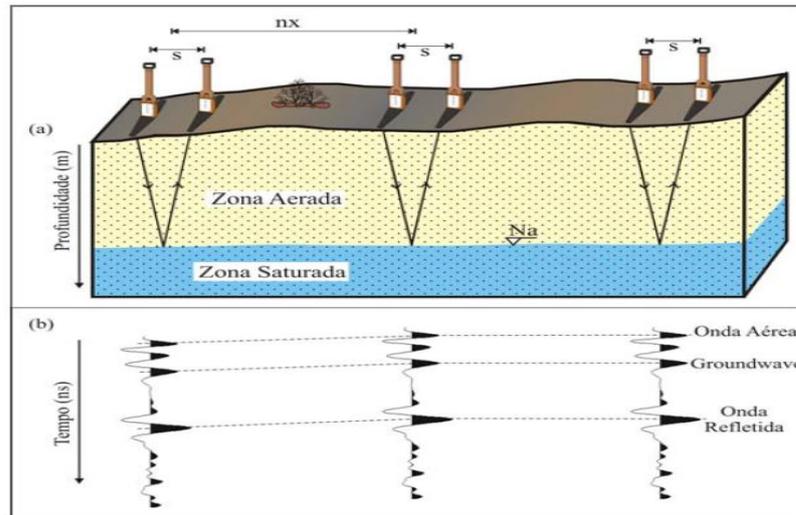


Figura 3.5 - (a) Aquisição de dados no modo *common offset* e (b) traços de GPR mostrando a chegada das ondas nas interfaces
 Fonte: BORGES, 2007.

Nas sondagens de velocidade (Figura 3.6), um mesmo ponto ou área é investigado com diferentes distâncias entre as antenas. Na sondagem do tipo *Common Mid Point* (CMP) as duas antenas deslocam-se simetricamente em sentidos opostos a partir de um ponto central, o que possibilita a investigação do meio ao longo do eixo vertical central (Figura 3.6a). Na *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR), uma antena permanece fixa e a outra é afastada gradativamente, o que gera o imageamento de uma área (Figura 3.6b).

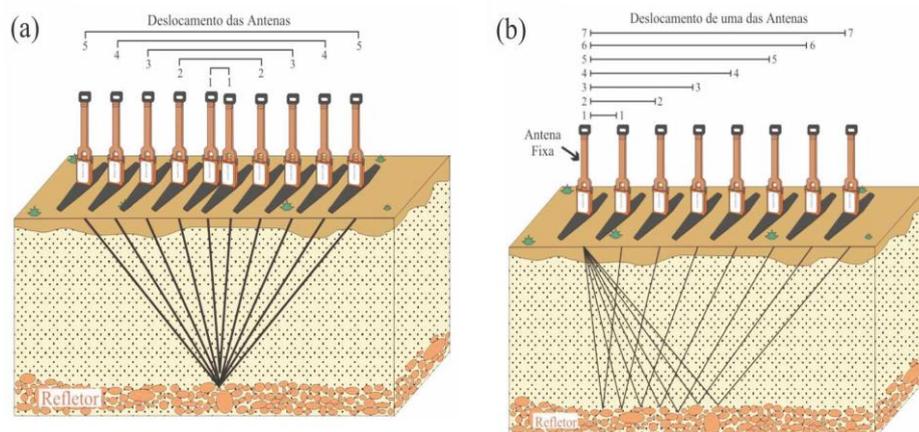


Figura 3.6 - Representação gráfica de aquisições de GPR do tipo sondagem de velocidade: CMP e (b) WARR.
 Fonte: BORGES, 2007.

A técnica da transluminação é utilizada principalmente no interior de poços, e é dividida em quatro categorias: o modo *common offset*, em que as antenas se deslocam no interior do poço registrando sua seção radial (Figura 3.7a); a técnica direta, em que as antenas, transmissora e receptora, são colocadas em lados opostos do poço com uma distância d , conhecida, e gera como resultado uma seção de tempo de trânsito direto (Figura 3.7b); a *Vertical radar profiling* (VRP) onde a antena transmissora permanece posicionada na superfície enquanto a antena receptora se desloca ao longo do poço (Figura 3.7c); e a técnica da transluminação variável, em que as duas antenas são posicionadas dentro do poço: uma das antenas permanece parada enquanto que a outra percorre a área investigada (Figura 3.7d). Como a distância entre as antenas é conhecida, as velocidades médias de cada trajetória do raio podem ser determinadas (BORGES, 2007).

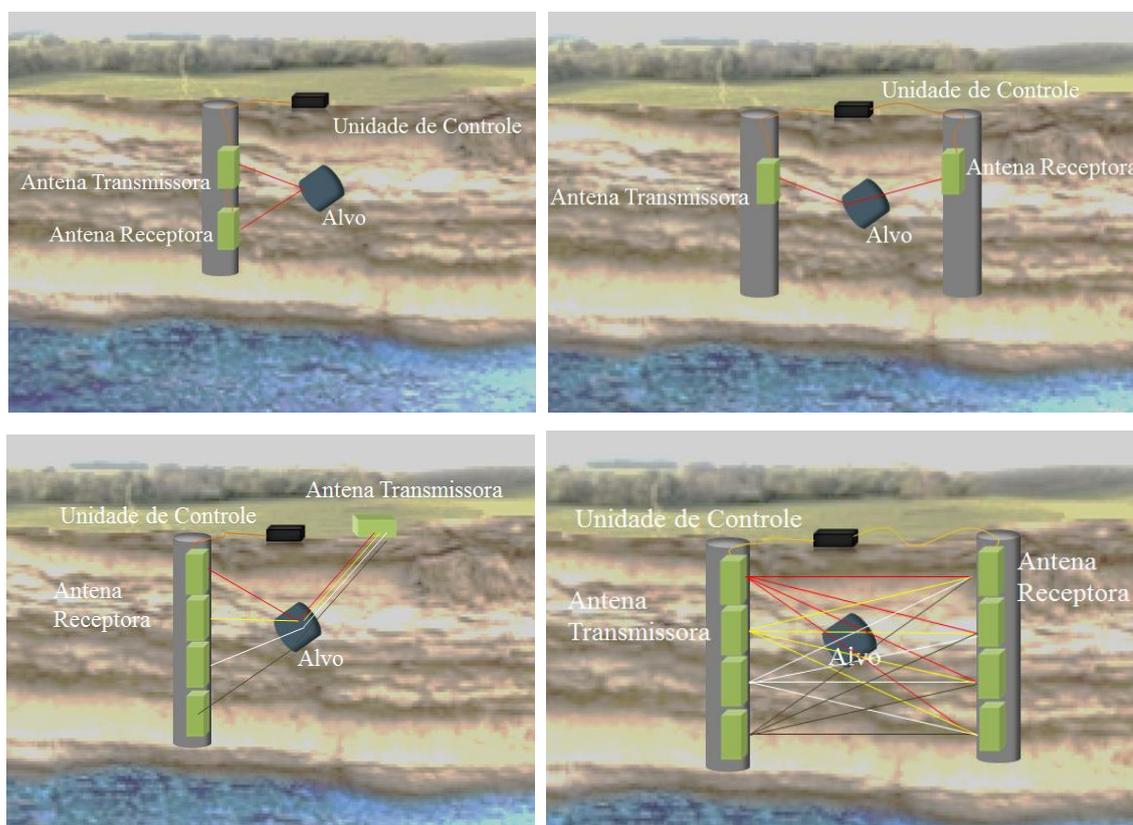


Figura 3.7 – Esquema de transluminação (a) *common offset*; (b) tomografia direta; (c) *Vertical radar profiling*; (d) transluminação variável.
 Fonte: Modificado de BORGES, 2007.

3.1.2 Parâmetros de Aquisição

O desenvolvimento de pesquisas com o GPR divide-se em três etapas distintas: a aquisição, o processamento e a interpretação dos dados.

A aquisição determina o sucesso ou insucesso das demais etapas, visto que dados mal

registrados influenciam na qualidade dos resultados. Os parâmetros mais importantes na aquisição são: o tipo de antena (blindada ou não blindada); a profundidade de investigação e a frequência central da antena; a resolução (amostragem espacial e temporal; o número de amostras; a frequência de amostragem; e a janela temporal).

3.1.2.1 Tipos de antenas

As antenas podem ser não blindadas e, nesse caso pode-se trabalhar com diversas orientações entre as antenas transmissora e receptora e podem-se variar as distâncias entre elas, porém estão vulneráveis a diversas interferências de ruídos eletromagnéticos externos (Figura 3.8).

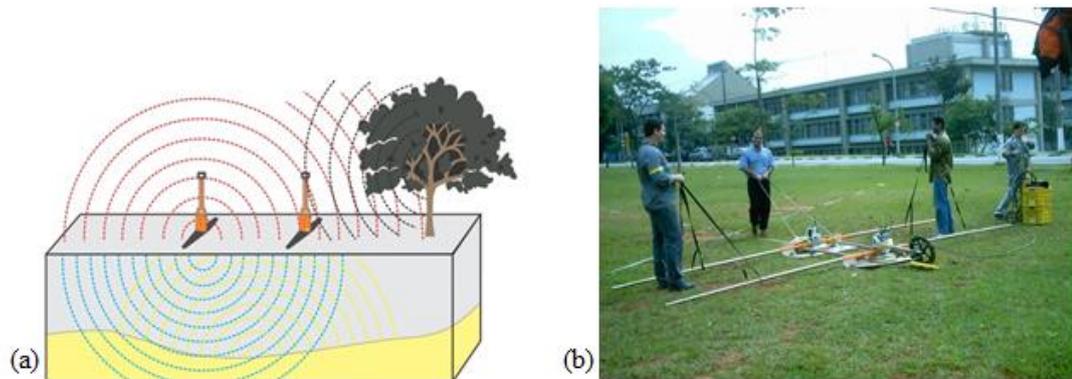


Figura 3.8 - (A) Esquema de funcionamento de uma antena não blindada. (B) registro fotográfico de uma antena não blindada de 80MHz em operação.

Fonte: BORGES, 2013.

Os sistemas GPR com antenas blindadas (Figura 3.9) são preferencialmente de alta frequência, e são usados somente na aquisição de perfis de afastamento constante. Nesse caso, ficam alocadas a distância e orientação fixas, no interior de uma caixa que as protege de interferências externas.

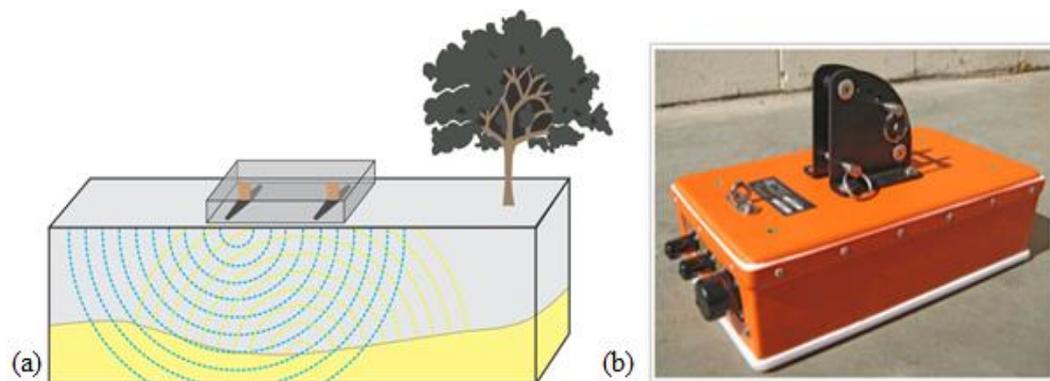


Figura 3.9 - (A) Esquema de funcionamento de uma antena blindada (B) Fotografia de uma antena blindada de 900MHz.

Fonte: BORGES, 2013.

3.1.2.2 Profundidade de Penetração e Frequência Central da Antena

A frequência central da antena (f_c) é um dos principais fatores que determinam a escolha das antenas do GPR. O equipamento possui uma largura da banda do espectro no domínio da frequência (Figura 3.10), que corresponde a um valor mínimo equivalente a aproximadamente 0,5 vezes o valor da frequência central da antena e um valor máximo que pode chegar a 1,5 vezes esse valor (ANNAN, 1992).

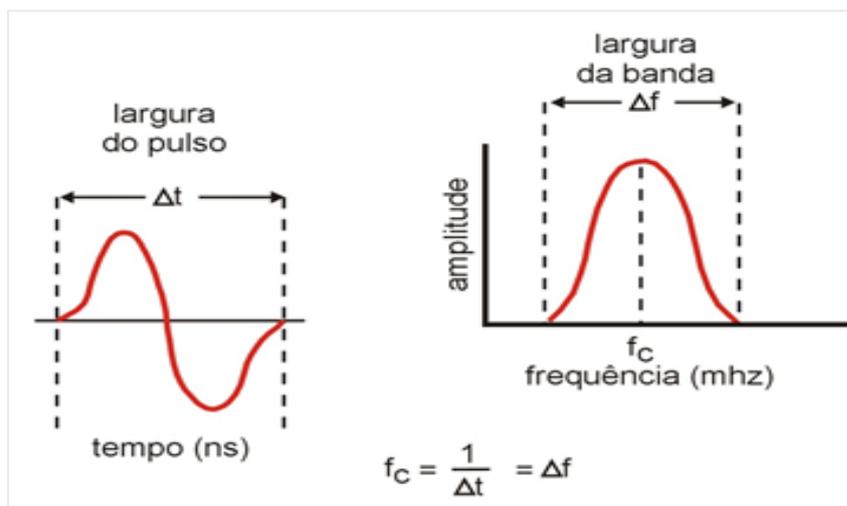


Figura 3.10 - Detalhe de um pulso teoricamente irradiado e sua respectiva faixa de distribuição de frequência entre 0,5 a 1,5 vezes a frequência central da antena.

Fonte: ANNAN, 1992.

A profundidade de penetração depende da frequência utilizada, bem como das propriedades elétricas do meio. Condutividades elétricas elevadas aumentam a atenuação da onda nos materiais e a perda de energia durante a propagação da onda EM, o que diminuirá a profundidade de investigação. Existem inúmeras estimativas de profundidades em função das frequências centrais das antenas e dos solos investigados. O consenso entre os autores é que a profundidade aumenta em função da diminuição da frequência e da constante dielétrica do meio (Tabela 3.3).

Tabela 3.3- Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração (ANNAN, 1992; PORSANI, 1999).

Frequência central (MHz)	Profundidade máxima de penetração (m)	
	ANNAN (1992)	PORSANI (1999)
1000	0,5	1
400	-	2
200	2	4
100	7	25
50	10	30
25	30	40
10	50	50

A banda de frequência registrada e a permissividade dielétrica do meio definem o comprimento de onda no meio:

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r'}} \quad (3.19)$$

Onde, c = velocidade da luz no vácuo (≈ 0.3 m/ns). O comprimento de onda é dependente da frequência e, portanto, quanto maior o comprimento de onda, maior a profundidade de investigação, e menor a resolução.

3.1.2.3 Resolução

A resolução é a habilidade de registrar e mostrar em detalhes (espessura, tamanho, forma e geometria) um objeto. A resolução consiste de dois componentes, a resolução vertical (Δt) e a lateral (Δx), como ilustrado na Figura 3.11.

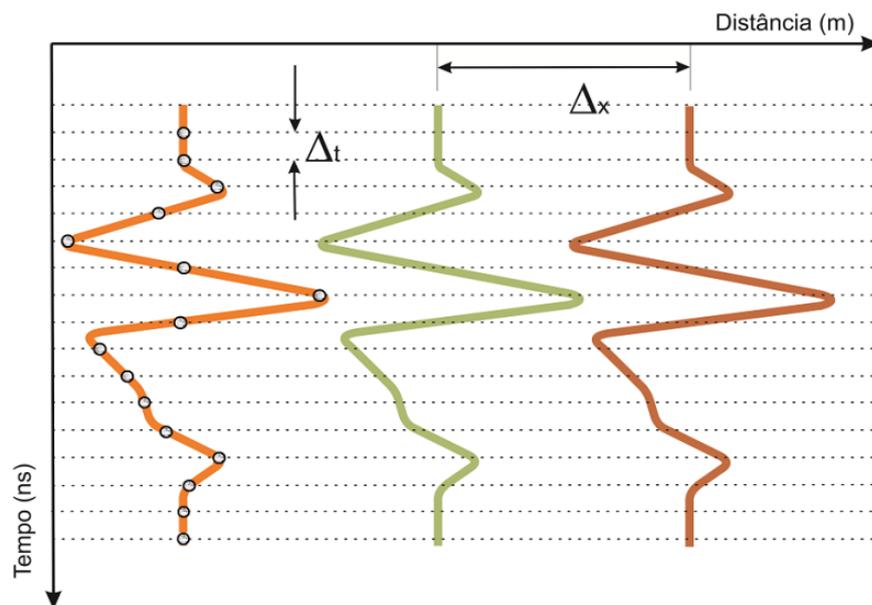


Figura 3.11 – Pulsos de GPR com respectivas representações gráficas dos intervalos de amostragem vertical ou temporal (Δt) e amostragem horizontal ou espacial (Δx).

A resolução vertical é uma medida da capacidade de distinção entre dois sinais adjacentes entre si, no tempo e, de uma forma simples, dependente da frequência. Conyers (2004) afirma que, para além da frequência, a capacidade de detectar um dado objeto, a resolução vertical depende do comprimento de onda, porque estes objetos possuem resolução se a sua dimensão for maior que 1/4 do comprimento de onda irradiada (Tabela 3.4). Para delinear objetos com precisão, faz-se necessário a identificação do topo e base, quando

possível. Deste modo, é necessário que a resolução vertical seja suficientemente alta para identificar, com clareza, as reflexões do topo e da base de um determinado alvo de espessura (h) no meio (ANNAN, 1996; PRADO, 2000).

Tabela 3.4 - Comprimento de onda de sinais de GPR em função da permissividade dielétrica relativa ϵ'_r do meio e da frequência central da antena (CONYERS, 2004).

Permissividade dielétrica relativa (ϵ'_r)	1	5	10	15	20	50	75	100
Comprimento de Onda (m)								
900MHz	0,33	0,15	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03
2400MHz	0,13	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01

A resolução horizontal, segundo Daniels (2004), é inversamente proporcional a $\sqrt{\alpha}$, sendo α o coeficiente de atenuação, e depende da profundidade do refletor, do comprimento de onda durante o percurso percorrido, da frequência central e da distância entre as antenas. Conyers (2004) considera também importante para a resolução horizontal a determinação da área de incidência da onda de radar (*Radar wave footprint*). Segundo este autor, o modo de determinar se um dado objeto é detectado pela onda de GPR consiste na estimativa da área da projeção do foco incidente da onda. Basicamente, um alvo para ser detectado deverá ter uma área igual ou ligeiramente inferior à área de projeção do foco incidente da energia do GPR. A dimensão aproximada da área de projeção da incidência da radiação eletromagnética no solo, a uma dada profundidade, poderá ser estimada a partir da frequência da antena e da permissividade relativa média do solo percolado (Figura 3.12).

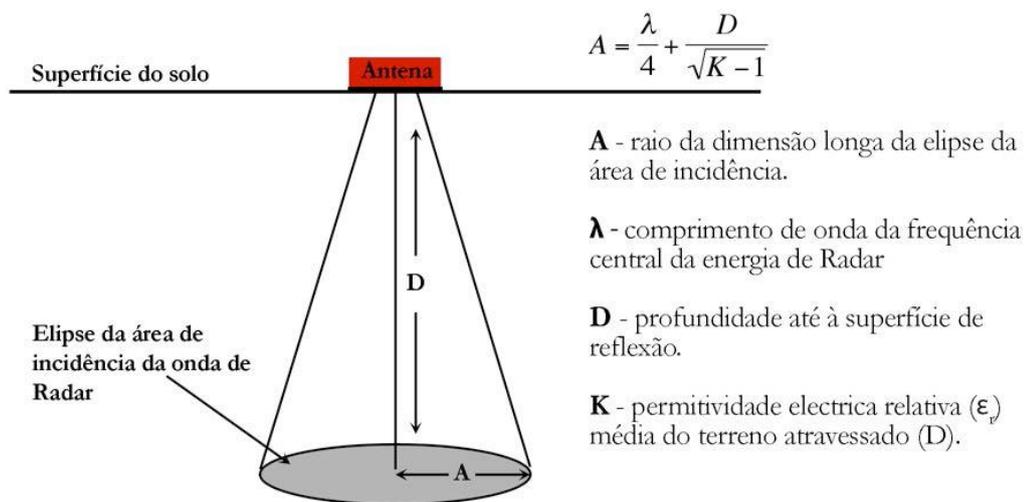


Figura 3.12 - Representação esquemática do cone de dispersão de energia do sinal de GPR, Fonte: GONÇALVES, 2013.

3.1.2.4 Número de Amostras

O número de amostras corresponde à quantidade de pontos amostrados ao longo do tempo, utilizados para reconstruir os pulsos em um traço.

Para a reconstrução de uma série contínua deve-se amostrar o sinal de acordo com o Teorema de Shannon ou de Nyquist. O teorema de amostragem indica que um sinal contínuo pode ser corretamente amostrado, somente se ele não possuir componentes com frequência acima da metade da taxa de amostragem:

$$N_f = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.20)$$

Sendo Δt a amostragem temporal. Com o aumento da quantidade de amostras maior ficará o tamanho do arquivo, exigindo assim uma maior capacidade de armazenamento de dados.

3.1.2.5 Frequência de Amostragem

A frequência de amostragem é o parâmetro que define toda a banda de frequências que será amostrada durante a aquisição dos dados de GPR. Ela deve ser, pelo menos, duas vezes o valor da maior frequência do sinal a ser amostrado e, por segurança esse valor deve ser dobrado.

Em função do intervalo de amostragem (Δt) ser uma função do período máximo amostrado ($T_{m\acute{a}x}$) em uma frequência máxima registrada ($f_{m\acute{a}x}$) de $1,5f_c$, a frequência de amostragem deve ser no mínimo, seis vezes o valor nominal da frequência da antena utilizada e, no máximo, vinte vezes.

3.2 PAVIMENTOS

O Manual do DNIT (2006) define o termo pavimento como uma superestrutura constituída de camadas de espessuras finitas, assentados sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designado de subleito. Sua estrutura completa pode ser decomposta em camadas superpostas, denominadas de subleito, ou terreno natural; regularização, ou correção de falhas; reforço do subleito, ou camada adicional; sub-base, ou camada suplementar; base, ou suporte estrutural; e revestimento, ou capa de rolamento. O pavimento tem finalidade: (a) estrutural, resistindo e

transmitindo as cargas impostas pelo tráfego; (b) funcional, permitindo o conforto ao rolamento; (c) de segurança, fornecendo interação adequada entre pneu e o pavimento e (d) econômica, resultando em custos de construção e operação aceitáveis. Os pavimentos podem ser classificados, basicamente em rígidos, semirrígidos e flexíveis. Os pavimentos semirrígidos cuja definição dada pelo DNIT é: “Pavimento que tem uma deformabilidade maior que o rígido e menor que o flexível, constituído de uma base semi-flexível (solo cal, solo-cimento, solo alcatroado, etc.) e de camada superficial flexível (concreto asfáltico, tratamento superficial betuminoso).

Um pavimento quando solicitado por uma carga rolante, isto é, uma roda pneumática de um veículo com carga Q que se desloca com velocidade v , recebe uma tensão vertical σ (compressão) e uma tensão horizontal τ (cisalhamento). A tensão σ é diluída pelo pavimento (σ_0 é a tensão inicial), de modo que o subleito recebe uma tensão bem menor σ_1 que deve ser compatível com a resistência do mesmo. A tensão τ agindo na superfície do pavimento exige que a mesma apresente uma coesão mínima (Figura 3.13). A superfície deve ser também, impermeável. A tensão σ_1 é uma tensão de tração na fibra inferior do revestimento.

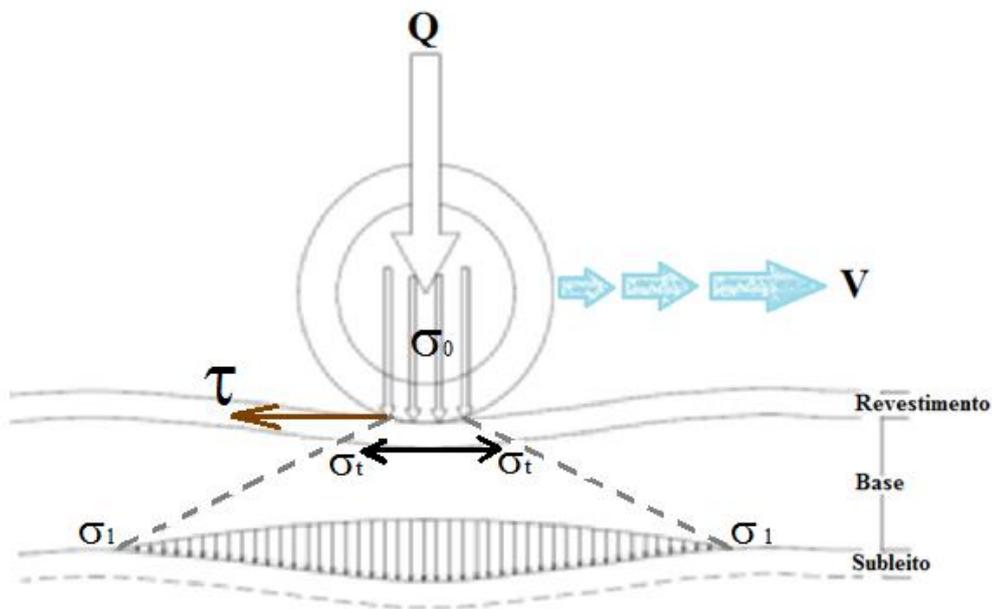


Figura 3.13 - Esquema da seção transversal de um pavimento.

Pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006). Esse revestimento é constituído por placas de concreto de cimento Portland (Figura 3.14), com uma única camada que seja capaz de, simultaneamente, resistir e diluir a tensão vertical de σ_0 para σ_1 , resistir a tensão horizontal τ

e ser razoavelmente impermeável (PINTO e PREUSSLER, 2002). O revestimento do pavimento de concreto simples é uma camada constituída por placas de concreto Portland, que desempenham simultaneamente as funções de base e revestimento. As placas são não-armadas ou eventualmente com armadura sem função estrutural. As placas de concreto devem assentar sobre uma sub-base, executada com material e espessura definidos no projeto, que não deve apresentar expansibilidade nem ser bombeável, assegurando às placas um suporte uniforme ao longo do tempo.

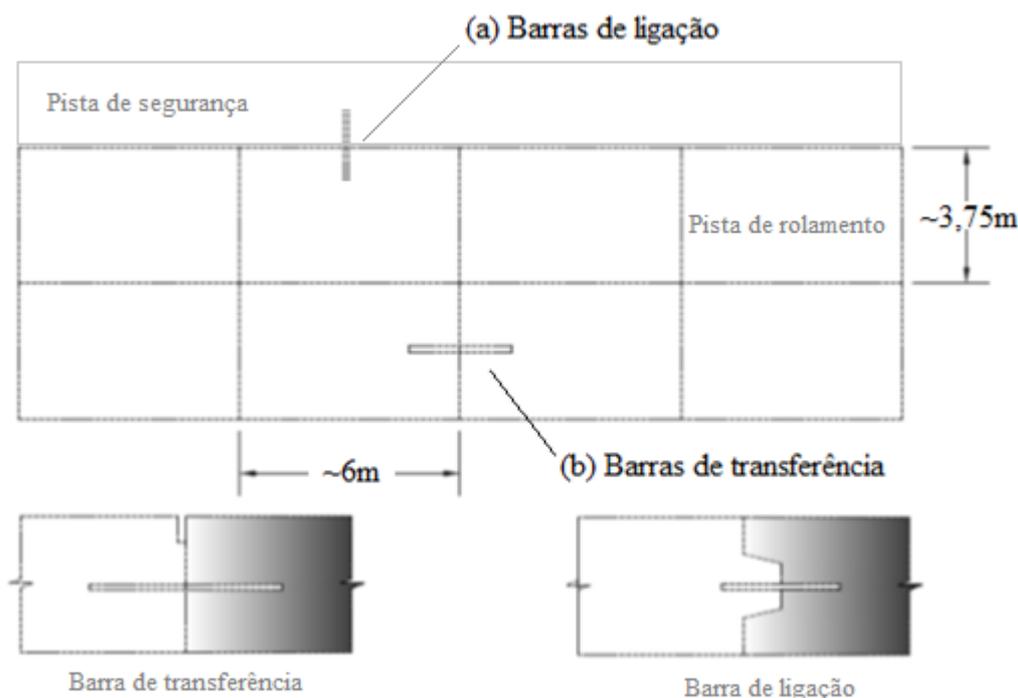


Figura 3.14 - Largura e comprimentos recomendados para placas de pavimento rígido
Localização das barras de ligação (junta longitudinal) e das barras de transferência (junta transversal) nas placas de concreto do pavimento

Fonte: Modificado de DNIT, 2005, p. 155 e 163.

Para manter as placas unidas entre si, utilizam-se barras de ligação, e para transferir as cargas de uma placa para outra, usam-se barras de transferência. As barras de ligação são instaladas entre as placas, conforme Figura 3.14, nas juntas longitudinais e as de transferência são instaladas nas juntas transversais, entre as placas.

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Pode ser formado pelas seguintes camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego

e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento - conforto e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os revestimentos asfálticos podem apresentar diversas constituições dentre as quais o tratamento superficial e o macadame asfáltico (por penetração), e as misturas asfálticas. As bases podem apresentar diversas composições e podem ser constituídas de solo com aditivo (solo melhorado com cimento ou com cal) ou sem aditivo (solo, solo brita ou brita graduada); ou coesiva com ligante ativo (solo-cimento, solo-cal ou concreto rolado) ou com ligante asfáltico (solo asfalto, macadame asfáltico ou mistura asfáltica). As sub-bases são geralmente granulares sem aditivo, constituídas de solo, no máximo misturado com outro solo (ou areia). O reforço de subleito é geralmente constituído de um único solo havendo apenas a exigência de ter um maior CBR e um menor IG do que o subleito.

3.2.1 Dimensionamento de Pavimentos

No Brasil, as estruturas de pavimentos flexíveis geralmente têm sido dimensionadas pelo Método *California Bearing Ratio* (CBR); em aeroportos adota-se o método da *Federal Aviation Administration* (FAA); e para estruturas de pavimento rígido geralmente adota-se o método da *Portland Cement Association* (PCA). As recomendações para desenvolvimento de projetos de pavimentos rígidos e flexíveis, novos e reforçados, de rodovias principais e de baixo volume de tráfego, são estabelecidas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Medina e Mota (2005) esclarecem que Hveem (1995) realizou o primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos, em que afirma que o trincamento dos revestimentos asfálticos se deve à deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial o subleito. Segundo eles, o termo resiliente era preferido por Hveem em vez de deformação elástica sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos com que lida o engenheiro como, por exemplo, o concreto e o aço e que significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, energia essa que é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações - corresponde a energia potencial de deformação.

Os autores esclarecem, também, que o ensaio de compressão triaxial a cargas repetidas de solos e britas, de aceitação geral, foi implantado no Brasil desde 1977 para solos, e o de compressão diametral, de misturas asfálticas, desde 1980. Como a solitação dinâmica dos pavimentos e do subleito, sujeitos a cargas de diferentes intensidades e frequências variáveis

ao longo do dia e do ano é de simulação difícil, os ensaios de carga repetida (ou ensaio dinâmico) procuram reproduzir as condições de campo. O ensaio triaxial é realizado à tensão confinante σ_3 , constante, e à tensão variável σ_1 . A tensão σ_d é a tensão de desvio variável é dada por:

$$\sigma_d = \sigma_1 + \sigma_3 \quad (3.21)$$

Ainda, segundo Mota e Medina (2005) os ensaios de compressão diametral estático têm sido empregados no Brasil para medir a resistência à tração indireta das misturas asfálticas desde 1980, usando a prensa de dosagem do ensaio de Estabilidade Marshall, que faz parte da norma de dosagem de concreto asfáltico (DNER ME 043/95). Atribui-se a Schmidt (1972), da CHEVRON, Califórnia, a aplicação deste ensaio sob carregamento dinâmico a misturas betuminosas.

Define-se módulo de resiliência de solo determinado no ensaio triaxial de cargas repetidas como sendo:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} \quad (3.22)$$

Nessa equação, σ_d é a tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) e ε_l ou ε_r é a deformação resiliente axial (vertical):

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3.23)$$

Nessa equação, Δh é o deslocamento vertical recuperável máximo e h_0 é a altura inicial de referência do corpo-de-prova.

O que se procura determinar nos ensaios triaxiais é a relação experimental para as condições de densidade, umidade e grau de saturação que o solo apresenta *in situ* em função do estado de tensões:

$$MR = f(\sigma_3, \sigma_d) \quad (3.24)$$

O módulo de resiliência depende da natureza do solo (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), umidade, densidade e estado de tensões, além das

características do próprio ensaio (frequência e tempo de carregamento, forma de onda, etc.). O ensaio triaxial de cargas repetidas faz-se com solos não saturados quase sempre em condições de drenagem livre (MEDINA e MOTA, 2005).

Segundo Medina e Mota (2005), para cada solo, o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio por modelos matemáticos com constantes experimentais. Segundo os autores, modelos de comportamento do MR para solos granulares ou arenosos (solos com menos de 50% passando pela peneira 200, de 0,074mm), de origem saprolítica (residual jovem) ou laterítica, e também sedimentar. Nos solos arenosos o módulo depende principalmente da tensão confinante, σ_3 , ou da soma das tensões principais (θ). No caso de compressão triaxial tem-se:

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3 \quad (3.25)$$

$$MR = k_1 \cdot (\sigma_3)^{k_2} \quad (3.26)$$

$$MR = k'_1 \cdot \theta^{k'_2} \quad (3.27)$$

Já os solos argilosos, geralmente, solos lateríticos de subleitos ou camadas de reforço de subleito, comuns nas rodovias principais, a natureza da fração fina determina o comportamento à resiliência.

O método de dimensionamento de pavimentos rígidos e flexíveis do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, ex-DNER) foi elaborado na década de 60, utiliza o ensaio CBR e considera o conceito de equivalência estrutural proposto pela AASHTO. O ensaio CBR foi desenvolvido para avaliar a capacidade de suporte dos subleitos, comparada a de uma brita padrão e o método é normalizado pelo DNIT.

No caso de dimensionamento de pavimento novo pelo método da resiliência, é necessário considerar com critério todos os mecanismos de degradação da estrutura, como a fadiga das camadas do revestimento, o afundamento das trilhas de roda e a ruptura plástica. Fatores ambientais como a temperatura, que determina a maior ou menor rigidez das misturas asfálticas que, por sua vez, modifica a distribuição das tensões, a vida de fadiga e a resistência à deformação plástica, são importantes no dimensionamento da estrutura de pavimentos. Outro fator a considerar é a umidade de equilíbrio do subleito, preponderante na determinação da deformação e da resistência ao cisalhamento dessa camada. Pavimentos degradados

permitem o acesso de água às camadas do pavimento e ao subleito o que oferece risco de enfraquecimento da estrutura por falta de manutenção.

Na escolha dos parâmetros de dimensionamento da estrutura de pavimentos pelo critério da confiabilidade, costuma-se aplicar um tratamento estatístico considerando-se a escolha do CBR do subleito de um trecho homogêneo do pavimento para o dimensionamento, a partir de uma distribuição estatística gaussiana dos resultados de ensaios, e um determinado risco percentual de ocorrência de valores menores.

Define-se confiabilidade como a probabilidade de um sistema ou uma estrutura, por exemplo, a estrutura de pavimentos, de desempenhar satisfatoriamente a função para a qual foi projetada, com uma expectativa de duração estabelecida, ou seja, a probabilidade da diferença entre a resistência oferecida aos esforços e os esforços considerados, deve ser um valor positivo. Se ocorrer o contrário, ou seja, os esforços serem de valor superior à resistência, haverá ruptura da estrutura.

Miner (1945) estabeleceu que a ruptura de uma estrutura solicitada dinamicamente ocorre quando a soma das razões entre o número de ciclos previstos para cada carga (P_i) e o número de ciclos admissíveis para cada carga é igual à unidade:

$$\sum \frac{N_{pi}}{N_{fi}} = 1 \quad (3.29)$$

É de se esperar, portanto, que na trilha de rodas, na parte inferior do revestimento, a trinca surja quando se tenha a condição expressa na Equação 3.29 onde, no dimensionamento de pavimentos (N_{fi}) é o número de repetições de carga (P_i) que causa a ruptura de acordo com a lei de fadiga do material e (N_{pi}) é o número de repetições previstas da carga (P_i) na vida de projeto (MONISMITH e DEACON, 1969).

O roteiro para a realização de um dimensionamento mecanicista empírico consiste, basicamente, das seguintes etapas:

- Definir o número de solicitações previsto no pavimento, n_i para cada tipo de eixo e faixa de carga esperada;
- Determinar o módulo de resiliência dos materiais no subleito, reforço de subleito, sub-base, e base, $M_{r(SL)}$; $M_{r(RSL)}$; $M_{r(SB)}$; $M_{r(B)}$;
- Definir o módulo de resiliência da mistura asfáltica do revestimento, $M_{r(R)}$;
- Adotar uma estrutura inicial para o pavimento como, por exemplo, a estrutura proposta pelo método tradicional (CBR);

- Usar um modelo matemático (Teoria de múltiplas camadas, Método de Elementos Finitos) e um programa computacional, para calcular o estado de tensões e deformações decorrentes da aplicação de cada carga “i”, considerando os seguintes parâmetros críticos: deflexão prevista na superfície do pavimento; deformação de tração no revestimento e nas camadas subjacentes; tensão e deformação de compressão vertical no subleito.
- Confrontar os valores de tensões e deformações calculados, com os admissíveis: modelos de fadiga do revestimento e das camadas adjacentes; deflexões admissíveis; tensão/deformação de compressão admissíveis para o subleito.
- Se os critérios anteriores forem atendidos, o pavimento estará dimensionado; em caso contrário, deverá ser alterada a estrutura do pavimento inicialmente adotada, refazendo os últimos dois procedimentos.

Esse roteiro pode ser resumido no fluxograma da Figura 3.15:

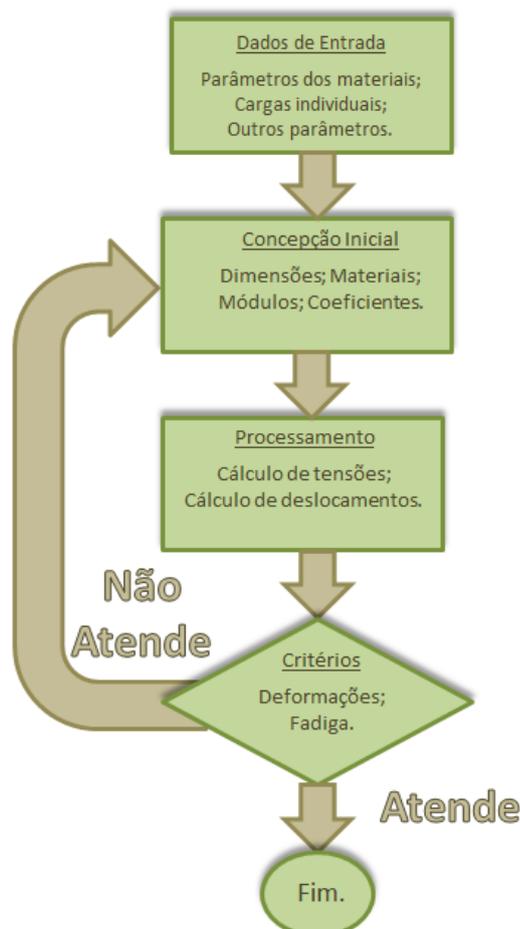


Figura 3.15 - Fluxograma ilustrando o roteiro para a realização do dimensionamento mecânico de um pavimento.

Atualmente, tem-se um razoável conhecimento das funções de transferência para fadiga de misturas asfálticas e para a deformação permanente do subleito, entretanto, modelos de deformação permanente específica no revestimento asfáltico e nas camadas granulares ainda são poucos, e maiores estudos ainda são necessários.

A sequência de etapas a seguir destina-se a ilustrar o processo de obtenção da resposta (em termos de deslocamentos) da estrutura de um pavimento submetido a um dado carregamento, utilizando formulações analíticas (Figura 3.16).

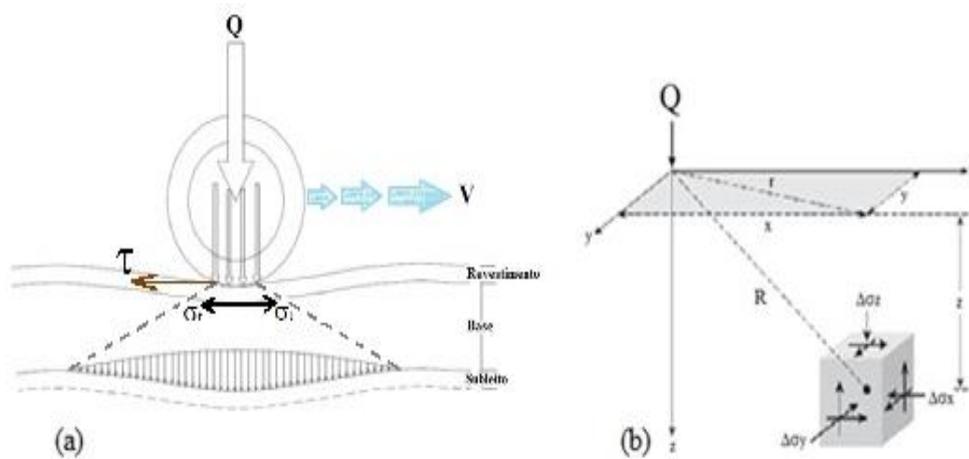


Figura 3.16 – (A) Carga aplicada na superfície de um pavimento pela ação do pneu de um veículo (B) Carga concentrada num ponto sobre a superfície (coordenadas retangulares).
Fonte: Modificado de DAS (2011).

Para casos não lineares é necessário inicialmente calcular as tensões, uma vez que estas influenciam os módulos de resiliência. As tensões correspondem às tensões *in situ*, induzidas pelo peso das camadas, e os acréscimos de tensões induzidas pela carga dos pneus.

As tensões *in situ* são aquelas devido ao peso próprio do solo, nas três direções x, y e z. Na direção vertical, o cálculo é feito a partir dos pesos específicos γ_i e das espessuras das camadas z_i :

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot Z_i \quad (3.30)$$

Para o cálculo das tensões nas direções horizontais x e y, utilizam-se o coeficiente de empuxo no repouso K_0 , ilustrado na Figura 3.17, e a tensão vertical, como mostrado a seguir:

$$\sigma_x = \sigma_y = K_0 \cdot \sigma_z \quad (3.31)$$

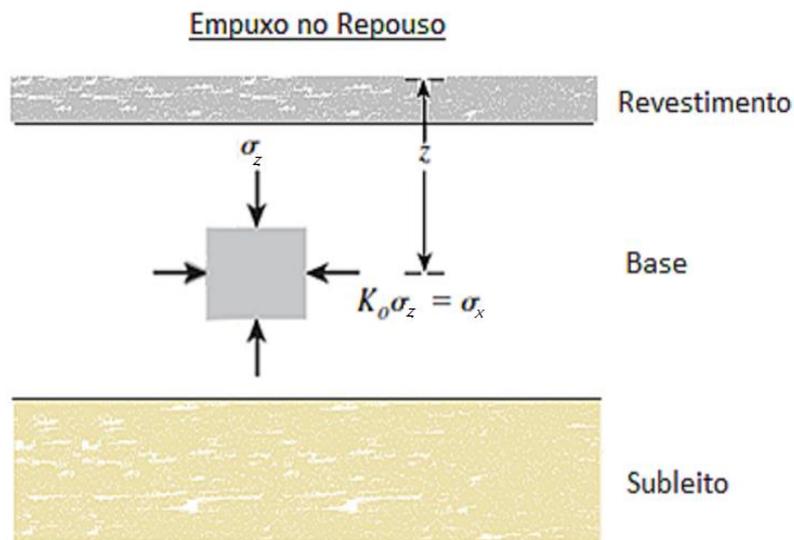


Figura 3.17 – Coeficiente de Empuxo aplicado para determinar as tensões nas direções horizontais.
 Fonte: Modificado de DAS (2011).

Para a estimativa dos acréscimos de tensões atuantes nas camadas do solo nas direções x, y e z, pode-se proceder, no caso de um semi-espaco homogêneo elástico, utilizando-se soluções analíticas tais como a obtida por Boussinesq e expostas a seguir:

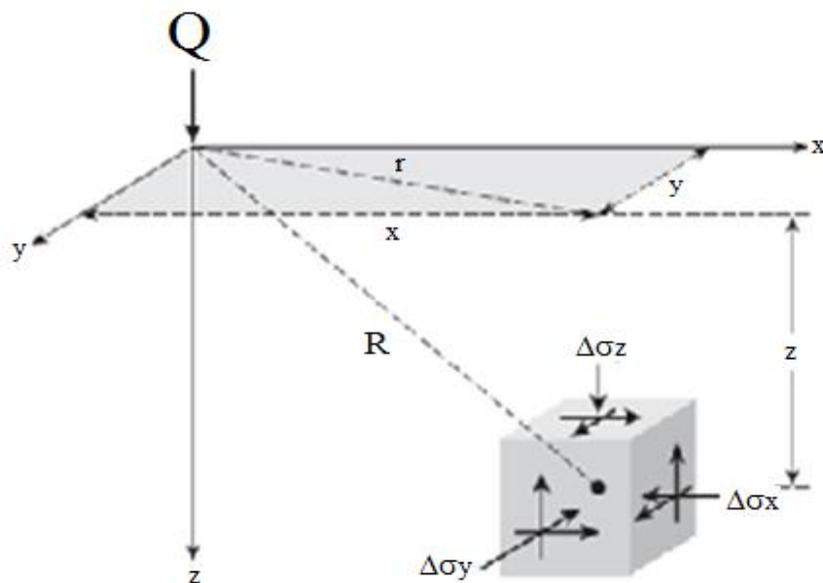


Figura 3.18 - Carga concentrada num ponto sobre a superfície (coordenadas retangulares).
 Fonte: Modificado de DAS (2011).

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} \quad (3.32)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{3Q}{2\pi} \left\{ \frac{x^2z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{R^3(R+z)^2} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (3.33)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{3Q}{2\pi} \left\{ \frac{y^2z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)y^2}{R^3(R+z)^2} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (3.34)$$

Onde, (Q) é a carga pontual, (ν) é o coeficiente de Poisson, e as expressões de (R) e (r) são dados a seguir:

$$R = \sqrt{z^2 + r^2} \quad (3.35)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.36)$$

O próximo passo é calcular os invariantes de tensão. Por exemplo, para modelos dependentes do primeiro invariante I_1 , este é obtido como a soma das tensões *in situ* e dos acréscimos de tensões, nas três direções x, y e z:

$$I_1 = \sigma_z + \sigma_x + \sigma_y + \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y \quad (3.37)$$

Uma vez obtido o invariante de tensões, procede-se o cálculo do módulo de elasticidade de cada camada, adotando-se diferentes modelos. Como ilustração tem-se um modelo com variação linear do módulo:

$$E = E_0(1 + \beta I_1) \quad (3.38)$$

onde E é o módulo elástico sob o invariante de tensão dada; I_1 é o invariante de tensão; E_0 é o módulo elástico inicial ou o módulo quando o invariante de tensão é zero; β é uma constante do solo, que indica o aumento no módulo de elasticidade por unidade de acréscimo na tensão invariante.

Outra possibilidade é a utilização de modelos com variação não-linear, como o modelo de potência a seguir:

$$E = E_0(I_1)^\beta \quad (3.39)$$

Com os módulos calculados, é possível estimar as deflexões verticais. No caso elástico, e utilizando a solução proposta por Boussinesq para um meio homogêneo, o deslocamento superficial sob o carregamento é dado por:

$$\rho_z = \frac{P(1+\nu)}{8\pi(1-\nu)ER} \left[3 - 4\nu + \frac{z^2}{R^2} \right] \quad (3.40)$$

Em outros casos, quando se utilizam modelos mais complexos ou estruturas com múltiplas camadas (Figura 3.19), deve-se recorrer a soluções numéricas ou programas como o KENPAVE (HUANG, 2004). Este programa implementa uma solução analítica proposta por Burmister (1945).

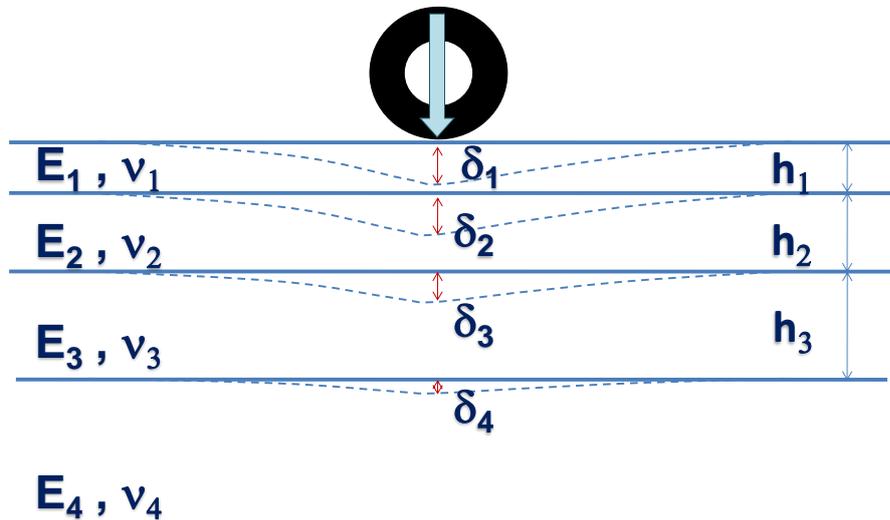


Figura 3.19 - Estrutura de um pavimento constituído de múltiplas camadas.
Fonte: FARIAS, 2013.

É geralmente aceito que o número de solicitações necessárias para atingir a fadiga, em um pavimento (N_f) está relacionado com a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico (ε_t) e com o módulo do mesmo (E), de acordo com a seguinte expressão:

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad (3.41)$$

onde k_1 , k_2 e k_3 são constantes determinadas experimentalmente. Neste trabalho será utilizado o modelo de fadiga do *Asphalt Institute* onde as constantes assumem os valores $k_1=0,0796$,

$k_2=3,291$ e $k_1=0,854$, para as deformações de tração positivas e adimensionais e os valores de módulo em unidades de psi.

O critério usado para certificar o pavimento, é a relação proposta por Miner (1945) expressa na Equação 3.29.

3.2.2 Retroanálise do Pavimento

A retroanálise é uma opção não destrutiva que permite inserir os módulos de elasticidade das camadas estruturais do pavimento por interpretação das “bacias de deformação” (ou melhor, bacia de deslocamentos verticais recuperáveis). Para tanto é preciso adotar um modelo de comportamento para a estrutura (elástico linear, por exemplo) e dispor de um método de cálculo que permita a solução analítica ou numérica para calcular os deslocamentos superficiais em função das cargas impostas. Conhecendo-se, portanto, a carga externa aplicada para a qual foi obtida a bacia deflectométrica e, conhecendo-se as características básicas dos tipos de materiais presentes em cada camada e suas espessuras, é possível inserir os módulos de elasticidade a partir das deflexões obtidas, considerando-se uma determinada combinação de módulos das camadas de modo a fazer coincidirem a bacia teórica calculada e a bacia real medida em campo (Figura 3.20).

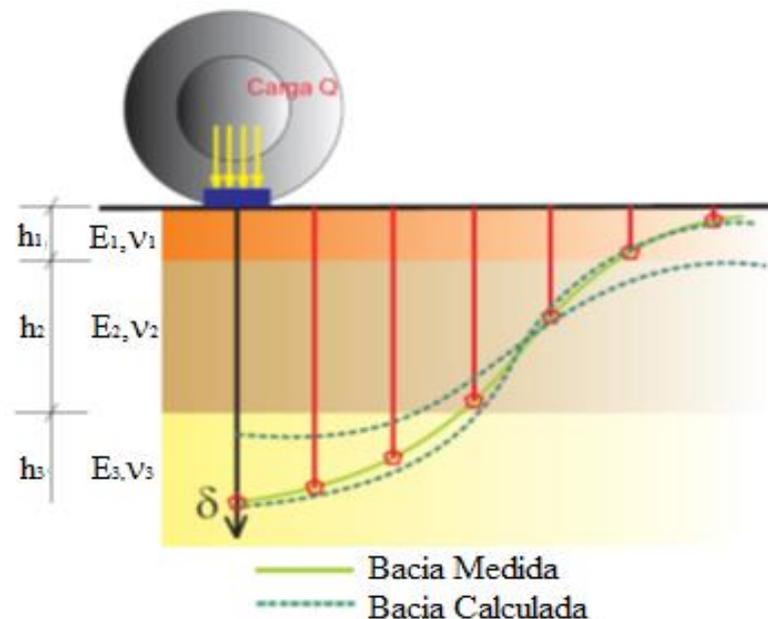


Figura 3.20 – Esquema da Retroanálise de um pavimento, indicando os dados inseridos - conjunto de módulos (E_k, ν_k) estimados e espessuras das camadas (h_1, h_2, h_3) e a ilustração da busca pelo ajuste das bacias medida e calculada.

Fonte: FARIAS, 2013.

A retroanálise requer um processo iterativo durante o qual se busca minimizar as diferenças entre a bacia calculada e a bacia medida. Esta diferença pode ser mensurada pelo erro quadrático médio:

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i^{(medido)} - \delta_i^{(calculado)})^2} \quad (3.42)$$

Nesta equação, (e) é o erro quadrático médio e, (δ_i) é o deslocamento (medido ou calculado) em um ponto “i” na superfície do pavimento.

A Viga *Benkelman* (VB) e o deflectômetro de impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*) são os equipamentos mais utilizados para medir os deslocamentos de um pavimento. Segundo Bernucci *et al.* (2008), a Viga Benkelman consiste de um procedimento trabalhoso e de pouca precisão quando realizado com a viga convencional, o que não acontece com as vigas automatizadas, cujas leituras de deslocamentos são feitas com medidores elétricos do tipo *Linear Variable Differential Transformer* – LVDT. O FWD é totalmente automatizado e o ensaio consiste em se aplicar a carga de impacto e ler os deslocamentos em vários sensores colocados ao longo de um perfil, com o objetivo de obter uma linha de deslocamentos. Outra diferença está na forma de aplicação da carga, dinâmica para o FWD e quase estática para a VB.

Para Bernucci *et al.* (2008), os dados de entrada do processo de retroanálise são a configuração do carregamento, a bacia deflectométrica, a seção padrão do pavimento, os coeficientes de Poisson e as faixas de valores modulares para cada camada da estrutura, com as seguintes vantagens:

1. Possibilita a obtenção dos módulos de elasticidade nas condições de campo;
2. Elimina ou minimiza o número de sondagens para determinação das espessuras e coletas de amostras para determinação dos parâmetros desejados;
3. Possibilita o uso pleno da bacia deflectométrica, e não somente a deflexão máxima, conforme orientado nas técnicas de avaliação estrutural do DNER;
4. Caracteriza com rapidez as camadas em termos de elasticidade;
5. Verifica a condição estrutural de cada camada e do subleito.

Como desvantagens, destaca a sensibilidade dos cálculos frente a imprecisão dos levantamentos de campo; a confiabilidade dos equipamentos e dos procedimentos aplicados; a diferença entre os módulos reais dos materiais das camadas e os módulos equivalentes

retroanalizados; cada programa pode fornecer um conjunto de dados diferentes, dependentes ainda das hipóteses simplificadoras e dos níveis de ajustes aplicados.

Gomes (2008) procurou desenvolver inventário atualizado das espessuras dos pavimentos, deflexões superficiais e características mecanicistas dos pavimentos e usou os dados do inventário para investigar a variabilidade dos parâmetros estruturais e estimar a vida útil remanescente dos pavimentos, espessuras de recapeamento requeridas e analisar a confiabilidade das informações necessárias para reabilitação estrutural e estabelecer fatores de segurança para os pavimentos. Segundo o autor, o FWD e o GPR foram usados como ferramentas valiosas para emprego nas avaliações de pavimentos em nível de rede, pois fornecem uma linha de base quanto à capacidade estrutural da rede pavimentada. O autor atestou que as informações coletadas com o GPR constituem os dados de base para seleção de pontos para avaliação da resistência do pavimento usando o FWD e que os dados obtidos podem ser usados para elaboração de projeto, manutenção, reabilitação, bem como para as finalidades de gerência.

Dentre as características das camadas da estrutura do pavimento, as espessuras, quando conhecidas, podem representar um parâmetro a menos a ser calculado na retroanálise. Métodos diretos de investigação para medir a espessura das camadas, como extração de núcleos de camadas de revestimento e até mesmo a abertura de trincheiras para medir as espessuras de camadas subjacentes são comumente usados para esse fim. Atualmente os métodos de investigação indireta, como o GPR, vêm sendo sistematicamente empregados em conjunto com os métodos diretos de investigação, para acelerar as aquisições de dados, desonerar as campanhas, assegurar a extensão das informações tornando-as menos pontuais e, com isso, melhorando a eficiência dos procedimentos empregados.

O GPR não elimina completamente a coleta de amostras em campo com os métodos de investigação direta, mas ele pode estabelecer a seleção direcionada de amostras que podem auxiliar a análise dos dados obtidos a partir dos perfis GPR adquiridos nos locais onde houver anomalias e limitações de dimensionamento de camadas. O inventário das espessuras das camadas associado ao levantamento da capacidade estrutural dos pavimentos realizados com o GPR e o FWD demonstrou que, de modo geral, são bons os resultados das determinações estruturais dos pavimentos analisados, bem como possibilitou determinar quais trechos requeriam espessuras de recapeamento e reforço (GOMES, 2008).

Na retroanálise, um programa computacional deve ser usado com o intuito de acelerar o processamento dos dados que possibilitam realizar os cálculos desejados e obter, com

precisão, os resultados esperados. O KENPAVE (HUANG, 2004) é um dos programas que pode ser utilizado para processar os dados da retroanálise.

Nesse programa, o primeiro passo consiste na definição dos parâmetros iniciais do pavimento. Dentre estes estão os materiais constitutivos das camadas do pavimento. Três possibilidades podem ser consideradas: os materiais de uma ou mais camadas podem ter propriedades linear elásticas, não linear elásticas ou viscoelásticas. Dependendo da estrutura das camadas do pavimento, diversas composições usando essas três possibilidades podem ser obtidas. É importante verificar se pode haver alteração nas características das propriedades dos materiais ao longo do ano. Se essa possibilidade existir, o número de vezes em que isso acontece deve ser considerado e, para cada mudança das propriedades mecânicas do solo, uma nova análise deve ser considerada.

O número de eixos e o número de rodas dos veículos pesados a ser usado para simular o número de passadas sobre o pavimento para a análise de danos pode oferecer diversas configurações, com diferentes cargas de rodas.

Outro aspecto a considerar, é o número de camadas que irão compor a estrutura do pavimento e que pode variar a partir de três camadas: a superior, também denominada de revestimento ou camada de desgaste; a base, que juntamente com a primeira camada deve absorver as cargas impostas ao pavimento; e o subleito, que consiste da regularização do terreno original pelos serviços de terraplenagem com ou sem aterro, sobre a qual o pavimento será construído.

Uma vez definidos esses aspectos, e após a definição da estrutura do pavimento, a espessura de cada camada deve ser definida em função da aquisição de dados reais de campo, por ensaios diretos pela retirada de amostras do pavimento pela extração de núcleos e posterior medição, e/ou indiretos, pela realização de campanhas geofísicas, utilizando o Método GPR, por exemplo. É necessário assumir valores iniciais para o Coeficiente de Poisson e para o Módulo de Elasticidade para uma primeira interação.

Quando definido o tipo de carga aplicada ao pavimento, e que pode ser proveniente de um veículo de eixo simples e roda simples; eixo simples e roda dupla; eixos tandem; ou eixos tridem, a etapa seguinte consiste em especificar o raio da área de contato da carga circular e a pressão de contato dessa área e, em seguida, deve-se definir a sua localização, ou seja, a distância centro-a-centro entre as duas rodas duplas ao longo do eixo vertical, coincidente com a direção transversal do pavimento (eixo y) e a distância centro-a-centro entre os eixos ao longo da direção longitudinal do pavimento (eixo x).

O resultado da retroanálise fornece o estado das tensões verticais e horizontais e deformações em pontos localizados em subsuperfície, e que precisam ser conhecidos. A coordenada z , vertical de cada ponto para o qual se espera uma resposta pode ser o que está localizado abaixo do centro da carga aplicada (valores de x e y iguais a zero e ponto de maior deformação) e na interface entre duas camadas, por exemplo. O resultado (as deformações, por exemplo), conseqüentemente, expressará o esforço verificado no topo ou na parte inferior da camada.

É possível obter os valores dos esforços produzidos no topo da camada inferior, abaixo da carga aplicada fixando o valor de z numa cota pouco menor (na ordem de 0,0001 da unidade considerada). Entretanto, pontos localizados na superfície ou em subsuperfície em quaisquer coordenadas x , y e z podem ter seus estados de tensão apresentados pela retroanálise, desde que esses pontos sejam previstos.

Quando se deseja comparar os resultados da retroanálise com os resultados dos ensaios com a viga Benkelman, inferem-se as coordenadas dos pontos da superfície do pavimento em que ensaio é realizado, com a cota de profundidade z igual a zero. Para a cota y (eixo vertical, coincidente com a direção transversal do pavimento) infere-se a coordenada do ponto localizado entre as duas rodas do veículo (eixo simples e rodas duplas). Para a cota x (eixo horizontal, coincidente com a direção longitudinal do pavimento), inferem-se as coordenadas dos pontos considerados para o ensaio para D0; D25; D50; D75; D100; D150 e D200.

3.2.3 Análise Probabilística do Pavimento

Segundo Farias e Assis (1998) a análise probabilística diferencia da análise determinística fundamentalmente por levar em consideração a variabilidade dos parâmetros de cálculo. A maioria dos dados de entrada numa análise de conservação de pavimentos (módulos de resiliência, estrutura das camadas, etc.) não é conhecida com precisão. As variabilidades devem-se à dispersão dos resultados de ensaios ou à variabilidade natural no valor da grandeza que existe de um ponto a outro do pavimento. Há, portanto, uma distribuição de valores para cada parâmetro, o que faz com que esses valores possam ser considerados variáveis aleatórias (Figura 3.21). Fatores de segurança diferentes serão obtidos se valores diferentes dessas variáveis forem usados. Disso conclui-se que o próprio fator de segurança é uma variável aleatória que depende de muitas variáveis de entrada e possui sua própria distribuição.

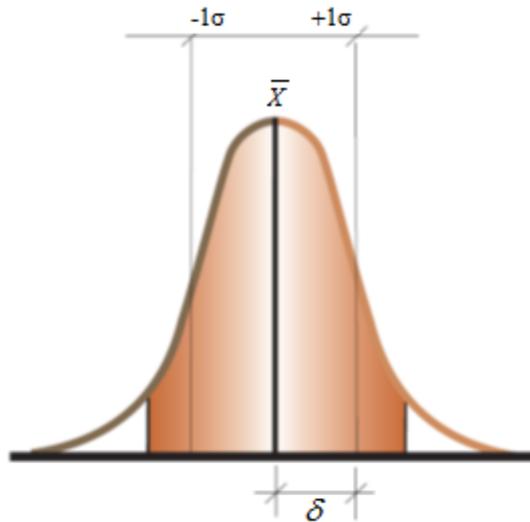


Figura 3.21 – Variabilidade dos parâmetros de cálculo na Análise Probabilística do comportamento de pavimento.

Diversos métodos probabilísticos têm sido desenvolvidos para gerar medidas de distribuição de funções de variáveis dependentes, como o fator de segurança. Harr (1985) divide esses métodos em três categorias: (a) Métodos exatos; (b) Aproximações da série de Taylor da variável dependente; (c) Método das Estimativas Pontuais (*Point Estimate Method*). Cada método tem suas próprias hipóteses e seguidores.

Neste trabalho, o Método F.O.S.M. (*First Order, Second Moment*) será usado para a análise probabilística do número de passadas que leva um pavimento a romper por fadiga e deformação permanente.

O número de passadas que leva um pavimento à fadiga é função de diversos parâmetros (módulos mecânicos, coeficientes, medidas de espessuras de camadas da estrutura, dentre outros):

$$N_f = F(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (3.43)$$

O método FOSM utiliza truncamentos da série de Taylor com aproximação de primeira ordem para as derivadas parciais da função F e aproximações de segunda ordem para sua a variância. A série de Taylor aplicada ao Método FOSM, corresponde à segunda categoria dos métodos probabilísticos desenvolvidos para determinar a distribuição de probabilidade de uma função, com um número de variáveis aleatórias não correlacionadas, nesse caso com distribuição normal (HARR, 1985). Neste caso, assume-se uma variável independente (F) função de (n) variáveis aleatórias não correlacionadas (x_1, x_2, \dots, x_n), cujos

valores médios esperados são conhecidos, bem como suas variâncias $V[x_i]$. Dessa forma, a própria função (F) passa a ter uma distribuição normal com valor médio esperado $E[F]$, e variância $V[F]$ dados por:

$$E[F] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (3.44)$$

$$V[F] = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot V[x_i] \quad (3.45)$$

Ao tomar para o valor esperado a deformação de tração na base da camada de revestimento em função das variáveis aleatórias tem-se a seguinte expressão genérica:

$$E[\varepsilon_{t(r)}] = F(H_r, H_b, M_r, M_b, M_{sl}, \dots) \quad (3.46)$$

$$v[\varepsilon_{t(r)}] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varepsilon_{t(r)}}{\partial x_i} \right)^2 \cdot v[x_i] \quad (3.47)$$

Dada à impossibilidade de obter a derivada de forma analítica neste trabalho, ela foi determinada de maneira numérica, onde se variou em $\pm 10\%$ cada parâmetro do solo, seguindo as recomendações de Sandroni e Sayão (1992). A derivada parcial de $\varepsilon_{t(r)}$, por exemplo, em função de qualquer das variáveis independentes (x_i) pode ser aproximada numericamente usando derivadas em avanço, centrado e em atraso, respectivamente, da seguinte forma:

$$\frac{\partial \varepsilon_{t(r)}}{\partial x_i} = \frac{\varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i) - \bar{\varepsilon}_{t(r)}}{0,01\bar{x}_i} \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{t(r)}}{\partial x_i} = \frac{\varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i) - \varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i)}{0,02\bar{x}_i} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{t(r)}}{\partial x_i} = \frac{\bar{\varepsilon}_{t(r)} - \varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i)}{0,01\bar{x}_i} \quad (3.50)$$

Assim é possível fazer uma análise de sensibilidade da influência de cada variável independente (x_i), tomando-se sua contribuição para o somatório no lado direito da equação em relação ao valor total da variância da variável independente. A equação 3.47, pode ser expressa, para o incremento em avanço, centrado e em atraso, respectivamente, portanto, por:

$$v[\varepsilon_{t(r)}] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i) - \bar{\varepsilon}_{t(r)}}{0,01\bar{x}_i} \right)^2 \cdot v[x_i] \quad (3.51)$$

$$v[\varepsilon_{t(r)}] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i) - \varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i)}{0,02\bar{x}_i} \right)^2 \cdot v[x_i] \quad (3.52)$$

$$v[\varepsilon_{t(r)}] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{t(r)} - \varepsilon_{t(r)}(\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i)}{0,01\bar{x}_i} \right)^2 \cdot v[x_i] \quad (3.53)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As áreas de estudo deste trabalho compreendem dois trechos de pavimento com revestimento asfáltico (pavimentos flexíveis) e dois trechos de pavimentos com revestimento de concreto (pavimentos rígidos).

A Pista Experimental do IFMT, Campus São Vicente localizada em Campo Verde/MT, e a pista da Avenida Antártica, localizada em Cuiabá/MT, constituem os dois trechos de pavimentos flexíveis. Um estudo probabilístico desses pavimentos proporcionará uma visão dos parâmetros de sua estrutura que influenciam na deformação das suas camadas de revestimento, base e subleito, além do número de passadas permitidas para essas camadas e na sua vida de fadiga.

A Rodovia BR-101/NE, localizada em Recife/PE e o pátio de manobras de aeronaves, do Aeroporto Santos Dumont, localizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, têm revestimento de concreto de cimento Portland. Essas áreas de estudo serão analisadas quanto à variabilidade das espessuras de suas camadas, dentre outros aspectos observados.

4.1 PISTA EXPERIMENTAL DE CAMPO VERDE (PECV)

A PECV, construída por Amorim (2013), localiza-se no Campus São Vicente, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), na cidade de Campo Verde, Mato Grosso, a 140 quilômetros de Cuiabá (Figuras 4.1 e 4.2).

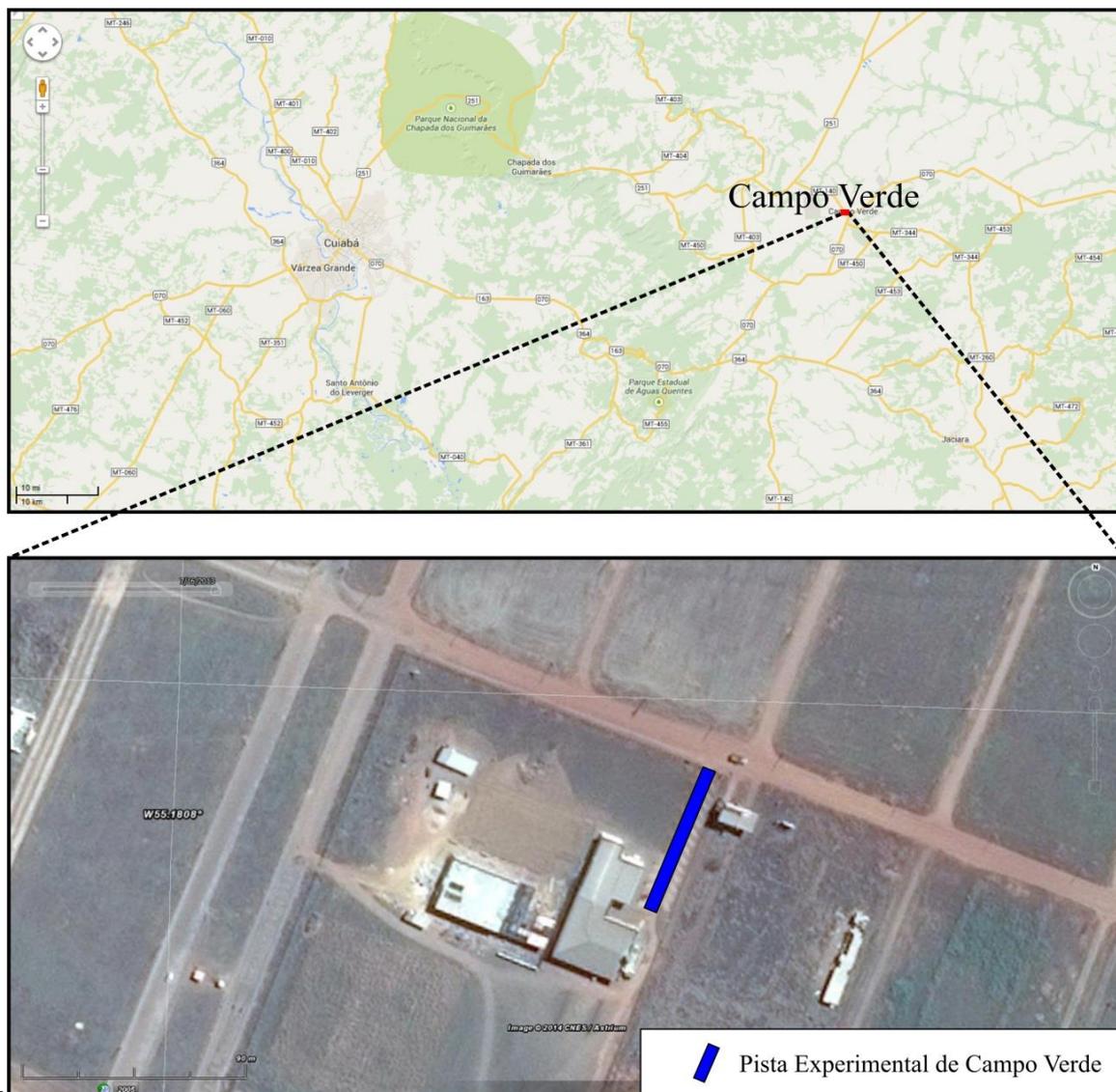


Figura 4.1 – Croqui com a localização da PECV, no Campus São Vicente do IFMT, Campo Verde/MT.



Figura 4.2 – Foto panorâmica evidencia a PECV, no Campus São Vicente do IFMT, Campo Verde/MT.

A estrutura da pista é composta por uma camada de revestimento do tipo pré-misturado a frio (PMF) com 0,05m de espessura, assentado sobre uma camada de base de 0,20m de espessura de projeto (Figura 4.3).

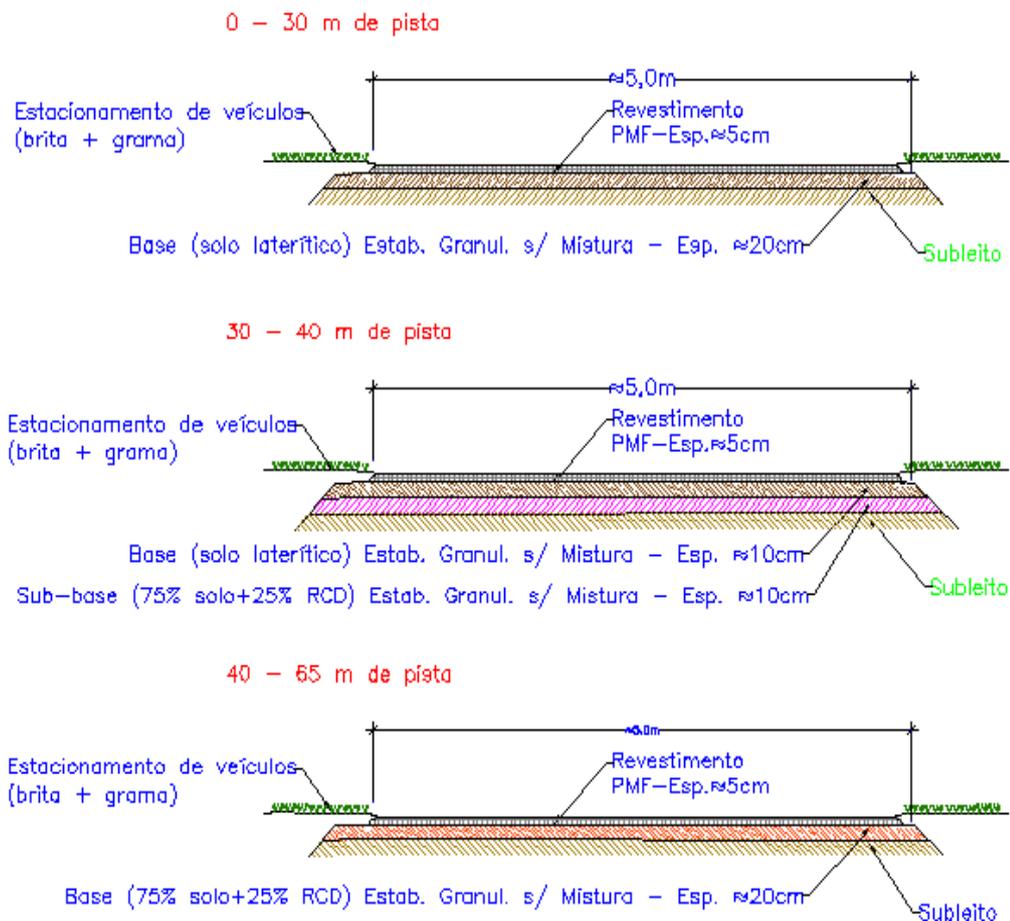


Figura 4.3 - Croqui da estrutura do pavimento da PECV – corte e planta, ilustrando os três trechos construídos com estruturas específicas para cada segmento.

A camada de base foi projetada para ser constituída pela composição de diversos tipos de materiais, sendo dividida em três trechos:

1º Trecho – o trecho mais próximo da entrada do instituto que dá acesso ao estacionamento principal, com 30m de comprimento, foi construído com revestimento do tipo PMF e teve a sua base constituída de solo retirado de uma área de empréstimo.

2º Trecho – o trecho intermediário de 10m de comprimento, também teve o revestimento construído com PMF. A camada de base/sub-base recebeu dois tipos de materiais: para os primeiros 0,10m mais próximos do subleito, uma mistura de solo + RCD e, nos outros 0,10m mais próximos do leito, apenas solo retirado da mesma área de empréstimo;

3º Trecho – ao longo de uma extensão dos 30m finais da pista foi usado como material de base uma mistura de solo + resíduo de construção e demolição (RCD) na proporção de 25% de RCD para 75% de solo, em massa. Na composição dos materiais

constituintes do RCD foram utilizados 50% de restos de concreto, 35% de restos de alvenaria e 15% de restos de pisos, em massa.

As seguintes etapas foram desenvolvidas durante a construção da pista:

1. Remoção da camada superficial do local do trecho (aproximadamente 0,40m de espessura); coleta de material do subleito; regularização e compactação do subleito; realização do ensaio de frasco de areia no subleito; pré-homogeneização, em pista dos resíduos de construção com colocação de água necessária para que esses materiais ficassem previamente úmidos antes da mistura com o solo.

2. Pré-homogeneização, em pista, na Secretaria de Obras, dos resíduos de construção com o solo, acrescentado a quantidade de água necessária para obtenção da umidade ótima; execução da camada de base utilizando todos os equipamentos necessários para este fim (motoniveladora, pá carregadeira, rolo pé de carneiro, rolo liso, grades, caminhão pipa, topografia); imprimação da camada de base.

3. Execução da camada de revestimento em PMF; coleta e confecção de corpos de prova da mistura asfáltica; coleta dos agregados utilizados na fabricação do PMF.

O solo utilizado na camada de base foi analisado em laboratório e permitiu uma classificação geotécnica como um material consistindo de pedregulho bem graduado, com presença de frações finas. Já o solo do subleito, com base nos ensaios que foram realizados, recebeu uma classificação geotécnica como sendo uma areia argilosa, onde a fração de argila enquadrou-se como um material de baixa compressibilidade. Para efeito de execução, o subleito foi compactado na energia intermediária, sem reuso de material (AMORIM, 2013).

Na construção da PECV, usaram-se os seguintes materiais:

1. Solo laterítico com presença de óxidos de ferro e alumínio, empregado nas misturas com Resíduos de Construção e Demolição – RCD, aplicado na camada de base da pista;
2. RCD, constituído de restos de concreto armado, fragmentos de alvenaria e piso cerâmico, coletados no lixão e em outros locais de descarte de resíduos no município de Cuiabá – MT, com controle de diâmetro para que pudesse ser enquadrado na classificação comercial da brita 2, ou seja, dimensões imediatamente menores que 25 mm;
3. Mistura de solo+RCD numa proporção de 25% de RCD para 75% de solo laterítico, onde o RCD foi composto de 50% de restos de concreto, 35% de materiais de alvenaria e 15% de restos de piso cerâmico;

4. Mistura asfáltica na forma de pré-misturado a frio (PMF) constituído por agregados compostos pelas frações de pedrisco, pó-de-pedra, proveniente de rochas calcárias dolomíticas e areia de rio, e ligante betuminoso na forma de emulsão RL-1C.

Com o objetivo de caracterizar e entender o comportamento mecânico dos materiais realizaram-se ensaios de laboratório e de campo com base em normas e procedimentos do DNIT, ABNT, AASHTO e ASTM.

Dentre os ensaios de laboratório realizados, encontram-se os seguintes: caracterização física dos materiais; caracterização química e mineralógica dos materiais; ensaio de compactação; ensaio de Índice de Suporte Califórnia – CBR; resistência à compressão simples; módulo de resiliência; cisalhamento rápido; análise de quebra dos grãos; ensaio de sucção. Os resultados completos encontram-se em Amorim (2013).

Os resultados dos ensaios de caracterização física (Tabelas 4.1 e 4.2; Figura 4.4) apontam o subleito como um solo com características de uma areia-argilosa, cuja fração de argila presente é de baixa compressibilidade com uma baixa concentração de óxidos e alumínio. Os ensaios de compactação e CBR, realizados com energias Proctor – normal e intermediária, sem reuso do material, apresentaram valores de CBR em torno de 9% para energia Proctor-normal e de 20% para energia Proctor-intermediária. Em função do benefício gerado pela energia intermediária em relação ao ganho de resistência obtido no ensaio de CBR, optou-se por adotar essa energia na regularização do subleito dessa pista.

Tabela 4.1 – Valores de γ_s , w_L , w_p e IP para a camada de subleito (AMORIM, 2013)

γ_s (kN/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	IP(%)
26,7	23	16	7

Tabela 4.2 – Parâmetros de compactação e CBR do solo da camada de subleito (AMORIM, 2013)

Energia	$w_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	Expansão (%)	CBR (%) (Imerso)	CBR (%) (Sem Imersão)
Proctor - Normal	15,96	17,1	0,8	9,1	9,3
Proctor - Intermediária	13,29	18,5	0,4	20,2	20,5

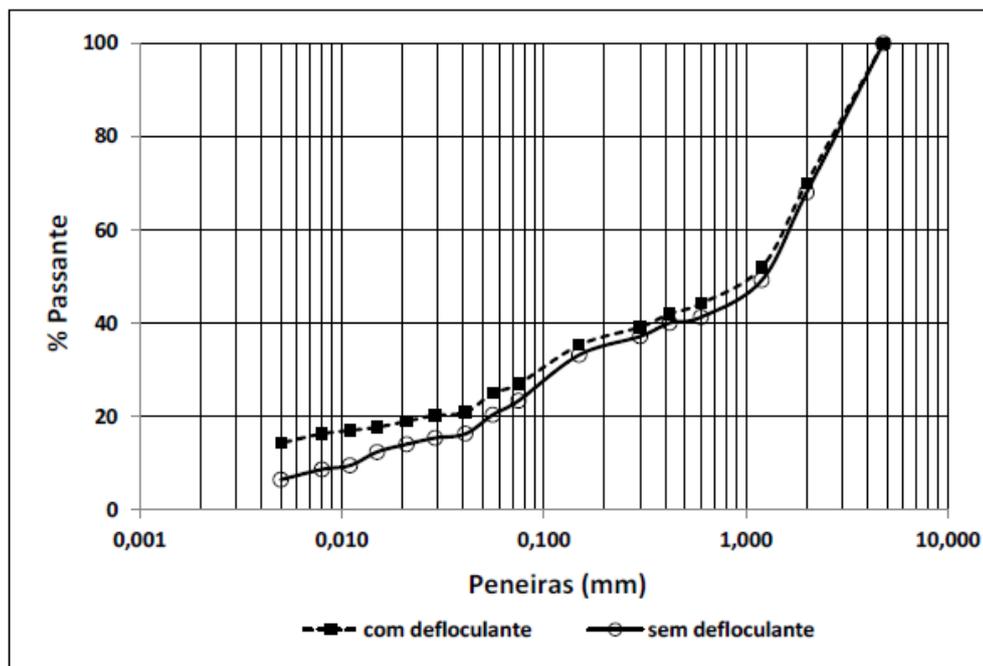


Figura 4.4 – Curvas granulométricas do solo da camada de subleito.
Fonte: AMORIM, 2013.

O cascalho laterítico utilizado na camada de base apresentou resultados (Tabelas 4.3 e 4.4; Figura 4.5) que o caracterizaram como um pedregulho bem graduado contendo, na sua composição, material argiloso de baixa compressibilidade, com quantidade acentuada de óxidos de ferro e alumínio, propriedades típicas do solo da região matogrossense. Os ensaios de compactação e CBR foram realizados para o solo laterítico com energia intermediária e modificada, resultando em valores de CBR entre 80% (Proctor - energia intermediária) e 86% (Proctor – energia modificada), diferença considerada pouco expressiva comparando as energias de compactação, como também para os ensaios com e sem imersão.

Tabela 4.3 – Valores de γ_s , w_L , w_p e IP para o solo laterítico da camada de base (AMORIM, 2013)

γ_s (kN/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	IP(%)
28,6	39	30	9

Tabela 4.4 – Parâmetros de compactação e CBR do solo laterítico da camada de base (AMORIM, 2013)

Energia	$w_{ótima}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	Expansão (%)	CBR (%) (Imerso)	CBR (%) (Sem Imersão)
Proctor - Normal	14,24	18,3	0,3	80,1	80,5
Proctor - Intermediária	12,53	18,7	0,2	85,6	85,5

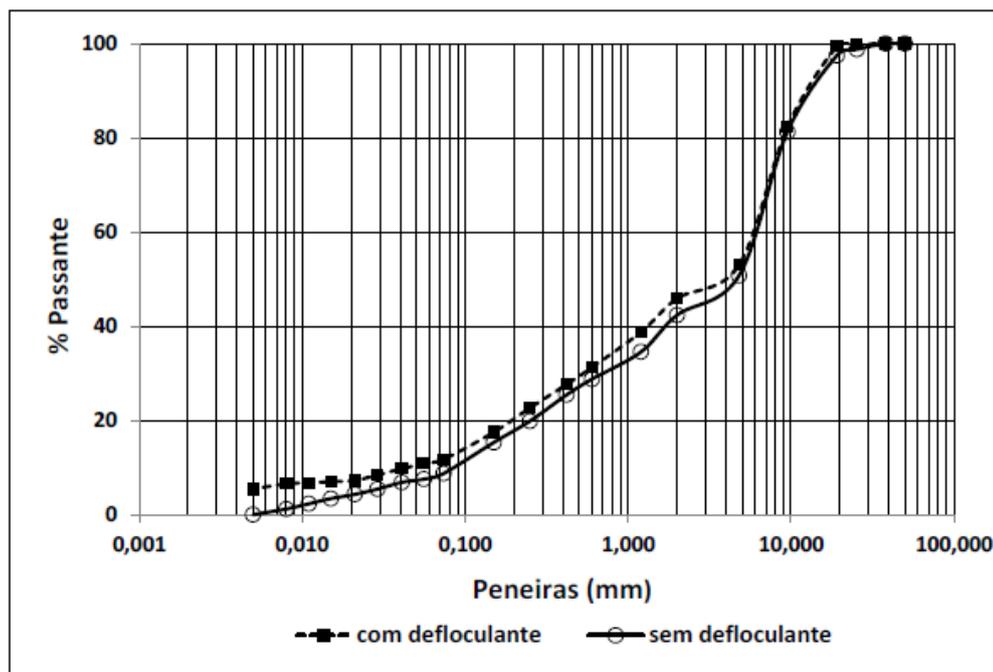


Figura 4.5 – Curvas granulométricas do solo laterítico da camada de base (AMORIM, 2013).

A mistura de solo laterítico e RCD foi ensaiada para as proporções de 15, 25 e 35% em massa de RCD e os resultados encontra-se em Amorim (2013). Com os resultados obtidos (Tabelas 4.5 e 4.6; Figura 4.6) nesses ensaios, optou-se pela proporção de 25% de RCD para 75% de solo laterítico para a realização dos demais ensaios (resistência à compressão simples; módulo de resiliência; cisalhamento rápido, análise de quebra de grãos e ensaio de sucção), cujos valores de CBR foram de 82,7% para energia Proctor intermediário e 88,5% para energia Proctor modificado, tendo em vista a proximidade dos valores de CBR obtidos para as demais misturas e a capacidade de produção de RCD gerado pelo Município de Campo Verde/MT (AMORIM, 2013).

Tabela 4.5 – Valores de γ_s , w_L , w_p e IP para as misturas de solo + RCD (AMORIM, 2013)

Mistura	γ_s (kN/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	IP(%)
15% RCD + 85% solo	27,8	39	29	10
25% RCD + 75% solo	27,3	38	30	8
35% RCD + 65% solo	26,8	40	30	10

Tabela 4.6 – Parâmetros de compactação e CBR para as misturas de solo + RCD (AMORIM, 2013)

Energia	Mistura	W _{ótima} (%)	γ _{dmáx} (kN/m ³)	Expansão (%)	CBR (%) (Imerso)	CBR (%) (Sem Imersão)
Proctor - Normal	15% RCD + 85% solo	16,85	17,4	0,02	81,6	81,8
	25% RCD + 75% solo	18,38	17,4	0,02	82,7	82,7
	35% RCD + 65% solo	19,12	17,5	0,02	82,9	82,8
Proctor - Intermediária	15% RCD + 85% solo	14,64	18,1	0,02	87,9	87,8
	25% RCD + 75% solo	15,34	18,3	0,02	88,5	88,7
	35% RCD + 65% solo	16,22	18,4	0,02	89,1	89,4

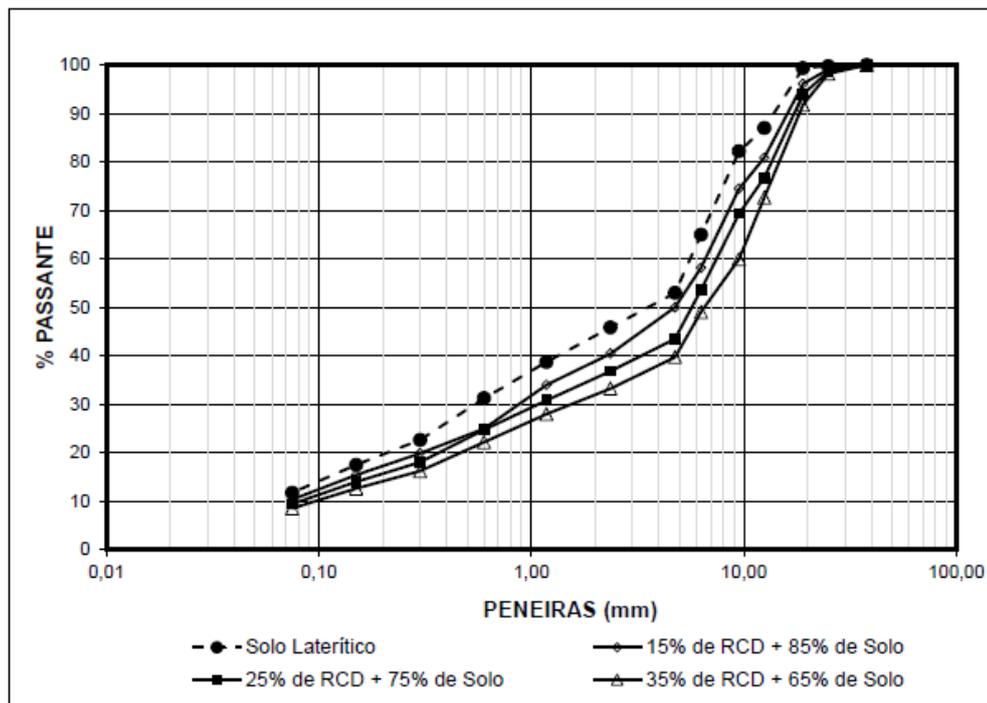


Figura 4.6 – Curvas granulométricas para as misturas de solo + RCD
Fonte: AMORIM, 2013.

- Módulo de Resiliência dos materiais da camada de base:

O ensaio de módulo de resiliência realizado para o solo laterítico puro usado nas camadas de base, permitiram a determinação dos valores médio, máximo e mínimo para os módulos de resiliência. No que diz respeito aos valores limites encontrados, os módulos de resiliências médios variaram de 157 a 203 MPa, os máximos variaram de 198 a 239 MPa e os mínimos tiveram os seus limites dentro do intervalo de 116 a 167 MPa. Estes valores encontram-se em concordância com os resultados apresentados por Medina e Preussler (1980), considerando diversos ensaios de MR para solos lateríticos brasileiros, onde obteve-se valores da ordem de 100 a 500 MPa.

Amorim (2013) destaca que as amostras de solo ensaiadas tiveram teores de umidade obtidos após o ensaio do módulo de resiliência, para verificar possíveis variações e interferências que esses teores podem produzir nas análises dos resultados obtidos. Contudo, esses valores estiveram bem próximos da umidade ótima encontrada para o solo (14,24 %), possuindo variações da ordem de mais ou menos 1%.

O ensaio de módulo de resiliência realizado para a mistura de solo laterítico puro e RCD, na proporção de 75% de solo para 25% de RCD, usado nas camadas de base, permitiram a determinação dos valores médio, máximo e mínimo para os módulos de resiliência. Com relação aos valores limites encontrados para essa mistura, os módulos de resiliências médios variaram de 182 a 242 MPa, os máximos variaram de 229 a 295 MPa e os mínimos tiveram os seus valores dentro do intervalo de 135 a 189 MPa. Numa análise comparativa entre os valores dos módulos de resiliência médios obtidos na condição do solo puro quando comparado à mistura de solo-RCD, pode-se observar que a adição do RCD ao solo elevou os seus valores de MR.

Os módulos de resiliência obtidos por Amorim (2013) com ensaio triaxial dinâmico realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do IFMT, Campus Cuiabá, para os materiais usados nas camadas de base do pavimento construído em Campo Verde estão na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores de Módulos de Resiliência obtidos a partir de ensaio triaxial dinâmico para os materiais de base do pavimento de Campo Verde (AMORIM, 2013).

Módulos de Resiliência - Pavimento de Campo Verde			
Solo Laterítico		Menor VL	Maior VL
Valores Médios	MPa	157	203
Valores Máximos		198	239
Valores Mínimos		116	167
Média=180.000KPa; DESVPADR=23000KPa; CoV=12,78%			
Solo +RCD		Menor VL	Maior VL
Valores Médios	MPa	182	242
Valores Máximos		229	295
Valores Mínimos		135	189
Média=242.000KPa; DESVPADR=53000KPa; CoV=21,90%			

Dentre os trabalhos de campo realizados encontram-se os ensaios de penetração dinâmica, realizado sobre a camada de base e subleito (com equipamento PANDA) e medidas de deflexões verticais (com viga Benkelman), realizados sobre a camada de revestimento, cujos resultados completos estão em Amorim (2013).

Os ensaios com Viga Benkelman foram realizados com base na ME 024 (DNIT, 1994), que recomenda para pistas de 5 metros de largura, o posicionamento do eixo de medição a 0,45 metros de cada borda da pista. Foram realizados ensaios a cada 5 metros da pista, totalizando 13 ensaios em cada borda, que foram denominados de Sentido 1 (borda direita da pista) e Sentido 2 (borda esquerda da pista). Uma linha de investigação adicional, denominada Sentido 03, foi realizada com o eixo de aquisição distante 1,5 metros da borda direita da pista (considerando o início na entrada do estacionamento da Unidade de Campo Verde), no sentido entrada do IFMT/interior do Campus, com o primeiro ponto de levantamento a 2,5 metros do portão e as demais distantes desta de 5,0 metros, totalizando 11 aquisições até o meio entre as estacas 50 e 55 metros (Figura 4.7).

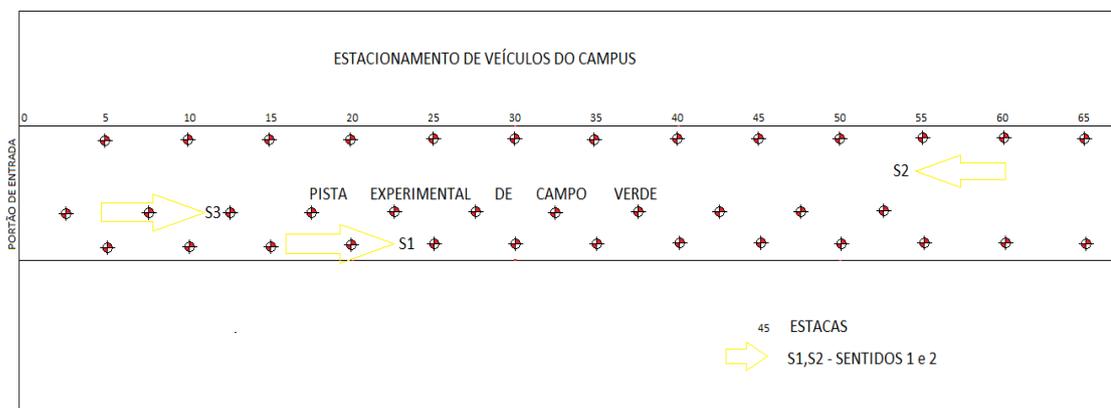


Figura 4.7 - Croqui de localização dos pontos de aquisição de dados da pista durante os ensaios com Viga Benkelman.

Com os dados deste ensaio foi possível representar em um gráfico as bacias médias de deflexão obtidas no primeiro trecho da pista com base constituída de solo laterítico puro (Figura 4.8). A sobreposição dos três perfis até o D100 sugere homogeneidade do material ao longo dessa seção. Nos três perfis, realizados nas bordas e na parte central da pista, o comportamento das deflexões nas camadas é semelhante, com uma pequena alteração a partir de D100 para o perfil do Sentido 1. Mesmo assim, as deflexões máximas (média igual a 105×10^{-2} mm e desvio padrão com valor de 11×10^{-2} mm) apresentam pequena variação estatística.

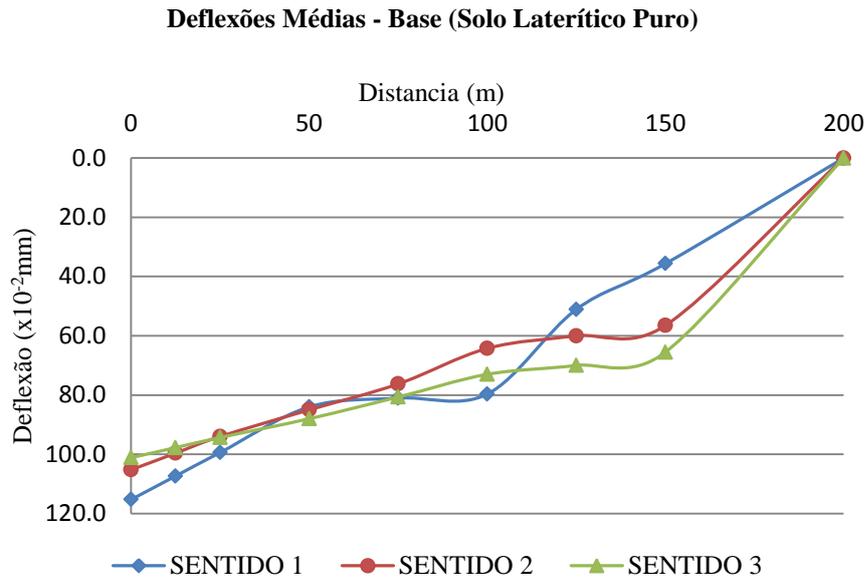


Figura 4.8 – Bacias deflectométricas obtidas no trecho de base constituída de solo laterítico puro, nos três Sentidos 1, 2 e 3.
Fome: Adaptado de AMORIM, 2013.

As bacias deflectométricas da Figura 4.9 representam os valores encontrados com o ensaio com viga Benkelman no trecho da pista para a camada de base constituída de solo+RCD (espessura de 10 cm) e de sub-base (espessura de 10 cm) constituída de solo laterítico, com valor de deflexão máximo de $112,5 \times 10^{-2}$ mm e sem grandes variações na extensão transversal da pista (AMORIM, 2013).

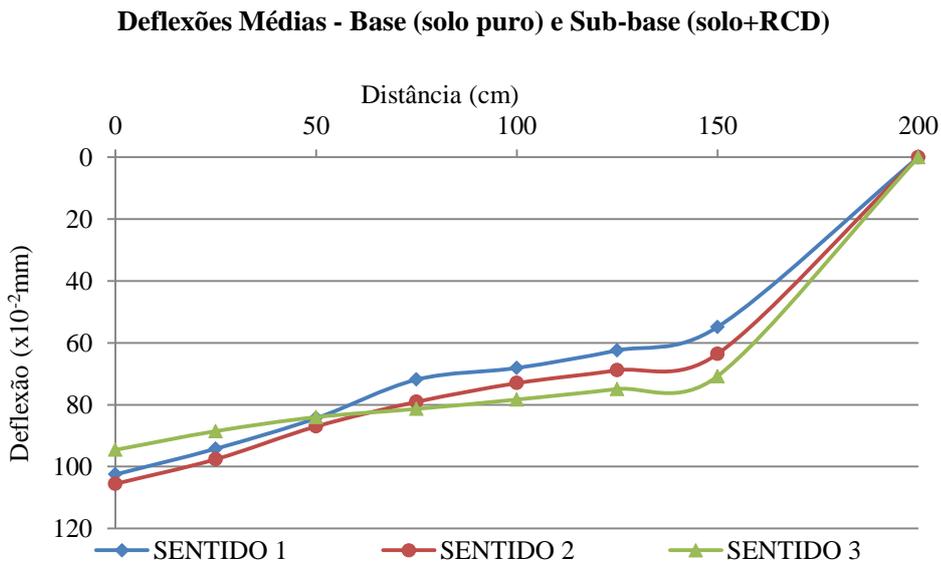


Figura 4.9 – Bacias deflectométricas obtidas no trecho de base constituída de solo laterítico puro e sub-base constituída de uma mistura de solo+RCD, nos três sentidos.
Fonte: Adaptado de AMORIM, 2013.

Na Figura 4.10, onde os dados foram adquiridos no último trecho da pista, com base constituída de uma mistura de 25% de RCD e de 75% de solo laterítico, houve um decréscimo na deflexão máxima apresentada para aproximadamente 97×10^{-2} mm e os perfis ao longo da extensão ensaiada apresentaram homogeneidade do material.

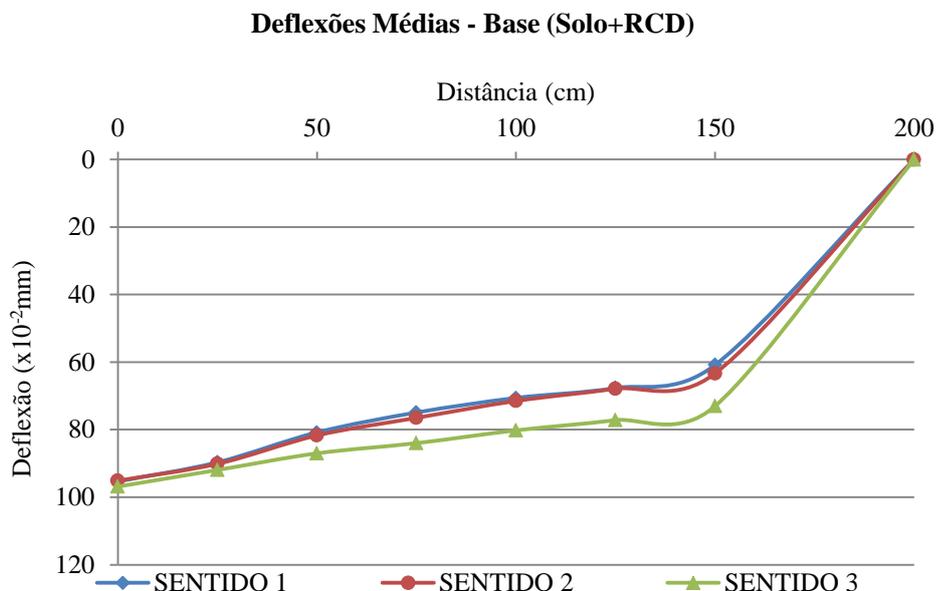


Figura 4.10 – Bacias deflectométricas obtidas no trecho de base constituída de uma mistura com 75% de solo laterítico e 25% de RCD, nos 3 Sentidos.
Fonte: Adaptado de AMORIM, 2013.

Na pista experimental de Campo Verde realizaram-se ensaios geofísicos e geotécnicos com o objetivo de obter informações para a realização da retroanálise, da análise de danos, e da análise probabilística do pavimento construído.

4.1.1 Aquisição de Dados com o GPR

O método GPR tem o seu melhor desempenho para a identificação das camadas, quando os materiais que as constituem possuem constantes dielétricas distintas. No caso das camadas de base e subleito, constituídas neste caso por solo retirado de uma área de empréstimo localizada próximo da obra, a resistência é controlada pela distribuição granulométrica dos seus agregados, e pela energia de compactação, o que nem sempre é suficientemente determinante para a alteração da constante dielétrica dessas camadas de solo.

Para evitar ambiguidades na correlação entre as camadas do pavimento com os refletores registrados pelo GPR, inseriram-se peças metálicas (vergalhões e placas de aço) nas

interfaces das camadas do pavimento durante a construção da Pista Experimental de Campo Verde.

Sobre a camada de subleito foram instaladas barras de aço (vergalhões) com diâmetro de $\frac{1}{4}$ polegadas (8 mm) no sentido transversal da pista, com aproximadamente 6 m de comprimento, localizadas nas estacas de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 65. Nessa mesma interface entre a camada de base e subleito foram implantadas placas de aço de chapa 16, com aproximadamente 1,97mm de espessura, com dimensões aproximadas e 0,08 x 0,05 m localizadas nas estacas 15, 25, 35, 45, e 65 e distantes um metro das margens da pista, com a finalidade de auxiliar na conversão de tempo de propagação da onda em profundidade de investigação (Figura 4.9).

Com a pista concluída, seguiram-se os trabalhos de medição das espessuras das camadas da estrutura do pavimento pela abertura de furos no revestimento e de pequenas trincheiras na borda direita da pista.

O primeiro perfil GPR foi realizado imediatamente após a regularização do terreno, com o objetivo de obter informações em subsuperfície do subleito.

Após a compactação da base, realizou-se uma aquisição de dados GPR, com a finalidade de obter informações sobre a interface base-subleito da estrutura do pavimento. No intuito de produzir um refletor hiperbólico evidente no radargrama e, principalmente, para auxiliar na conversão tempo x profundidade, instalaram-se vergalhões de aço na interface das camadas (Figura 4.11 e 4.12).



Figura 4.11 - Fotos ilustram a implantação de vergalhões e placas de aço no pavimento de Campo Verde. (a) vergalhões sobre o subleito; (b) placas de aço sobre o subleito; (c) e (d) vergalhões sobre a camada de base imprimada.

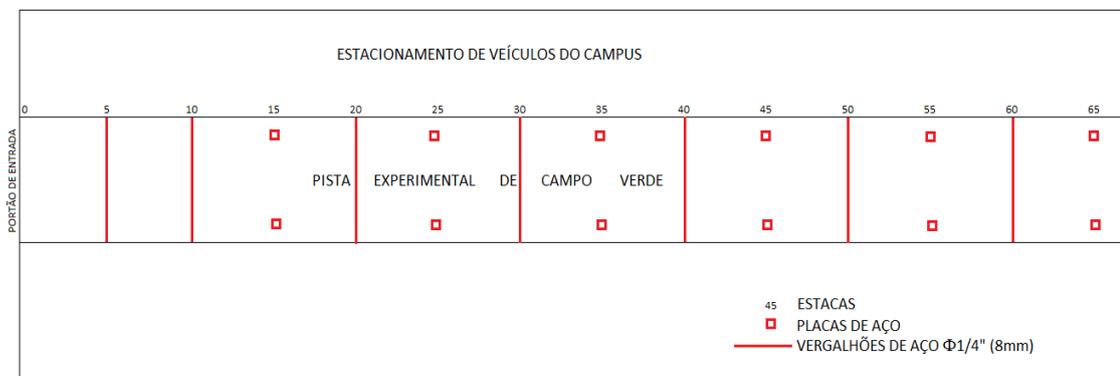


Figura 4.12 - Croqui com a localização das barras (vergalhões) e das placas de aço instaladas entre as camadas do pavimento da Pista Experimental de Campo Verde.

Do mesmo modo, após a finalização da camada de revestimento, também se realizou uma aquisição de dados GPR para obter informações sobre a interface revestimento-base.

Na campanha de aquisição de dados de GPR utilizou-se o equipamento SIR3000 (Geophysical Survey Systems – GSSI), acoplado a uma antena blindada de 900 MHz (Figura 4.13). Os parâmetros de aquisição foram: espaçamento entre os traços de 0,01 m, frequência de amostragem de 12797 MHz, 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,04 ns e janela temporal de 20 ns.



Figura 4.13 – Fotos ilustram a aquisição de dados de GPR, com o sistema SIR 3000 acoplado a uma antena blindada de 900 MHz.

A aquisição de dados de GPR realizou-se com auxílio de técnica do perfil de afastamento constante. Na pista adquiriram-se perfis paralelos, com comprimentos individuais de 65 metros, equidistantes de 0,20 m (Figura 4.14), o que totalizou 24 perfis (1560 metros lineares) e possibilitou a cobertura de 312 m² da pista.

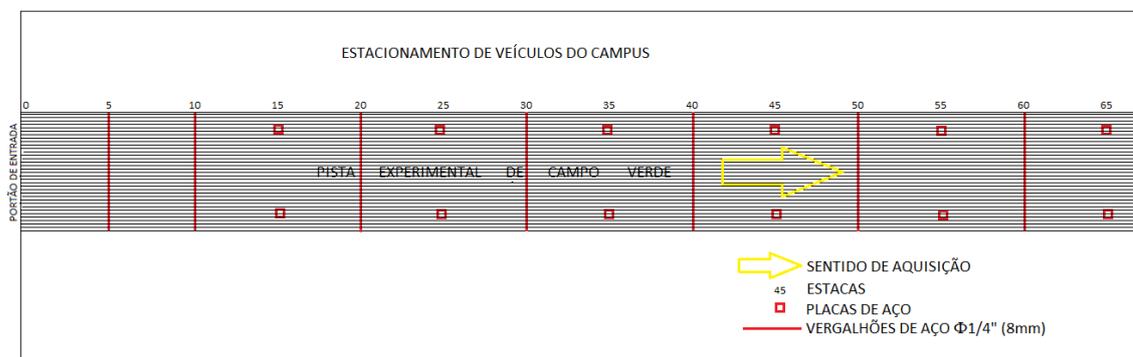


Figura 4.14 – Croqui com a localização dos perfis de GPR adquiridos ao longo da Pista Experimental de Campo Verde.

O processamento dos dados ocorreu no software ReflexW, versão 7.5 (SANDMEIER, 2014). A rotina de processamento consistiu no ajuste do tempo zero, aplicação de filtro temporal (*dewow*), de ganho manual (*manual gain* (y)), migração e conversão de tempo em profundidade (velocidade constante). As etapas de processamento aplicadas a todas as seções de GPR estão descritas a seguir:

1. Conversão de formato dos arquivos – os arquivos do *Detector Duo* possuem extensão *.dt. Deste modo o ReflexW converte estes arquivos para o formato *.ASCII, possibilitando assim o processamento e visualização conjunta dos dados;

2. Ajuste do tempo zero – definição da disposição do tempo zero do radargrama. Para o ajuste do tempo zero e da identificação do refletor correspondente aos alvos, os tempos de trânsito da onda eletromagnética foram ajustados, conforme o pico positivo da onda do radar (*wavelet*) refletida (YELF, 2006). De acordo com a frequência da antena, a posição do pico é modificada. Frequências menores possuem um maior comprimento de onda, aumentando assim o erro de posicionamento dos refletores;
3. Filtragem temporal 1D – remoção de frequências não desejadas (ruídos). Após a análise do espectro de amplitude dos dados, definem-se as frequências máximas e mínimas que serão utilizadas nos filtros. O filtro *subtract mean (dewow)* remove os ruídos de grande comprimento de onda (baixa frequência) relacionados às frequências de equipamentos eletrônicos. O filtro passa banda (*band pass frequency*) atua em cada traço independentemente no domínio da frequência, sendo utilizado para retirar ruídos aleatórios na faixa de frequência diferente do da antena (BORGES, 2007);
4. Migração de Dados – A migração de empilhamento de Difração é usado para melhorar a posição de alvos nas seções de GPR (GAZDAG e SGUAZZERO, 1984). O objetivo é reconstituir o mapa de reflexões do solo dos registros superficiais do GPR. O termo "migração" refere-se ao deslocamento dos eventos observados para a sua posição espacial real. Este é um processo inverso, onde todas as ondas registradas são propagadas de volta para o local correspondente original para o respectivo difrator.
5. Conversão da seção de tempo para profundidade – realizou-se um ajuste hiperbólico de alguns pontos de difração (barras de aço) encontrados ao longo dos perfis.

No processamento escolheu-se uma seção bruta, onde as hipérboles relacionadas aos vergalhões e placas estavam bem evidentes, aplicaram-se todas as etapas de filtragem, ganho e migração (Figura 4.15). Posteriormente gerou-se um arquivo MACRO com este procedimento e aplicou-o a todas as demais seções com o objetivo de normalizar a amplitude entre os perfis.

Na etapa de interpretação, usou-se a ferramenta de seleção (*picking*) do módulo 2D do software ReflexW. Na determinação das interfaces entre as camadas, usaram-se como guias, as hipérboles relacionadas aos vergalhões e às placas de aço instaladas ao longo do pavimento (Figura 4.16).

Com o objetivo de verificar a variação espacial da espessura das camadas dos pavimentos, bem como localizar as barras e as placas de aço dispostas nas interfaces destas camadas, usou-se o módulo 3D do ReflexW para a geração de um volume 3D de GPR. Na elaboração do volume utilizaram-se coordenadas arbitrárias, uma vez que o principal objetivo é verificar a espessura das camadas dos pavimentos.

Após a determinação das interfaces entre as camadas dos pavimentos, elaboraram-se mapas da espessura da camada de revestimento e da camada de base. A geração dos mapas ocorreu no software Surfer 11, usando-se o método de interpolação da krigagem linear entre os pontos.

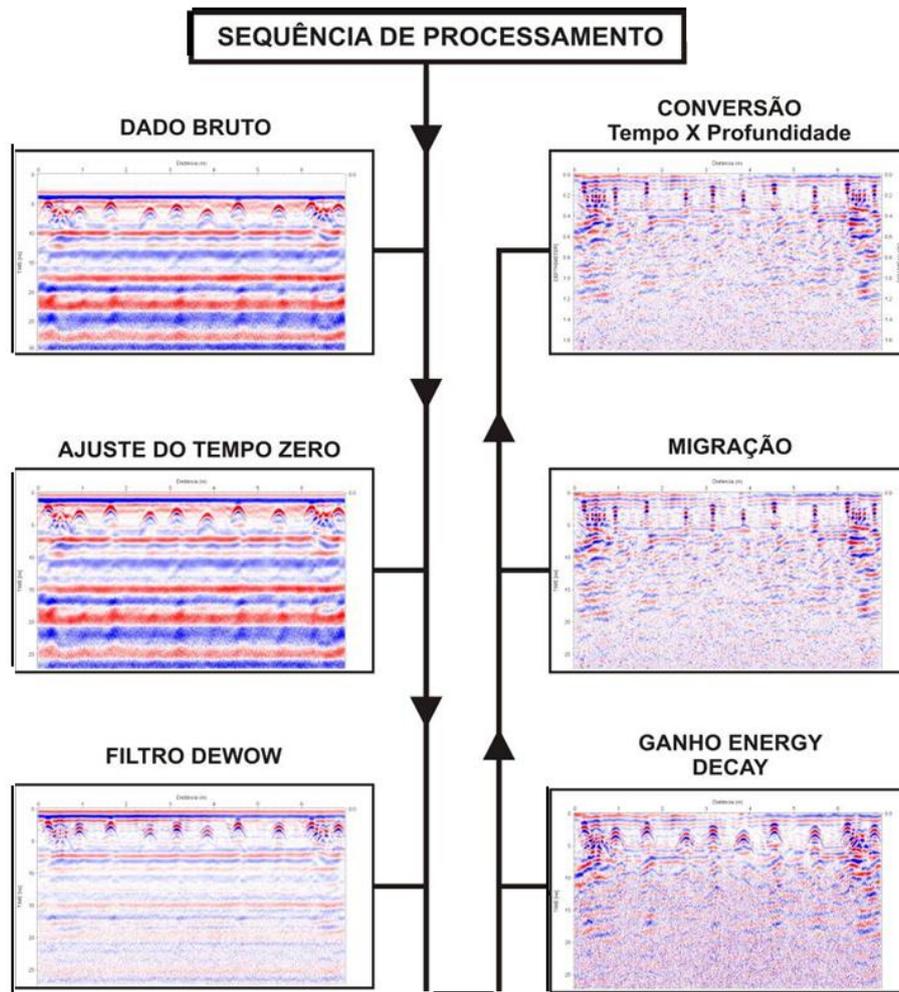


Figura 4.15 – Fluxograma de processamento dos perfis de GPR.

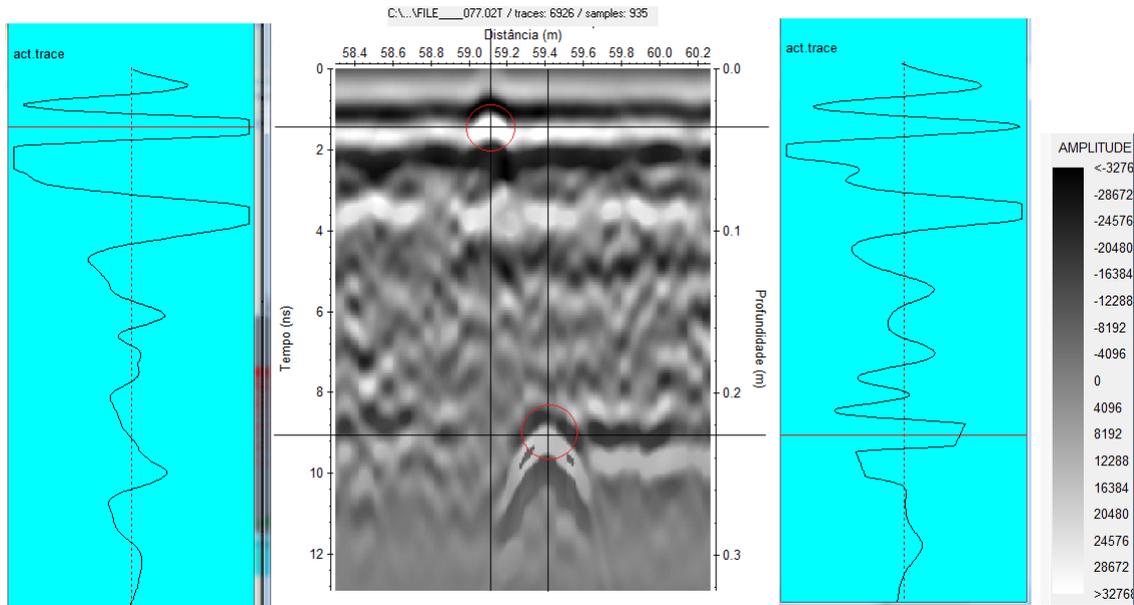


Figura 4.16 – Parte de um radargrama com ênfase nas hipérbolas relacionadas a barras de aço dispostas nas interfaces das camadas dos pavimentos. Na esquerda o traço no local da hipérbole relacionada a barra de aço disposta na interface revestimento/base, e na direita o traço sobreposto a hipérbole relacionada a barra de aço disposta na interface base/subleito.

4.1.2 Aquisição de Dados com a Viga Benkelman

Dois anos após a primeira aquisição de dados com viga Benkelman na Pista Experimental de Campo Verde, realizou-se uma nova aquisição de dados, com o propósito de comparar os resultados das duas campanhas. O procedimento de ensaio seguiu as recomendações da norma DNIT 133/2010-ME, (DNIT, 2010), versão mais atualizada da norma ME 024 (DNIT, 1994c). A primeira aquisição de dados nessa pista seguiu as prescrições dessa norma e usou a mesma Viga Benkelman de fabricação da PAVITEST, com uma relação entre os braços (a:b) de 2:1.

É importante destacar, que antecedendo à realização dos ensaios, a viga foi devidamente calibrada de acordo com as prescrições do PRO 175 (DNER, 1994). O valor da constante da viga é de 2,113.

Nessa aquisição de dados realizada em março de 2014, coletaram-se informações de deslocamentos verticais da estrutura do pavimento com Viga Benkelman nas mesmas localizações da campanha anterior para os Sentidos 01 e 02, ou seja, nas bordas direita e esquerda da pista, distante 0,45m destas (Figura 4.17). O sentido de aquisição de dados obedeceu à ordem crescente das estacas, para o Sentido 01, com o caminhão se deslocando de fora para dentro da área, ou seja, do início para o fim da pista e, para o Sentido 02, na ordem inversa (estacas em ordem decrescente).

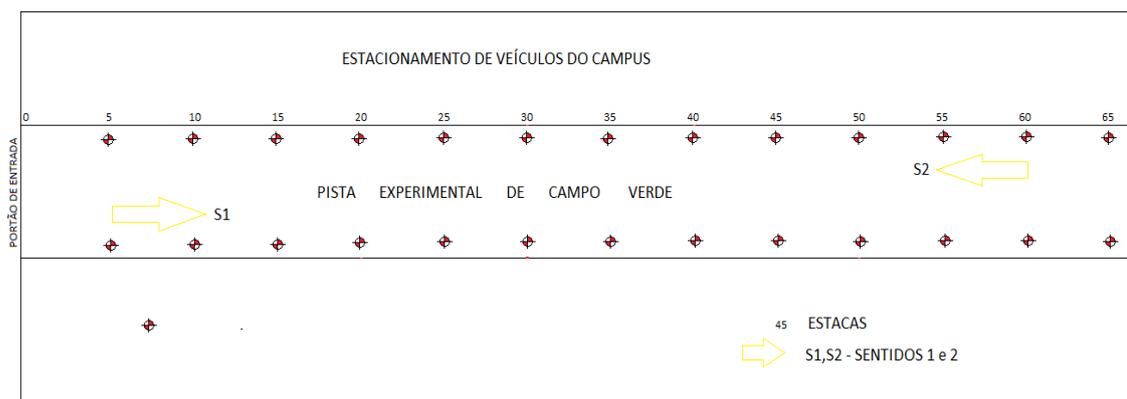


Figura 4.17 – Croqui ilustrando a localização onde foram adquiridos os dados do ensaio com viga Benkelman em março/2014.

Um caminhão com aproximadamente 8,2 tf de carga no seu eixo traseiro e pneus calibrados com 560 kPa (80 lb/pol²) foi utilizado durante o referido ensaio, conforme recomendação da norma do DNIT.

Em cada ponto da Pista Experimental de Campo Verde onde o ensaio foi realizado, foram tomadas medidas de deslocamento vertical com o extensômetro da viga sempre com o vibrador acionado, para não permitir travamento do ponteiro, sob o eixo traseiro do caminhão (D0), e para distâncias a partir deste, com 12,5 cm; 25,0 cm; 50,0 cm; 75 cm; 100 cm; 125 cm e 150 cm.

A temperatura ambiente observada durante o ensaio foi estimada em 30 graus e a temperatura da pista, em 37 graus centígrados.

4.1.3 Elaboração dos Gráficos das Bacias Deflectométricas

Os dados adquiridos com o ensaio com viga Benkelman possibilitaram a elaboração dos gráficos das bacias deflectométricas nos três trechos da pista.

Os gráficos de deslocamentos verticais ($\times 10^{-2}$ mm) versus deslocamentos horizontais (cm) dos pontos D0 a D150 para cada trecho, foram elaborados para as bacias de deflexão nos dois sentidos, Sentido 1 e Sentido 2, apresentados no capítulo de resultados. Um terceiro gráfico foi gerado a partir dos valores médios dos dados dos sentidos 1 e 2 de aquisição.

Os dados das deflexões medidas foram submetidos ao procedimento PRO 011 (DNER, 1979) para a determinação de parâmetros estatísticos como a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de aceitação dos valores desses dados.

4.1.4 Estudo da Retroanálise do Pavimento

O KENPAVE (HUANG, 2004), Edição 2003, é um programa computacional que permite inserir dados da estrutura do pavimento, como as características dos materiais constituintes das camadas, suas espessuras, o número de camadas e os dados esperados como resultados como as tensões, deformações e deflexões. Estas informações permitem a realização da análise de danos do pavimento.

O programa KENPAVE foi utilizado para realizar a retroanálise do pavimento experimental de Campo Verde. Esse programa apresenta a possibilidade de realização da retroanálise de pavimentos flexíveis (KENLAYER) e rígidos (KENSLABS).

A tela principal do KENPAVE oferece soluções para pavimentos rígido e flexível, como ilustrado na Figura 4.18. Neste trabalho serão usadas apenas as funções destinadas a retroanalisar os pavimentos de concreto asfáltico, os pavimentos flexíveis.

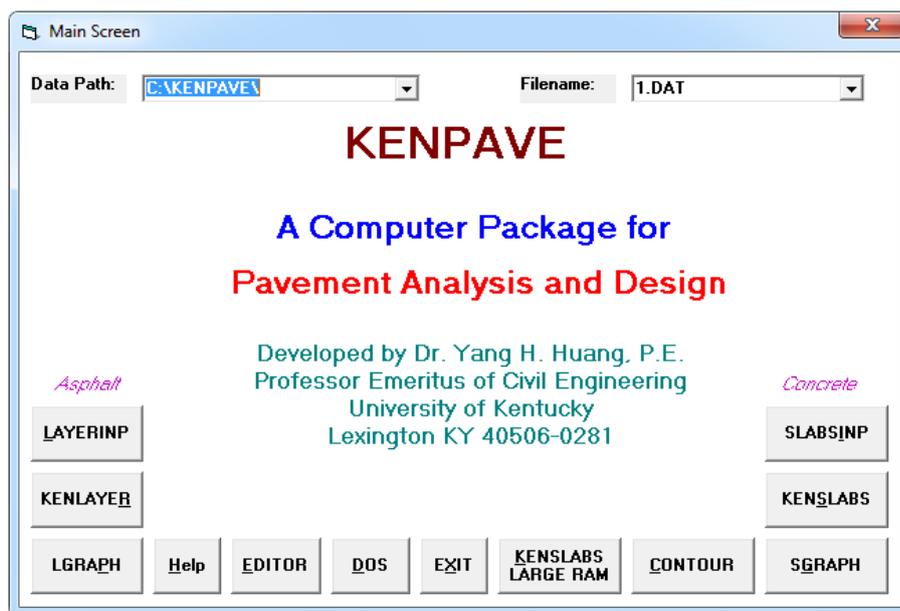


Figura 4.18 – Ilustração da página inicial do Programa KENLAYER (HUANG, 2004), Versão 2003.

O fluxo de processamento da retroanálise é relativamente simples e interativo. O objetivo da retroanálise é encontrar o melhor ajuste entre a curva deflectométrica correspondente à bacia medida, elaborada com os dados adquiridos com o ensaio com viga Benkelman, com a curva calculada pelo algoritmo do programa com os deslocamentos verticais e os dados inserir (Figuras 4.19).

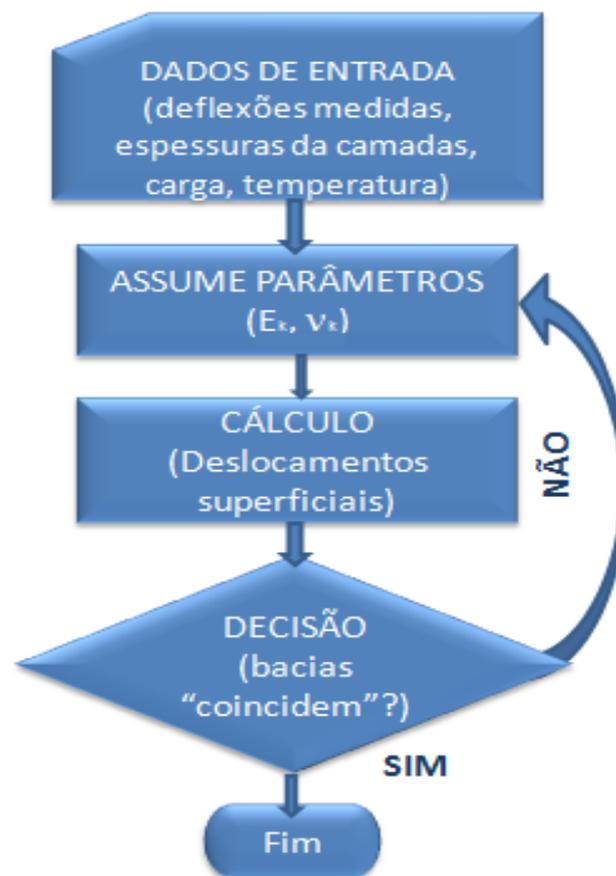


Figura 4.19 - Fluxograma de Retroanálise.
Fonte: FARIAS, 2013.

O programa KENPAVE permite realizar o estudo de retroanálise e análise de danos do pavimento após processar os dados de entrada inseridos nas “janelas” destinadas pra recebê-los. A primeira “janela” do KENLAYER, Figura 4.20, abre uma série de opções que estabelecerão os parâmetros para essa análise.

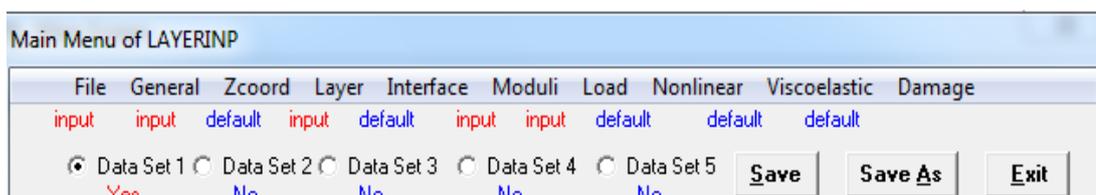


Figura 4.20– Programa Kenlayer (Huang, 2004). Janela inicial do programa destinada a escola das janelas que permitirão a parametrização do programa para a retroanálise e a análise de danos do pavimento.

A primeira opção (File) da janela do programa apresentada na Figura 4.18, permite que seja aberto um arquivo novo ou em uso para iniciar o processamento. Em seguida (opção

General) permite a entrada de dados associados à área de estudo e suas características gerais, que serão visualizadas na próxima tela do programa (Figura 4.21).

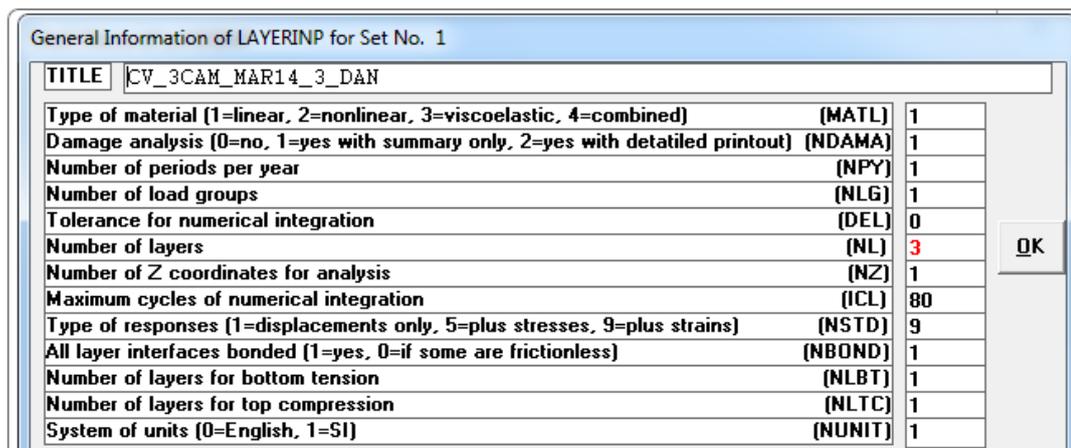


Figura 4.21 - Programa Kenlayer (Huang, 2004). Janela do programa em uso, destinada a caracterizar o pavimento a ser retroanalizado e que permite a opção por realizar a análise de dano.

Nessa janela é possível, depois de registrar um título para o arquivo (opção *Title*), escolher o tipo de material (opção *MATL*); optar por fazer ou não a análise de danos (opção *NDAMA*); escolher até 12 períodos no ano para fazer a análise de danos ou optar pelo número de períodos em que pode haver mudança significativa de valores dos módulos (opção *NPY*); permite configurar o número de grupos de cargas por eixos/rodas em até 12 (opção *NLG*); na opção *DEL*, é possível alterar o valor padrão da tolerância para integração numérica do programa (0,001); a opção *NL* permite inserir o número de camadas da estrutura do pavimento; permite controlar o número de coordenadas verticais onde se deseja adquirir dados de tensões e deformações calculadas (opção *NZ*); permite (opção *ICL*), alterar o valor padrão do número máximo de ciclos para integração numérica no programa (80); na opção *NSTD* permite determinar se o analista deseja apenas os deslocamentos verticais calculados ou se deseja também os valores de deformações de tração e de compressão; o programa permite escolher o tipo de interface entre as camadas (opção *NBOND*); escolher o número de camadas para obter os valores calculados para as deformações de tração na interface inferior da camada (opção *NLBT*); e o número de camadas para obter os valores calculados para as deformações de compressão no topo da camada (opção *NLTC*); por fim, o programa permite optar pelos sistemas de unidade: inglês ou internacional.

Na opção *Zcoord*, o programa abre a opção para que sejam registradas as coordenadas verticais dos pontos que se deseja analisar.

A janela *Layer*, permite caracterizar as camadas sob o ponto de vista de suas espessuras e dos seus respectivos Coeficiente de Poisson; *Interface* abre uma janela para informar quais as camadas que deslizam entre si; a opção *Moduli*, destina-se a receber informações sobre os valores dos Módulos de Resiliência de cada camada da estrutura do pavimento.

A janela *Load* (Figura 4.22), destina-se a receber informações sobre os tipos das cargas esperadas que serão aplicadas ao pavimento, a área de ação dos pneus sobre o pavimento e o valor dessas carga, as coordenadas do ponto central dos eixos horizontal e vertical , além das coordenadas dos pontos que se deseja obter informações sobre os deslocamentos verticais na superfície do revestimento.

Unit	cm	kPa	cm	cm		
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW	NR or NPT
1	1	10	560	30	0	7

Figura 4.22 – Programa Kenlayer (Huang, 2004). Janela do programa com os dados inseridos, destinada a caracterizar a carga vertical aplicada e as coordenadas dos pontos onde se deseja obter os deslocamentos verticais no revestimento.

As opções *Nonlinear* e *Viscoelastic* abrem a possibilidade de caracterizar materiais não-lineares e viscoelásticos constituintes das camadas do pavimento, se assim desejar, e a opção *Damage*, é aquela que se destina a caracterizar a análise de danos do pavimento.

O KENPAVE processa os dados de entrada que serão inseridos nas “janelas” que o programa oferece; após, calcula os deslocamentos verticais, as tensões e deformações nas camadas subjacentes do pavimento para fins de estudo de retroanálise e análise de danos.

Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pelo tipo de material elástico linear para todas as camadas da estrutura do pavimento. Em seguida, foi feita a opção pela não realização da análise de danos, mas apenas a retroanálise do pavimento, fornecendo informações dos deslocamentos verticais que permitem a elaboração da bacia deflectométrica calculada. Na sequência, foi escolhido apenas um período no ano em que pode haver alterações nas características dos materiais usados nas camadas do pavimento. Optou-se, também, por informar ao programa apenas um grupo de cargas, ou seja, veículo com eixo simples e roda dupla ou eixo simples padrão (ESP), usado no ensaio de viga Belkeman.

Quanto ao número de camadas, a estrutura em estudo possui três camadas (revestimento, base e subleito). Por fim, nessa janela do programa, pode-se acionar a opção de solicitar informações sobre as deformações produzidas pela carga vertical aplicada.

Considerando que a análise de danos é realizada com o objetivo de conhecer a deformação de tração na superfície inferior da camada de revestimento e de compressão na superfície superior da camada de subleito, optou-se por escolher essas duas variáveis.

O programa, então, solicita as informações de espessura e Coeficientes de Poisson das camadas da estrutura do pavimento. Os valores de espessuras médias fornecidos pelo GPR foram de 4,2 cm para o revestimento e 25,1 cm para a camada de base. Os coeficientes de Poisson foram estabelecidos como sendo igual a 0,3 para as três camadas.

Na janela seguinte o programa solicita os valores dos Módulos de Resiliência das camadas do pavimento. O programa KENPAVE não realiza retroanálises automaticamente. Durante o processo de retroanálise de um pavimento, cabe ao usuário fornecer os valores de Módulos de Resiliência das diversas camadas e se certificar do ajuste entre as bacias medida e calculada. Em seguida o programa KENPAVE solicita as informações do tipo de carga considerada para o tráfego. Optou-se pelo eixo simples/roda dupla (ESP).

No método mecanicista para projeto de pavimentos, segundo Huang (2004), é necessário conhecer a área de contato entre o pneu e o pavimento, de modo que a carga do eixo possa ser assumida como sendo distribuída uniformemente sobre ela. O tamanho da área de contato depende da pressão de contato.

As coordenadas inseridas no programa para localização da intersecção dos eixos ortogonais, horizontal e vertical, foram às correspondentes ao ponto localizado entre os pneus, tendo como eixo vertical a direção coincidente com o eixo traseiro do veículo e, como horizontal a direção longitudinal da pista. As coordenadas dos pontos onde se deseja informações sobre os deslocamentos verticais produzidos pela carga aplicada no eixo traseiro do veículo e que produz a bacia de deflexões, foram coincidentemente aquelas onde foram levantados os deslocamentos verticais por ocasião da realização do ensaio com a viga Benkelman e que foram denominados D0 (ponto de intersecção dos eixos horizontal e vertical); D12.5 (12,5cm a frente de D0); D25.0 (25,0cm a frente de D0); D50.0 (50,0cm a frente de D0); D75.0 (75,0cm a frente de D0); D100.0 (100,0cm a frente de D0); D125.0 (125,0cm a frente de D0); e D150.0 (150,0cm a frente de D0; Figura 4.23).

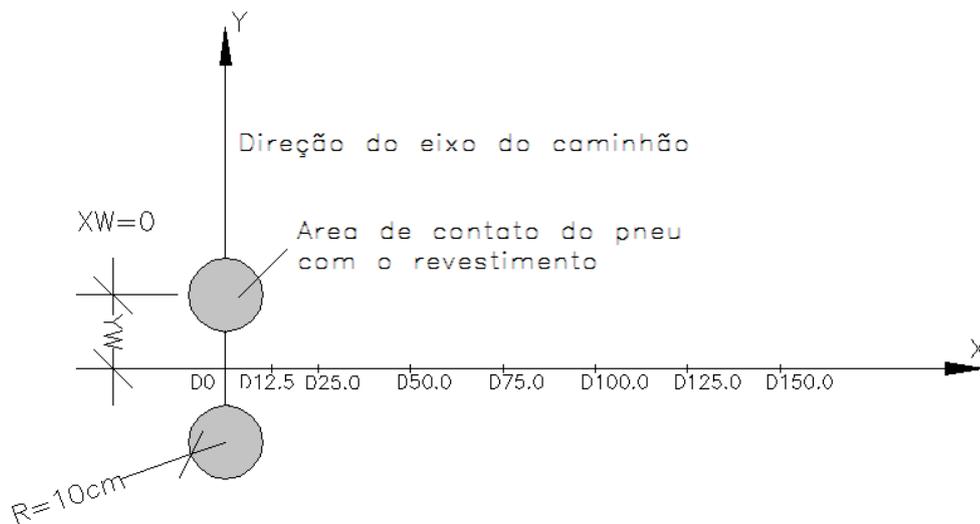


Figura 4.23 – Dados fornecidos para o programa KENPAVE para as coordenadas dos locais onde se deseja obter os deslocamentos verticais referidos à bacia de deflexão calculada.
Fonte: Adaptado de HUANG, 2004.

4.1.5 Análise de Danos do Pavimento

Após a definição da opção pela realização da análise de danos do pavimento na janela *General* do programa, os parâmetros iniciais adotados foram os mesmos usados para o estudo da retroanálise e que permitiram o ajuste das bacias medida e calculada de deflexões. Para concluir a parametrização, o usuário deve indicar as camadas onde deseja obter informações sobre as deformações e tensões. Para determinação da deformação de tração, a camada indicada é a primeira (camada 1), de revestimento, que é informada, e os coeficientes de fadiga usados para o cálculo do número permitido de passadas (N_f), são adotados com valores sugeridos pela *Asphalt Institute*, respectivamente de $f_1 = 0,0796$; $f_2 = 3,291$ e $f_3 = 0,854$.

Para a determinação da deformação de compressão, foi escolhida a 3ª camada (topo do subleito), e os valores dos coeficientes de deformação permanente adotados foram, também, os sugeridos pelo *Asphalt Institute* ($f_4 = 1,365 \times 10^{-9}$ e $f_5 = 4,477$). Para o número de cargas de repetição estabelecidas em projeto por período, optou-se por estabelecer o valor 1 e, posteriormente, durante a análise de danos, indicar o valor de N_p (número de passadas de projeto).

Com esses parâmetros fornecidos para o programa, o passo seguinte consistiu em processá-los e solicitar o fornecimento dos valores calculados.

Com esses valores, é possível calcular o valor de N_f , pela equação:

$$N_f = f_1 \cdot (-\varepsilon_r)^{-f_2} \cdot (E_r)^{-f_3} \quad (4.4)$$

A análise de danos consiste em fazer uma comparação do resultado de Nf com o valor esperado de Np (número de passadas previstas no projeto).

Miner (1945) estabeleceu que a ruptura de uma peça solicitada dinamicamente ocorre quando a soma da razão entre o número de ciclos aplicados de tensão máxima (n_i) pelo número que provoca a ruptura (N_i), considerando as diversas cargas (P_i) é igual à unidade:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (4.5)$$

É de se esperar, portanto, que na trilha de rodas, na parte inferior do revestimento, a trinca surja quando se tenha a condição expressa na equação 4.5 onde, no dimensionamento de pavimentos, N_i é o número de repetições de carga P_i que causa a ruptura e n_i é o número de repetições esperado de carga P_i na vida de projeto (MONISMITH e DEACON, 1965).

4.1.6 Análise Probabilística do Pavimento

Após o estudo de retroanálise do pavimento, realizou-se um estudo de sensibilidade aplicando o método probabilístico F.O.S.M. (*First Order, Second Moment*), considerando os principais parâmetros geotécnicos relacionados com o comportamento do pavimento. Dada à impossibilidade de obter a derivada de forma analítica neste trabalho, como foi comentado no Capítulo 3, ela foi determinada de maneira numérica, onde se variou em $\pm 10\%$ cada parâmetro do solo, seguindo as recomendações de Sandroni e Sayão (1992). Aplicaram-se, para isso, as equações 3.51, 3.52 e 3.53, para os incrementos em avanço, centrados e em atraso, respectivamente.

Para a análise probabilística do pavimento da PECV, o Método FOSM foi aplicado às deformações de tração na base do revestimento asfáltico e de compressão no topo do subleito, tendo como variáveis aleatórias as espessuras das camadas da estrutura do pavimento e os seus respectivos módulos de resiliência.

4.2 PISTA DA AVENIDA ANTÁRTICA (PAA), EM CUIABÁ-MT

A obra de pavimentação e de drenagem das águas pluviais da duplicação da Rodovia Chico Mendes, antiga Avenida Antártica, trecho da MT-400, próximo de Cuiabá, primeira etapa do trecho Ribeirão da Ponte/Avenida Rondonópolis, possui a extensão de 1,6

quilômetros. A obra tem pista dupla, com canteiro central, a partir da ponte do Ribeirão da Ponte até a Rua Rondonópolis no bairro Novo Colorado (Figura 4.24).

O desenvolvimento dos ensaios ocorreu no trecho da pista, entre a estaca 98 (imediatamente após a COHAB Jardim Junqueira) e a estaca 131. O estaqueamento foi de 20 metros, o que compreende um trecho de 660 metros.



Figura 4.24 – Imagem de satélite do trecho de 660 metros de extensão da pista da Avenida Antártica, em fase de construção entre as estacas 98 (Lat. 15°33'31,04"S; Lon.56°8'18,20"O) e 131 (Lat. 15°33'17,69"S; Lon.56°8'37,14"O) compreendendo a área de estudo.

O serviço de regularização da área, com as etapas de terraplanagem, corte e aterro e os trabalhos de topografia para o estaqueamento, estavam sendo finalizados quando se iniciaram os ensaios de campo. Os trabalhos de acompanhamento da construção desse trecho coincidiram com o término da construção das camadas de reforço de subleito e com o início de implantação das camadas de revestimento, base e sub-base da estrutura do pavimento.

O solo siltoso, encontrado no local, é proveniente do intemperismo de filitos (rocha metamórfica com granulação fina, constituída por biotita, sericita, caulinita, clorita e quartzo) conforme ilustrado na Figura 4.25.

Nos locais da pista, onde houve remoção de material (filito alterado) com característica de baixa resistência mecânica e alta expansibilidade, assentou-se uma camada de reforço de subleito, constituída de um material laterítico com espessura variável para regularização da pista (Figura 4.26).

Alguns ensaios foram realizados para caracterização dos materiais constituintes das camadas da estrutura da Avenida Antártica e serão apresentados a seguir.



Figura 4.25 – Folhelhos de filito encontrado durante os trabalhos de regularização da área (a) e o reforço de subleito compactado sobre o solo regularizado(b).

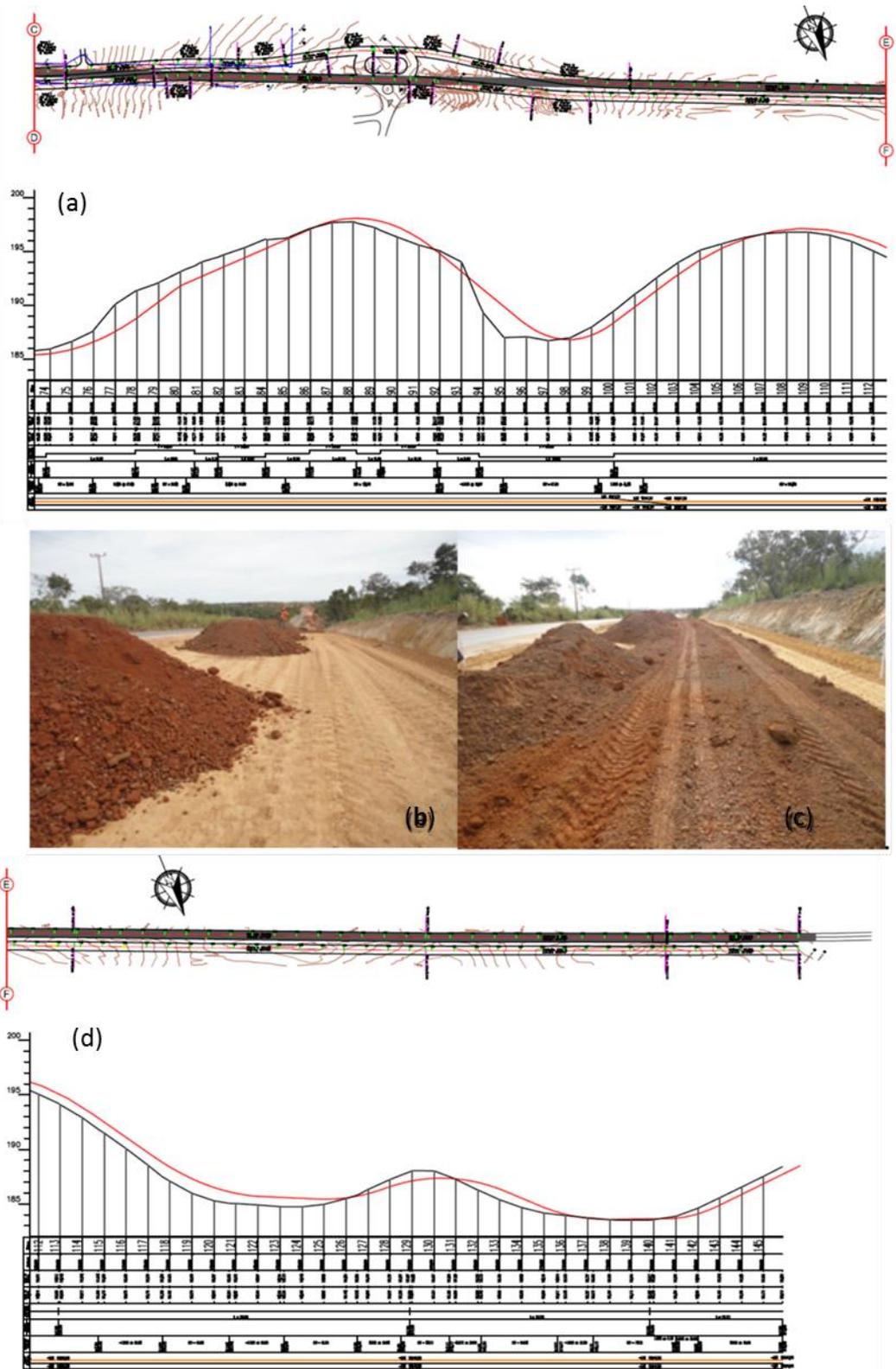


Figura 4.26 – (a) e (d) Topografia primitiva (linha preta) e projetada (linha vermelha) da pista da Avenida Antártica com a indicação da numeração das estacas; (b) fotografia da camada de reforço de subleito compactada e o material para a camada de base/sub-base esperando para ser espalhado, como em (c).

Na PAA também se realizaram ensaios geofísicos e geotécnicos com o objetivo de obter informações para a realização da retroanálise, da análise de danos, e da análise probabilística do pavimento construído.

4.2.1 Extração de Núcleos da Camada de Revestimento

Para a realização dos ensaios de caracterização dos materiais da camada de revestimento, três núcleos foram extraídos da pista, respectivamente nos locais onde estavam cravadas as estacas 103, 108 e 115, distantes entre si de 100 e 140m, respectivamente (Figura 4.27).

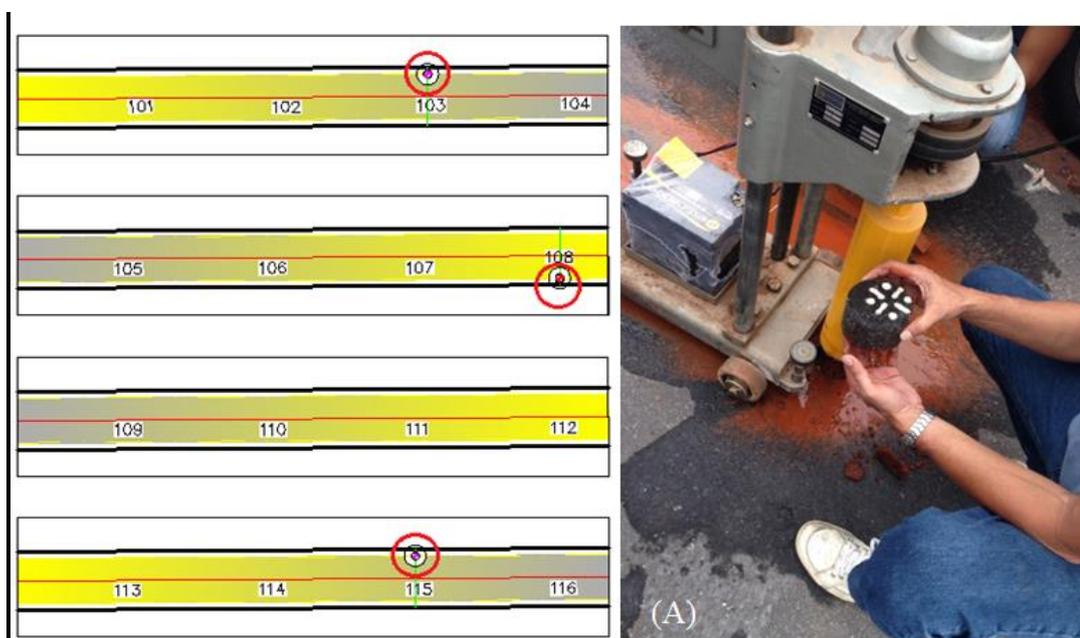


Figura 4.27 – Localização dos pontos amostrados por extração de núcleos de revestimento, com relação às estacas; (A) fotografia evidencia a extração de um núcleo de revestimento.

As amostras extraídas da camada de revestimento foram levadas para o laboratório do IFMT onde foram realizadas limpeza e medida das dimensões dos núcleos; ensaios para determinação da densidade aparente e do grau de compactação (DNER-ME 117/94); ensaios para determinação da composição granulométrica das amostras (DNER ME 083/98); teor de betume/ligante (DNER ME 053/94), estabilidade e fluência (DNER ME 043/95). A partir desses dados parâmetros físicos foram obtidos: volume de vazios V_v (%), grau de compactação, relação betume vazios RBV (%).

4.2.2 Ensaios de Compactação das Camadas

Os ensaios de Compactação e de ISC/CBR dos solos das camadas de reforço de subleito, sub-base e base foram realizados nas energias Proctor Normal, Intermediário e Modificado, respectivamente. Esses ensaios foram orientados pelas normas da ABNT NBR 7182/86 e NBR 9895/87, respectivamente.

4.2.3 Ensaios com a Viga Benkelman

Os ensaios com viga Benkelman foram realizados nessa área de estudo, 10 meses após o início da construção de sua estrutura propriamente dito. A pista ainda não havia sido entregue ao tráfego.

O procedimento de ensaio seguiu as mesmas recomendações utilizadas na Pista Experimental de Campo Verde, ou seja, seguiram os procedimentos da norma DNIT 133/2010-ME, (DNIT, 2010), versão mais atualizada da norma ME 024 (DNER, 1994c). Utilizou-se, também, a mesma viga Benkelman de fabricação da PAVITEST, com uma relação entre os braços (a:b) de 2:1 (Figura 4.28). Antes da realização dos ensaios das PECV e PAA, a viga foi devidamente calibrada de acordo com as descrições do procedimento PRO 175 (DNER, 1994d), e o valor de 2,113 foi encontrado para sua constante..



Figura 4.28 – (a) Detalhe do momento da aferição da viga Benkelman; (b) Ensaio com a viga na margem esquerda da pista e; (c) ensaio na margem direita da pista da Avenida Antártica.

O trecho compreendido entre as estacas 98 e 131 corresponde aos 660 metros de pista desta área de estudo. A aquisição de dados com viga Benkelman foi realizado, no Sentido 1, na borda direita da pista, no sentido Cuiabá-Sucurí. Como a pista estudada tem 8 metros de largura, a distância entre a borda da pista e o ponto central de cada aquisição, foi fixado em

0,9 m. O início dos ensaios foi concentrado na estaca 98 e, nessa borda, as aquisições foram feitas em estacas alternadas, ou seja, nas estacas 98, 100, 102, e assim sucessivamente, até a estaca 132 (Figura 4.29).

Finalizadas as aquisições de dados na borda direita da pista, iniciaram-se os trabalhos na borda esquerda, no sentido inverso, Sentido 2, ou seja, iniciando na estaca 131 e seguindo, alternadamente, fixando os pontos de aquisição nas estacas 129, 127, 125 e assim sucessivamente, até a estaca 99. A distância do ponto central do ensaio foi fixada, novamente, a 0,9 m da borda esquerda da pista (Figura 4.29).

Um caminhão do tipo “toco” com aproximadamente 8,2 tf de carga no seu eixo traseiro e pneus calibrados com 560 kPa (80 lb/pol²) foi utilizado durante o referido ensaio, conforme recomendação da norma do DNIT.

Em cada ponto onde o ensaio foi realizado, foram tomadas medidas de deslocamento vertical com o extensômetro da Viga, sempre com o vibrador acionado para não permitir travamento do ponteiro, sob o eixo traseiro do caminhão (D0), e para distâncias a partir deste, com 12,5 cm; 25 cm; 50 cm; 75 cm; 100 cm; 125 cm e 150 cm.

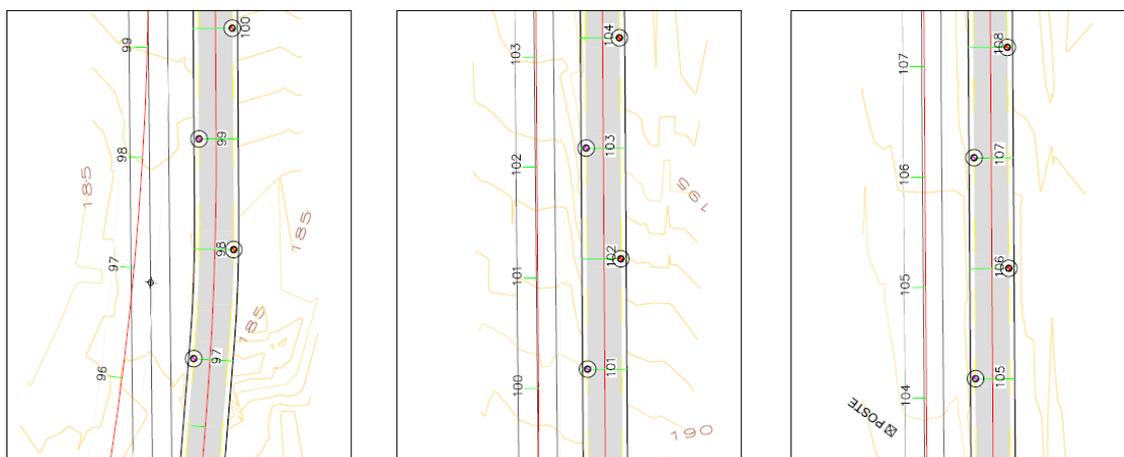


Figura 4.29 – Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios de viga Benkelman nas primeiras estacas – Sentido 1, estacas pares; Sentido 2, estacas ímpares.

A temperatura ambiente observada durante o ensaio foi estimada em 32 graus e a temperatura da pista, em 39 graus centígrados.

4.2.4 Elaboração dos Gráficos das Bacias Deflectométricas

Os dados adquiridos com o ensaio com viga Benkelman possibilitaram a elaboração dos gráficos das bacias de deflexão nos dois sentidos da pista. Foram elaborados dois

gráficos, com as bacias de deflexão construídas com os dados levantados nos dois sentidos: Sentido 1 e Sentido 2. Com esses dados foi possível elaborar um terceiro gráfico, com a média dos resultados apresentados para os dois sentidos de aquisição.

No que diz respeito às análises das deflexões medidas, essas bacias defletoométricas tiveram seus dados submetidos ao procedimento PRO 011 (DNER, 1979) para a determinação de parâmetros estatísticos como a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de aceitação dos valores.

4.2.5 Instalação das Placas de Aço nas Interfaces das Camadas

Após a construção da camada de reforço de subleito e sua compactação, iniciaram-se os trabalhos de implantação das placas de aço para, após a construção da pista, serem detectadas pelos sinais de radar, com o propósito de referenciar as interfaces das camadas.

Essas placas foram adquiridas a partir do resíduo de uma fábrica de perfis de aço e, por terem sido cortadas e descartadas em grande quantidade com as mesmas dimensões, permitiram uma uniformidade na sua implantação entre as camadas do pavimento. A chapa cortada tinha espessura de 1,97 mm (16 BWG) e as dimensões das placas enterradas tinham aproximadamente 15,5cm de comprimento e 4,5 cm de largura (Figura 4.30).

A implantação das placas nas interfaces entre as camadas do pavimento seguiram uma orientação visando à passagem da antena do radar no sentido ortogonal à sua maior dimensão (Figura 4.31). A orientação para a localização das placas que foram assentadas sobre a camada de subleito foi de distar das estacas pares, iniciando da estaca 98, de 1,5m; para a camada de reforço de sub-leito, a distância foi estabelecida em 1,5m, porém, nas estacas ímpares; para a camada de sub-base, novamente nas estacas pares, porém, distante das estacas de 2,0 m. Sobre a camada de base, entretanto, foi necessário fazer uma modificação no referencial para localizar essas placas, visto que grande parte das estacas tinha sido retirada. A solução foi distar da borda do revestimento de 1,3 m, para ter uma referência para as campanhas de GPR (Figura 4.32).

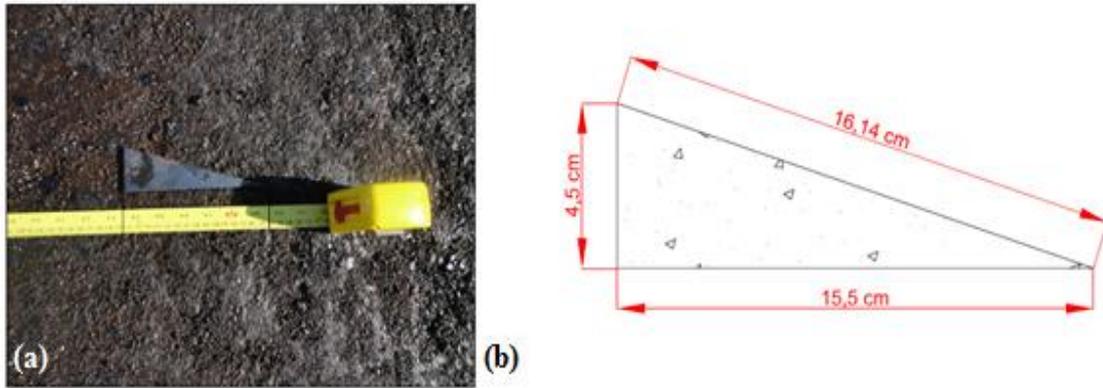


Figura 4.30 - (a) Placa de aço usada como referência entre os contatos das camadas da estrutura do pavimento da Avenida Antártica, em Cuiabá-MT, para produzir um refletor hiperbólico no perfil de GPR e identificar essas interfaces entre as camadas; (b) Dimensões das placas de aço.

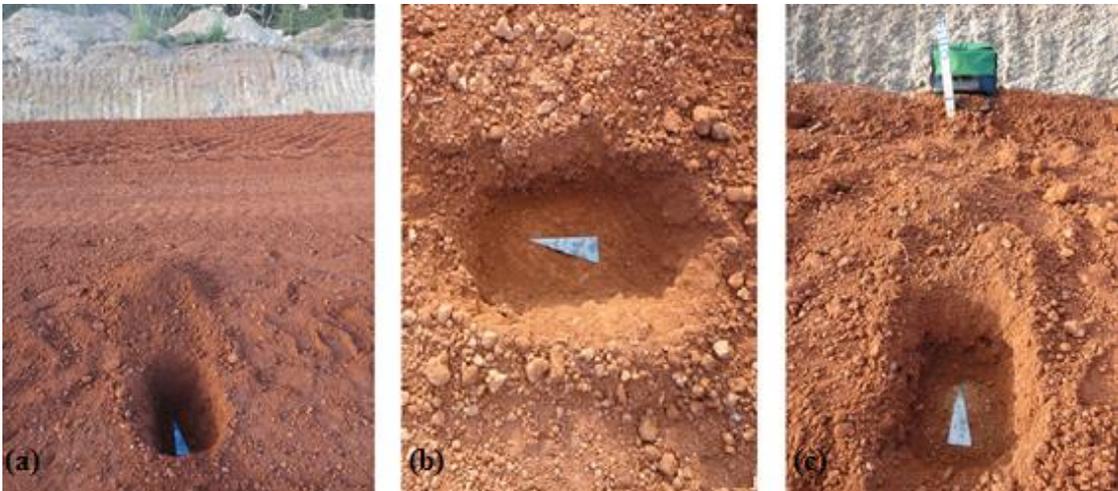


Figura 4.31 - Localização das placas instaladas nas interfaces das camadas da estrutura da pista – (a) No lado esquerdo – sentido Cuiabá/Sucuri (b) Na interface das camadas de reforço de subleito e base e (c) No lado direito da pista – sentido Cuiabá/Sucuri.

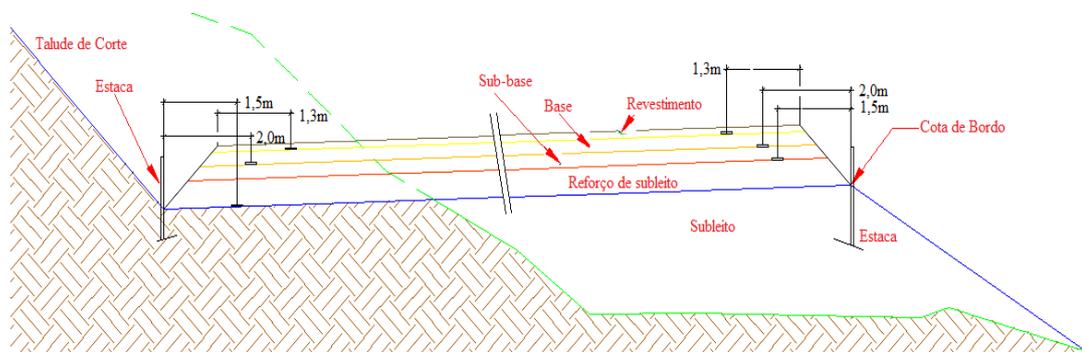


Figura 4.32 – Localização das placas de aço.

4.2.6 Registro da Localização das Placas com a Equipe de Topografia

Os trabalhos topográficos se iniciaram pela implantação de uma poligonal fechada (Poligonal de Apoio), contendo três vértices de apoio denominados E1, E2 e E3. Esses

vértices foram demarcados no solo com piquetes e por estacas. Para obter os dados angulares e lineares foi utilizada uma Estação Total da marca Geodetic, modelo G2, de precisão linear de $\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$ (partes por milhão da distância) mais ou menos $2 \text{ mm} + 2$ e precisão angular de $2''$ (dois segundos) com o auxílio de 2 prismas reflexivos acoplados em bastões extensíveis de 3,6 metros e nivelados com um tripé para bastão. Após a aquisição dos dados em campo da poligonal, foi executado um ajustamento com o software Topograph 98SE, da desenvolvedora Charpointer, com a finalidade de compensar os erros chamados na topografia de Erros de Fechamento. A compensação é realizada em 3 partes, sendo elas: Compensação Angular, Linear e Altimétrica.

Tendo o ajuste finalizado, partiu-se para o estágio de implantação das placas de aço em cada camada do pavimento (Figura 4.33). Para cada placa metálica implantada, a topografia registrou a sua posição com o auxílio da Estação Total, onde foi efetuada uma medição em sobre a placa com o auxílio do prisma refletor, determinando assim, sua posição em 3 eixos, X, Y e Z. Este procedimento é denominado de Irradiação. Após a aquisição de dados de implantação de todas as placas, foi aguardado o término da construção do pavimento.

Após a conclusão da obra de construção da camada de revestimento asfáltico, iniciaram-se os trabalhos de recuperação dos dados de implantação dessas placas sobre essa camada, com o objetivo de adquirir o dado de posição altimétrica (cota) superior e, com a diferença para a cota originalmente obtida, determinar a espessura das camadas. Para isso foi utilizada uma estação total da marca Geodetic e modelo GT2, de precisão linear de $(\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D)$ e precisão angular de $2''$ e com o auxílio dos prismas reflexivos.

Para recuperar a posição das placas sobre o revestimento foi utilizado um método chamado Estação Livre, que consiste em estacionar o aparelho em qualquer lugar da obra onde possa ser feito, no mínimo, duas visadas em pontos de referencia, neste caso a poligonal de apoio, para que um programa interno execute uma triangulação e calcule a posição nos eixos (X, Y e Z) do aparelho. Sendo assim a estação total informa onde se encontram as coordenadas das placas, que foram determinadas na aquisição de dados originalmente.

Contudo, as coordenadas na implantação das placas foram adquiridas sobre estas antes da construção da camada de revestimento e, nesta etapa do trabalho foi realizado o registro de sua posição na sua cota original. Durante o procedimento de recuperação da posição das placas sobre a camada de revestimento, o que se obtém é novas coordenadas, no qual coincidem nos eixos X,Y (plano) e variam no eixo Z (altimétrico). Esta variação é a finalidade

de todo o serviço da topografia para este estudo, pois ele indica a diferença de nível entre a superfície do revestimento e a interface das camadas onde foram implantadas as placas de aço.

Com a conclusão dos trabalhos de topografia, iniciaram-se os trabalhos da Geodésia. Para que este estudo possa ser recuperado ao longo dos anos para fins de controle do estado de conservação da estrutura do pavimento, é necessário que os pontos de referência da poligonal de apoio não se percam, e em serviços de topografia é comum o extravio de tais pontos, pois estão sujeitos a ações antrópicas e naturais. Sendo assim um meio de dar continuidade na sua posição é determinar sua coordenada georreferenciada ao globo terrestre pelo trabalho da geodésia.

As coordenadas utilizadas durante o projeto foram calculadas em um sistema plano (Plano Topográfico), ou seja, não levando em conta a curvatura terrestre. Para finalizar o estudo foi necessário que as coordenadas, tanto dos pontos de referência como das placas de aço implantadas, fossem transformadas em coordenadas geográficas, onde se considerou a curvatura da Terra. Para isso, foi utilizado um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) da marca Topcon e modelo Hiper Lite+.

Foi usado o método denominado de Posicionamento Relativo, que consiste em rastrear o ponto desejado por um determinado tempo e, posteriormente, com auxílio de software, calcular a posição desse ponto em relação à outra observação GNSS, feita em outro local, simultaneamente a essa. Para isso, foi utilizada a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) de Cuiabá, homologada pelo IBGE. Dois dos três vértices de apoio foram rastreados e, com o auxílio do software TopconTools da desenvolvedora Topcon, foi ajustada a posição desses dois pontos com referência ao globo terrestre e, como esse ajuste foi feito em relação a uma estação do IBGE, encontra-se, também, no Sistema Geodésico Brasileiro – SGB.

A etapa final dos trabalhos de topografia consistiu em recalcular as coordenadas das placas implantadas, agora georreferenciadas, com auxílio do software Topograph. Portanto, se houver perda das referências físicas no local, haverá a possibilidade de recuperar os pontos, com o uso das coordenadas geográficas.



Figura 4.33 – Instrumentos e equipamentos usados pela topografia para registra a localização das placas instaladas nas interfaces das camadas da estrutura da pista – (a) GPS (b) Estação Total e (c) Prisma.

4.2.7 Aquisição de Dados com o GPR

Após a demarcação das posições das placas pela equipe de topografia, iniciaram-se os trabalhos de aquisição de dados com o GPR.

A aquisição de dados ocorreu após a finalização da construção da camada de revestimento. No campo usou-se o equipamento SIR3000 acoplado a uma antena de 900 MHz. Os parâmetros utilizados são os mesmos definidos na Pista Experimental de Campo Verde.

A orientação dos perfis de GPR seguiu a demarcação, das placas de aço, realizada pela equipe de topografia (Figura 4.34).

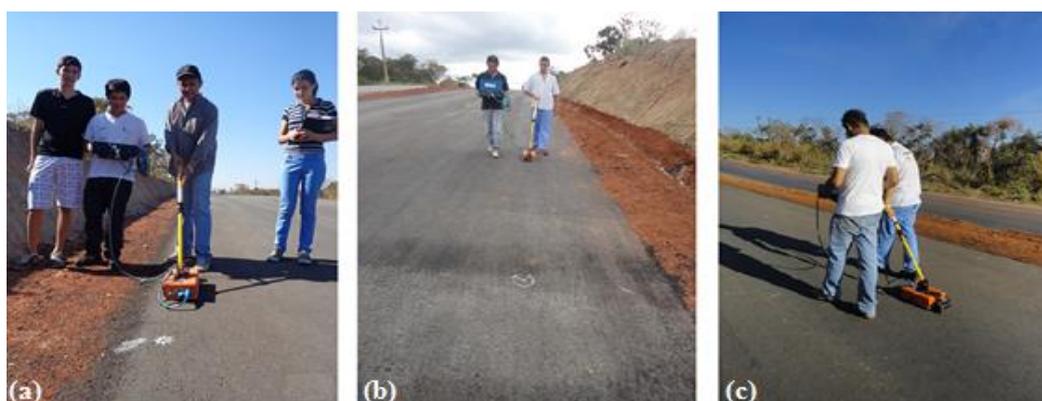


Figura 4.34 – Fotos evidenciam a aquisição de dados de GPR, com o equipamento SIR3000 e uma antena blindada de 900MHz, ao longo da pista da Avenida Antártica.

Foi necessário realizar campanhas de aquisição de dados com perfis paralelos (Figura 4.35), de 1,2 m de comprimento e distantes 0,10 m entre si, em locais do pavimento que apresentaram dificuldade na visualização dos refletores hiperbólicos associadas aos metais enterrados nesses locais e que haviam sido demarcados pelos trabalhos topográficos. Esse

trabalho de aquisição de dados com perfis paralelos foi realizado com o equipamento SIR 3000 de fabricação da GSSI, acoplado a uma antena de frequência central de 900 MHz.



Figura 4.35 – Aquisição de dados com equipamento SIR3000/GSSI, com antena blindada de 900MHz – (a) perfis curtos e paralelos no sentido longitudinal à pista (b) perfis curtos em malha nos sentidos longitudinal e transversal da pista.

Além dos perfis longitudinais e dos perfis paralelos realizados em pontos estratégicos, aquisições de dados foram feitas na direção transversal ao pavimento. Em algumas estacas a aquisição de dados com o GPR consistiu da construção de uma faixa com perfis paralelos de aproximadamente 1,2 m de comprimento e distantes entre si de 0,1 m em toda a extensão transversal da pista, totalizando 80 perfis (Figura 4.36).



Figura 4.36 - Aquisição de dados com equipamento SIR3000/GSSI, com antena blindada de 900 MHz (a) Equipamento: módulo de controle e antena (b) Antena posicionada para adquirir dados no sentido longitudinal da pista (c) Antena posicionada para adquirir dados no sentido transversal da pista (d) Aquisição de dados no sentido longitudinal da pista (e) Aquisição de dados no sentido transversal da pista.

O equipamento utilizado também foi o SIR3000 (fabricado pela Geophysical Survey Systems – GSSI), acoplado a uma antena blindada de 900 MHz, uma unidade de controle e uma unidade de armazenamento, interligados por cabos. Os parâmetros de campo utilizados no sistema GPR foram os mesmos da PECV, ou seja: espaçamento entre os traços de 0,01 m, frequência de amostragem de 12797 MHz, 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,04 ns e janela temporal de 20 ns.

Os dados foram processados no software ReflexW, versão 7.2 (SANDMEIER, 2010). A rotina de processamento consistiu no ajuste do tempo zero, filtro temporal (dewow), ganho (*manual gain* , y), migração e conversão de tempo em profundidade (velocidade constante).

Para calcular os valores das espessuras de revestimento (H_r), de base (H_b), de sub-base (H_{sb}) e de reforço de subleito (H_{rsl}) do pavimento da Avenida Antártica foi utilizado o modo *picking* para localizar, nos perfis de GPR, o posicionamento das placas de aço colocadas entre as camadas de revestimento e base, de base e sub-base e de sub-base e reforço de subleito . Nesta etapa do processamento foi utilizado o modo manual de, que permitiu marcar manualmente o *pick* com uma melhor precisão do posicionamento das placas. Os *picks* foram executados sobre os refletores associados às placas de aço, representadas pelo vértice das hipérbolas no radargrama, considerando-se o máximo valor de amplitude do espectro eletromagnético o seu posicionamento.

Neste pavimento, também com o propósito de verificar a variação espacial da espessura das camadas dos pavimentos, bem como localizar as barras e as placas de aço implantadas nas interfaces das camadas, usou-se o módulo quase-3D do ReflexW para a geração de uma imagem tridimensional de GPR. Com os dados dos perfis adquiridos na direção das estacas 108 e 123 (Figura 4.36), desenvolveu-se um processamento Quase-3D na direção transversal do pavimento da PAA no local da Estaca 108. Nesse local foram adquiridos 80 perfis curtos de 1,2 m de comprimento, na direção paralela ao pavimento, no sentido Sucuri-Cuiabá. Na elaboração do volume utilizaram-se coordenadas arbitrárias, uma vez que o principal objetivo foi de verificar a espessura das camadas dos pavimentos.

Um croqui com todos os perfis executados na PAA (Figura 4.37) foi elaborado para mostrar a localização das aquisições de dados com o GPR.

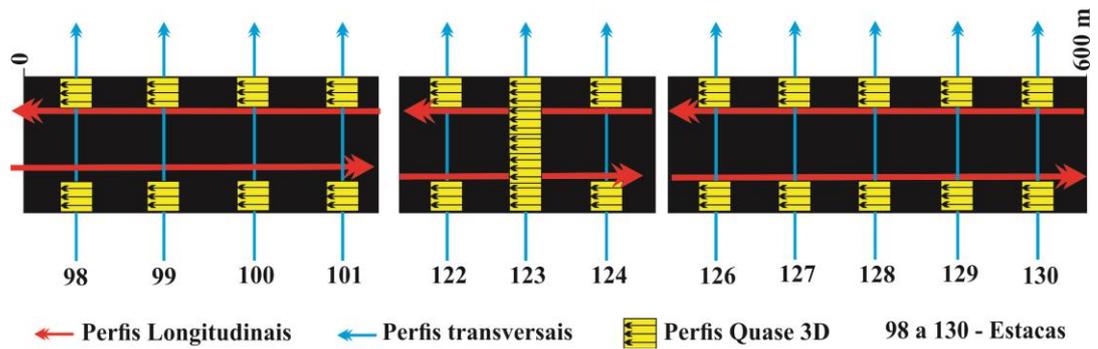


Figura 4.37 - Croqui com a localização dos perfis de GPR adquiridos ao longo do pavimento da PAA.

Os dados foram processados no software ReflexW, versão 7.2 (SANDMEIER, 2010). A rotina de processamento consistiu no ajuste do tempo zero, filtragem temporal do ruído de baixa frequência (*Band Pass Frequency*), ganho (manual gain (y)), migração e conversão de tempo em profundidade (velocidade constante, Figura 4.38).

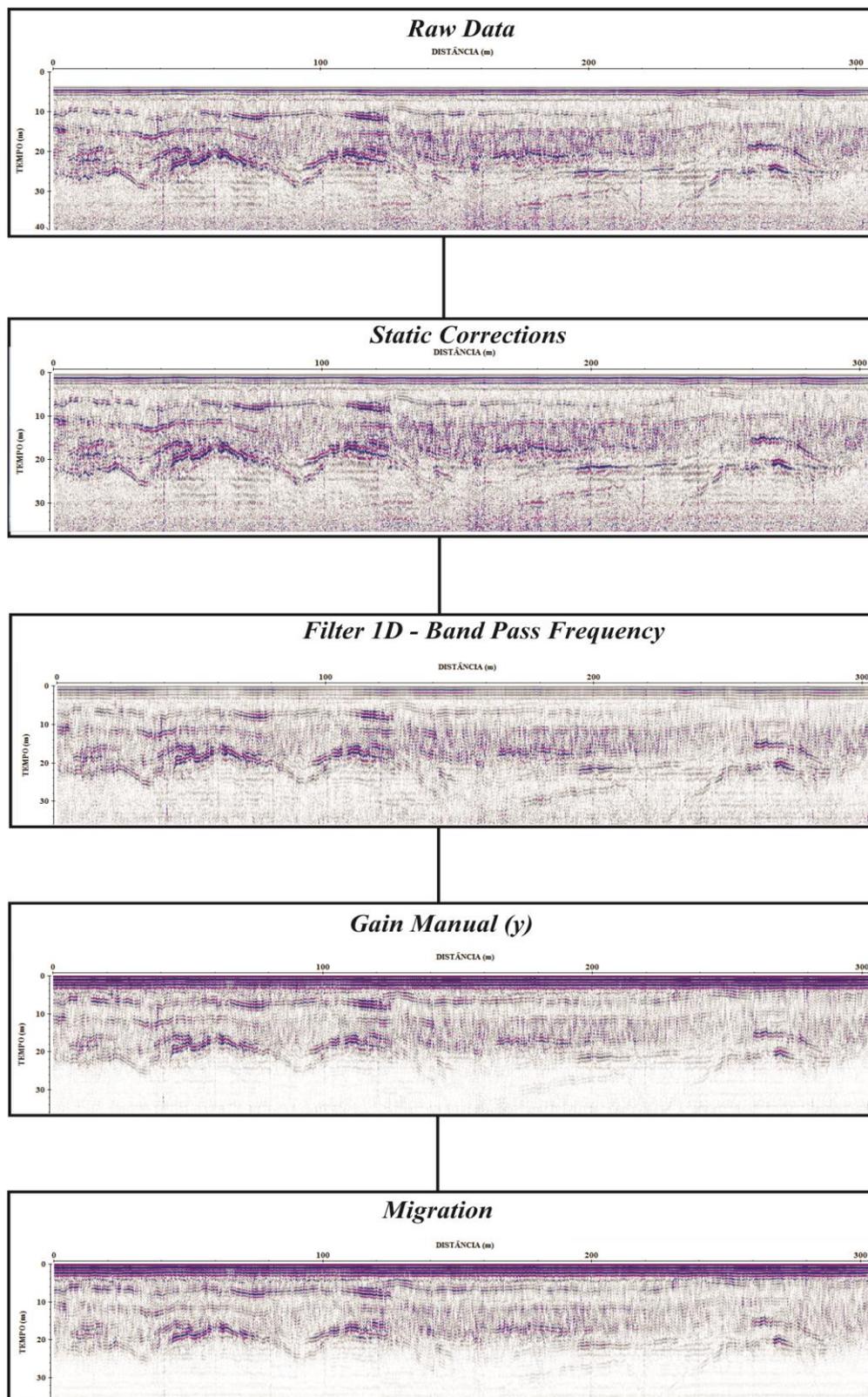


Figura 4.38 - Fluxograma de processamento dos perfis de GPR, Avenida Antártica.

Para calcular os valores das espessuras de revestimento (H_r), de base (H_b), de sub-base (H_{sb}) e de regularização de subleito (H_{rs1}) do pavimento da PAA foi utilizado o modo *picking* para delimitar, nos perfis de GPR, o posicionamento das placas de aço colocadas entre as

camadas de revestimento e base, de base e sub-base e de sub-base e reforço de subleito. Nesta etapa do processamento foi utilizado o modo manual, que permite marcar manualmente o *pick* com uma melhor precisão do posicionamento das placas. Os *picks* foram executados sobre os refletores associados às placas de aço, representadas pelo vértice das hipérbolas no radargrama, considerando-se o máximo valor de amplitude do espectro eletromagnético o seu posicionamento.

Neste pavimento, também com o propósito de verificar a variação espacial da espessura das camadas dos pavimentos, bem como localizar as placas de aço implantadas nas interfaces das camadas, usou-se o módulo quase-3D do ReflexW para a geração de uma imagem tridimensional de GPR. Na elaboração do volume utilizaram-se coordenadas arbitrárias, uma vez que o principal objetivo foi de verificar a espessura das camadas dos pavimentos.

Após a determinação das interfaces entre as camadas dos pavimentos, elaboraram-se mapas da espessura da camada de revestimento e da camada de base. A geração dos mapas ocorreu no software Surfer 11, usando-se o método de interpolação da krigagem linear entre os pontos.

4.2.8 Retroanálise do Pavimento

O programa KENPAVE (HUANG, 2004), Edição 2003, também foi utilizado para realizar a retroanálise do pavimento da Avenida Antártica.

Os dados de entrada para a realização da retroanálise com o programa foram os seguintes:

- Tipo de material para as camadas do pavimento: material linear;
- Número de períodos por anos em que há alteração dos valores dos módulos de elasticidade: apenas 1;
- Número de grupos de cargas: apenas 1 tipo;
- Número de camadas do pavimento: 5 camadas (revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito);
- Tensões que se deseja conhecer os valores em função da carga vertical aplicada: deformação de tração na base do revestimento e de compressão no topo do subleito;

Em seguida foi informado ao programa que se deseja conhecer os deslocamentos apenas da superfície do revestimento, para comparar com os resultados dos ensaios com viga Benkelman; portanto, para o valor da coordenada vertical (z), informou-se a coordenada

zero. Na tela seguinte, os dados fornecidos para o programa foram os mesmos adotados para o pavimento da PECV, ou seja: tipo de carga, eixo simples com roda dupla; área de contato do pneu com o revestimento, circular com raio de 10 cm; carga vertical aplicada sobre essa área, de 560 kPa; espaçamento entre o centro das áreas de contato dos dois pneus sobre o pavimento, $YW=30$ cm e espaçamento entre o centro dos eixos, ou seja, $XW=0$ cm, visto que a carga é de eixo simples.

O programa solicita as coordenadas dos pontos em que os deslocamentos verticais são esperados e os valores informados foram os pontos de aquisição de dados com a viga Benkelman, ou seja: $X(D0) = 0$ cm; $X(D1) = 12,5$ cm; $X(D2) = 25$ cm; $X(D3) = 50$ cm; $X(D4) = 75$ cm; $X(D5) = 100$ cm; $X(D6) = 125$ cm e $X(D7) = 150$ cm, oito pontos cujas coordenadas $Y(D0$ a $D7)$ têm valor igual a 15 cm, porque se refere a uma linha paralela ao eixo das abscissas do sistema cartesiano passando entre os pneus.

Nessa etapa, quando se objetiva ajustar as curvas de deslocamentos verticais obtidos pelos ensaios com viga Benkelman com os valores calculados pelo programa, inserem-se valores dos módulos de resiliência das camadas até que esse ajuste seja obtido.

4.2.9 Análise de Danos do Pavimento

O conjunto de módulos obtidos pelo ajuste das bacias, calculada e medida, durante o procedimento da retroanálise foram os valores usados para a análise de danos e o estudo probabilístico do pavimento, assim como os valores médios e seus respectivos valores de desvio padrão e variância das espessuras das camadas obtidas com o Método GPR.

Nessa etapa o objetivo foi o de obter os valores das deformações de tração na superfície inferior da camada de revestimento e de compressão aplicada no topo da camada de subleito do pavimento, em que o mesmo programa KENLAYER foi usado.

Os dados inseridos no programa, além dos já citados, foram os seguintes:

- Opção pela análise de danos;
- Camadas em que se deseja obter os valores das deformações desenvolvidas pela carga aplicada no revestimento, ou seja, camada 1, de revestimento, para a deformação de tração, e camada 5, de subleito, para a deformação de compressão;
- Sistema de unidades: Sistema Internacional, em que os módulos e a carga vertical são fornecidos em kPa; as dimensões de espessura, raio, distâncias, em cm;

- Os valores dos coeficientes de fadiga para determinação do número de passadas permitidas para o revestimento, $f_1=0,0796$, $f_2=3,291$ e $f_3=0,854$, valores recomendados pelo *Asphalt Institute*;
- Os valores dos coeficientes de deformação permanente para determinação dos valores do número de passadas permitidas para o subleito, $f_4=1,365 \cdot 10^{-9}$, $f_5=4,477$, valores também recomendados pelo *Asphalt Institute*;
- O número total de repetições de carga para o grupo de carga adotado no decurso do período, igual a 1, posteriormente substituído pelo valor de dimensionamento do pavimento para a análise de dano.

4.2.10 Análise Probabilística do Pavimento

Os valores das deformações de tração na base do revestimento e de compressão o topo do subleito obtidas a partir da análise de danos são os valores médios, visto que foram obtidos a partir do processamento com o programa KENLAYER tendo como dados inseridos os valores médios das espessuras das camadas da estrutura do pavimento durante retroanálise, assim como os valores médios dos módulos de resiliência resultantes do ajuste das bacias de deslocamentos verticais medida, com os ensaios com viga Benkelman, e calculado pelo programa.

Para realizar a análise probabilística do pavimento da PAA, o programa KENLAYER novamente calculou os valores de deformação no revestimento e no subleito. Desta vez, entretanto, cada valor de espessura e de módulo de resiliência das camadas sofreu um incremento de $\pm 10\%$, tendo sido mantidos os demais valores, para calcular, com as Equações 3.51, 3.52 e 3.53, do Método FOSM, as variâncias desejadas para os incrementos em avanço, centrados e em atraso, respectivamente.

Da mesma forma que foi feita para o pavimento da PECV, para a análise probabilística do pavimento da PAA, o Método FOSM foi aplicado às deformações de tração na base do revestimento asfáltico e de compressão no topo do subleito. O método foi aplicado, também, para o cálculo da variância do número de passadas permitidas e para a vida de fadiga das camadas de revestimento e de subleito tendo como variáveis aleatórias as espessuras das camadas da estrutura do pavimento e os seus respectivos módulos de resiliência.

4.3 RODOVIA BR 101-NE, LOTES 7 E 8, RECIFE – PE

A BR-101 é uma rodovia federal que se inicia na cidade de Touros (Rio Grande do Norte) e termina na cidade de São José do Norte (Rio Grande do Sul) cruzando, portanto, no sentido norte-sul praticamente todo o litoral leste brasileiro, do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul. Atravessa doze estados brasileiros (Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) e, em toda sua extensão é denominada oficialmente Rodovia Governador Mário Covas. A BR-101 é uma das mais importantes rodovias brasileiras.

Este trabalho foi realizado em Pernambuco, no trecho nordeste da BR 101, próximo da capital, Recife, no lote 7 (Figura 4.39).

A BR 101 é uma rodovia de pavimento rígido não estruturado, com placas de concreto de aproximadamente 6,0 metros de comprimento por 3,6 metros de largura, interligadas por barras de transferência (direção transversal) e por barras de ligação (direção longitudinal). Cada pista da rodovia possui, aproximadamente, 7,2 metros de largura de faixa de rolamento (2 placas de concreto de 3,6 metros cada). A espessura das placas é de aproximadamente 22 cm e as barras estão instaladas a 11 cm de profundidade à partir da superfície da camada de revestimento, em média.

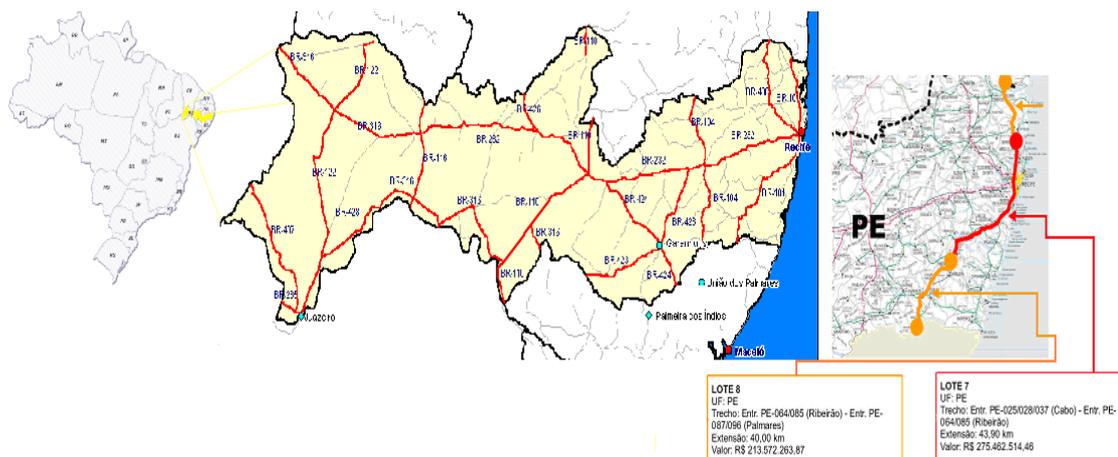


Figura 4.39 – Lotes 7 e 8 da Rodovia BR-101/ NE, em Pernambuco.

O trabalho de aquisição de dados originalmente realizado pela equipe da UnB consistiu de quatro perfis de, aproximadamente, 46,0 km cada (Figura 4.44), com o objetivo de verificar a instalação e a localização das barras de ligação nas placas de concreto. Neste

trabalho foram realizadas as análises de dados GPR num trecho de 600 m de pista do Lote 7 da rodovia BR-101 (trecho nordeste). As análises foram realizadas com o propósito de verificar a variabilidade da espessura do revestimento de concreto e a existência e o posicionamento das barras de ligação do pavimento na faixa central e na faixa de segurança dessa rodovia.

Conforme consta no projeto executivo da obra de pavimentação da rodovia, as barras de ligação (barras de aço CA-50) devem estar instaladas na faixa central, com comprimento de 0,92 m e com o espaçamento entre si de 0,5m (Figura 4.40).

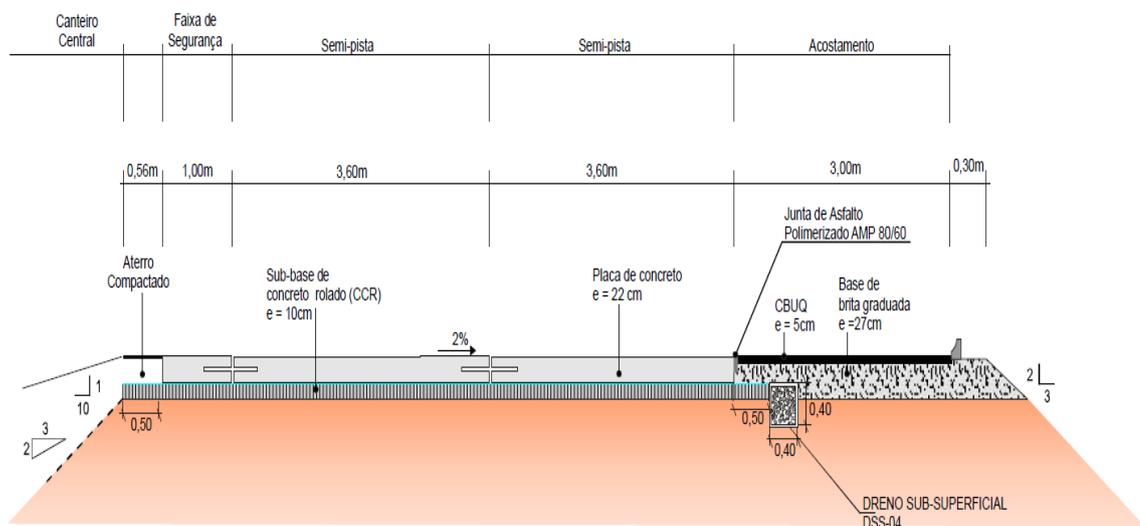


Figura 4.40 – Croqui mostrando o posicionamento das barras de ligação (barras de aço) dentro do pavimento rígido da BR-101, conforme consta no Projeto Construtivo.

Os dados de GPR foram adquiridos de maneira que os perfis distaram de 0,45m da junta de dilatação que divide a faixa de rolamento (Figura 4.41), com o objetivo de verificar se as barras de ligação estavam instaladas de acordo com o projeto, ou seja, com 0,46 m (metade do comprimento), alojado em cada placa, conferindo à estrutura do pavimento, estabilidade.

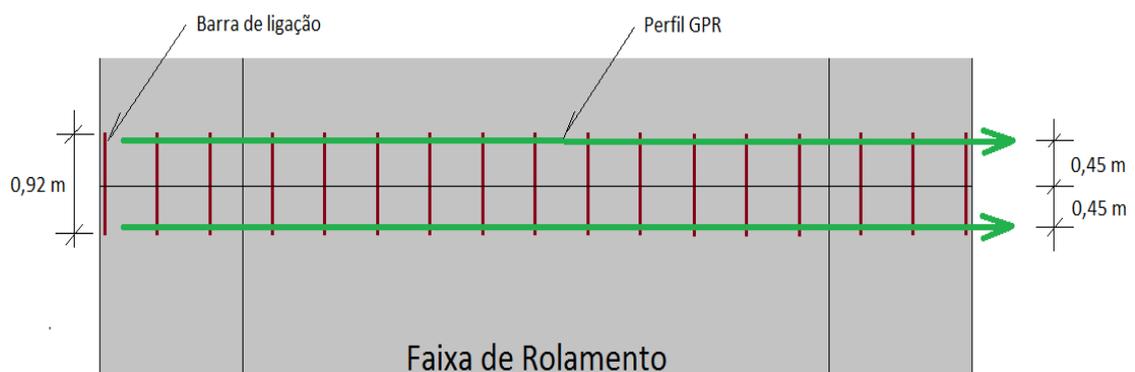


Figura 4.41 – Croqui do posicionamento dos perfis de GPR realizados nas faixas de rolamento da BR-101/NE.

Todo o levantamento de dados de GPR foi efetuado no sentido Recife/PE para Maceió/AL. O início e o fim de cada perfil de GPR sempre coincidiram com os limites das placas, e tiveram como pontos geográficos de amarração, as marcações feitas pela equipe de cartografia. Na aquisição dos dados foi utilizado o equipamento SIR-3000, fabricado pela empresa Geophysical Survey System Inc. – GSSI, acoplado a uma antena blindada de 900 MHz (Figura 4.42).



Figura 4.42 – Aquisição de dados na pista de rolamento da BR-101/NE com o equipamento SIR 3000, conectado a antena blindada de 900 MHz.

Todos os perfis foram adquiridos no modo common offset (afastamento comum), e os parâmetros de aquisição de dados foram: espaçamento entre traços (Δx) de 0,01 m; 512 amostras; intervalo de amostragem temporal (Δt) de 0,058593 ns; janela temporal de 30 ns; frequência de amostragem de 17066 MHz.

As seções de GPR foram adquiridas em intervalos de 500 a 600 m, com o propósito de obter arquivos menores que 100 Mb, evitando assim quaisquer dificuldades no sistema de armazenamento de dados do equipamento, bem como de aumento no tempo de processamento de cada seção. Ao longo de 40 dias de campo, a equipe conseguiu adquirir 87,8 km de seção 2D de GPR, segmentadas em 110 perfis em um trecho de 43,9 km da BR-101.

Foram realizados quatro perfis de GPR ao longo de, aproximadamente, 600 metros da rodovia BR 101 NE, sentido Recife-Maceió (lado direito da rodovia). Três placas de concreto foram destruídas após a realização da campanha GPR sobre elas, com o objetivo de permitir a

identificação exata das barras de ligação instaladas e permitir a aferição do processamento. Essas placas estão localizadas a 168 metros a partir do início do trecho de 600 m pesquisado, ou seja, a frente da estaca EBW 544 (Figuras 4.43).

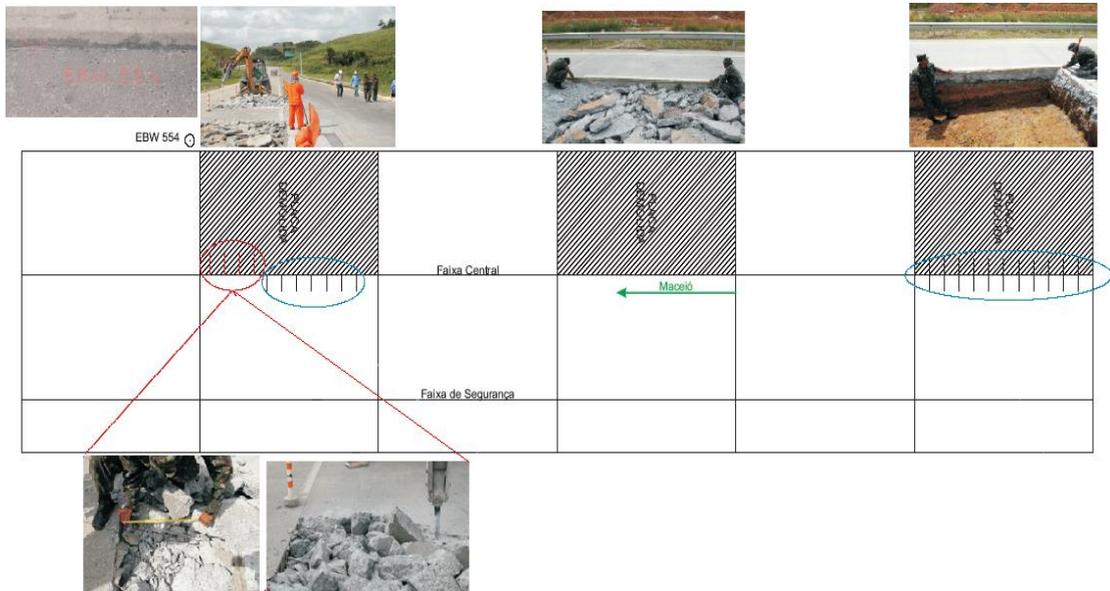


Figura 4.43 - Placas destruídas com o objetivo de adquirir os dados reais de espessura das placas e localização das barras de ligação para calibração do Método GPR.

Nessas placas foram localizadas as barras de ligação e levantadas as suas posições em profundidade e o afastamento entre elas, além da espessura do revestimento de concreto em cada um desses pontos (Figuras 4.44).



Figura 4.44 – O registro fotográfico é da trincheira aberta para fins de calibração da velocidade de propagação da onda eletromagnética no pavimento rígido da BR101.

Os dados foram processados no software REFLEXW 6.0 (SANDMEIER, 2011). As etapas de processamento aplicadas a todas as seções de GPR foram: correção estática ou ajuste do tempo zero; filtragem temporal do ruído de baixa frequência; aplicação de ganho de recuperação de amplitude perdida com o espalhamento geométrico do sinal eletromagnético

(ganho de decaimento de energia – *Energy Decay*); e conversão do tempo para profundidade (Figura 4.45).

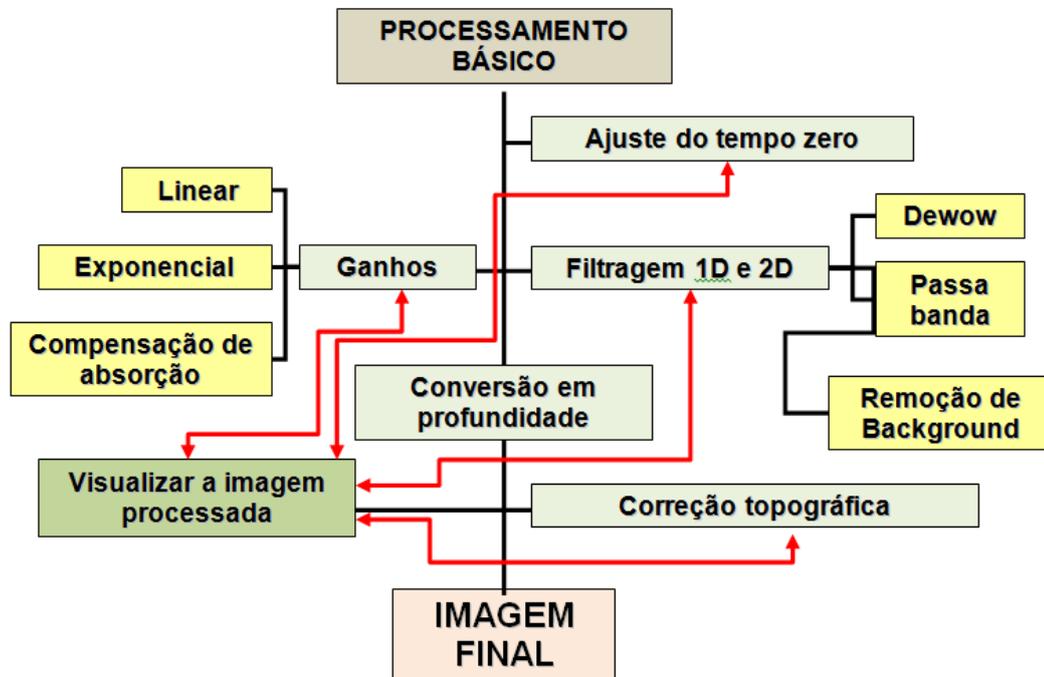


Figura 4.45 – Fluxograma com as etapas de processamento dos perfis de GPR.

Após a importação dos dados GPR, o primeiro processamento consistiu do ajuste do tempo real zero (*static correcting*). Esse ajuste foi feito para o ponto zero anterior à evolução do primeiro ciclo da onda refletida. Em seguida, foi realizada a filtragem 1D (*subtract-mean, Dewow*), que cria dentro do intervalo de tempo em movimento um valor médio e subtrai esse valor do valor real dos dados; e 2D (*subtracting average*), necessário para a eliminação de ruídos absorvidos durante a aquisição de dados. Após, foi acrescentado ao sinal um ganho AGC e *Energy Decay*, necessário para a melhor visualização dos perfis. Não houve necessidade da realização de correção topográfica, por se tratar de um trecho curto e de topografia regular e plana.

Após o processamento básico foi possível estabelecer a velocidade que melhor ajustou o processamento GPR com os dados reais levantados em campo, em que se utilizaram as informações obtidas pelas medições em campo das placas destruídas, para determinação das profundidades das placas de concreto e as profundidades reais das barras de ligação medidas no local, após a destruição das placas.

Após a geração da imagem final de cada seção de GPR, foram executadas as etapas de interpretação dos resultados com a verificação do posicionamento espacial das barras de aço

(barras de ligação) dentro do pavimento rígido e da espessura das camadas do pavimento. A etapa de interpretação dos resultados foi realizada no módulo de picagem do software REFLEX 6.0, onde foram demarcadas a distância e a profundidade das camadas, de cada barra, ao longo dos perfis GPR.

Os dois perfis processados neste trabalho estão localizados ao longo dos limites entre as duas placas da pista de rolamento, cujos dados foram coletados a 45 cm para a esquerda e 45 cm para a direita da linha limite entre essas placas, denominados FILE_009 e FILE_010 (Figura 4.46).

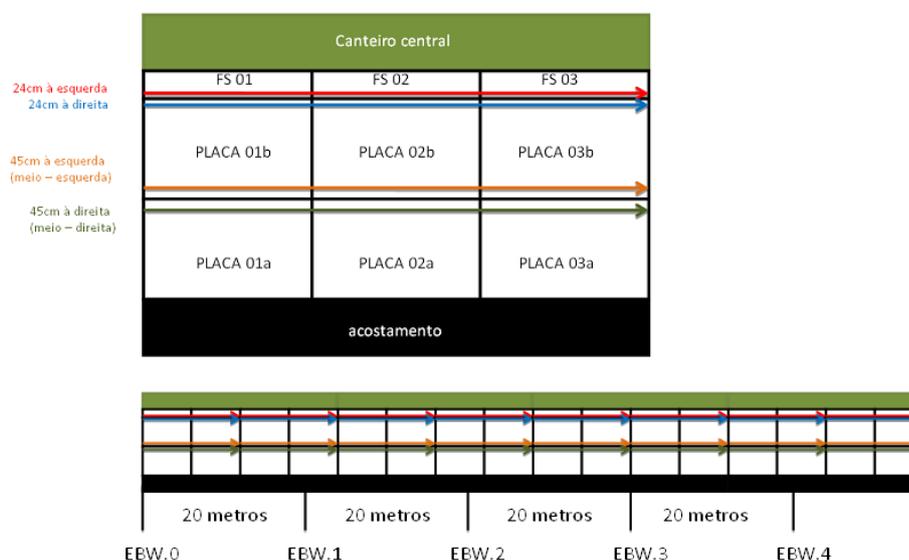


Figura 4.46 - Representação dos perfis GPR realizados na BR 101 NE – sentido Recife-Maceió: Perfil FILE_009 na interface das placas da Faixa de Segurança (FS) e das placas da faixa de rolamento (seta cor vermelha); Perfil FILE_010 na interface das placas de rolamento (seta cor cinza).

O perfil FILE_009 encontra-se 45 cm a esquerda do limite entre as duas placas da pista de rolamento, com levantamento realizado a partir do início da primeira placa de concreto localizada 5,96 metros à frente da estaca EBW 554 e até o fim da placa localizada 13 metros à frente da estaca EBW 574. O perfil FILE_010 encontra-se 45 cm a direita do limite entre as duas placas da pista de rolamento, com direção paralela ao perfil FILE_009.

4.4 AEROPORTO SANTOS DUMONT, RIO DE JANEIRO-RJ

O Aeroporto Santos Dumont, inaugurado em 1936, localiza-se na cidade do Rio de Janeiro-RJ. Possui um sítio aeroportuário com área total de 833.703 m², com duas pistas destinadas a pouso e decolagem, e um pátio de estacionamento e manobra de aeronaves.

O pátio de estacionamento e manobra de aeronaves é pavimentado com uma estrutura cuja camada de revestimento é constituída de concreto de cimento Portland simples, com uma espessura média de projeto, de 0,20m. Todavia, o projeto executivo do aeroporto não foi disponibilizado.

Com o propósito de verificar as espessuras das camadas do pavimento da área do pátio de estacionamento e manobra de aeronaves, bem como localizar possíveis interferências ao longo desse pátio, realizou-se uma campanha de aquisição de dados com GPR.

Durante os levantamentos utilizou-se um equipamento GPR modelo Detector Duo, fabricado pela *Ingegneria Dei Sistemi* – IDS. As campanhas de aquisição de dados foi realizada com o GPR composto por uma unidade de controle e uma unidade de armazenamento, acoplado a antenas blindadas com frequência central de 250 MHz e de 700 MHz, interligados por cabos.

Os parâmetros de aquisição de dados foram: espaçamento entre os traços de 0,02 m, janela temporal de 50 ns, e intervalo de amostragem temporal de 0,25 ns.

Os dados foram adquiridos ao longo de um perfil de 440 metros (Figura 4.47).

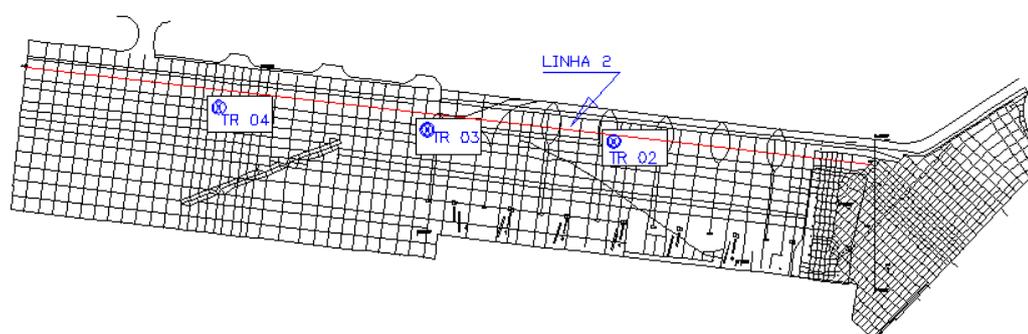


Figura 4.47 – Croqui com a localização do perfil 2 (linha vermelha) de GPR adquirido e de três poços de sondagem perfurados no pátio de manobras de aeronaves do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro/RJ.

Os dados foram processados no software REFLEXW 6.0 (SANDMEIER, 2011). As etapas de processamento aplicadas a todas as seções de GPR foram também foram: correção estática ou ajuste do tempo zero; filtragem temporal do ruído de baixa frequência; aplicação de ganho de recuperação de amplitude perdida com o espalhamento geométrico do sinal eletromagnético (ganho de decaimento de energia – Energy Decay); e conversão do tempo para profundidade, em que a velocidade eletromagnética no meio foi obtida com os dados obtidos pela medição das espessuras das camadas dos pavimentos em alguns pontos onde furos de sondagens foram executados na área. As perfurações foram executadas próximo dos perfis GPR, permitindo assim correlacionar refletores com interfaces geotécnicas e geológicas.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados serão apresentados, primeiramente, para os pavimentos flexíveis e, em seguida, para os pavimentos rígidos. Os trabalhos de campo realizados com o GPR produziram informações necessárias para a retroanálise, para a análise de danos e para a análise probabilística das áreas de estudo de Campo Verde (Pista Experimental de Campo Verde -PECV) e de Cuiabá (Pista da Avenida Antártica - PAA). Para os pavimentos rígidos da BR-101NE e do pátio de estacionamento de aeronaves do aeroporto Santos Dumont, os resultados das pesquisas com o GPR permitiram realizar uma análise da variabilidade das espessuras das camadas desses pavimentos.

5.1 PISTA EXPERIMENTAL DE CAMPO VERDE (PECV)

Essa pista experimental de pavimento flexível foi construída na área da Unidade de Campo Verde, em Campo Verde-MT, Campus São Vicente do IFMT, em 2012. Durante todo processo de construção da pista foram adquiridos dados com o GPR para fornecer informações necessárias ao programa computacional KENLAYER, para realizar a retroanálise e a análise de danos desse pavimento. Esses dados também serviram para realizar a análise probabilística com o uso do Método FOSM. Os resultados estão descritos a seguir.

5.1.1 Medidas de Espessuras das Camadas do Pavimento com o GPR

Os resultados dos ensaios com o GPR possibilitaram identificar quatro padrões distintos de reflexão (Figura 5.1), os quais podem ser relacionados a diferentes tipos de materiais constituintes da estrutura do pavimento.

O Padrão 1 caracteriza-se por ser constituído de refletores planos e contínuos e está relacionado à camada de revestimento da estrutura do pavimento.

O Padrão 2 está associado à camada de base do pavimento e é a área onde se encontram refletores descontínuos e inclinados. Esses refletores estão relacionados a interfaces geotécnicas e geológicas (matérias granulares com elevada quantidade de pedregulhos; camadas com diferentes graus de compactação e teores de umidades diferentes; e RCD).

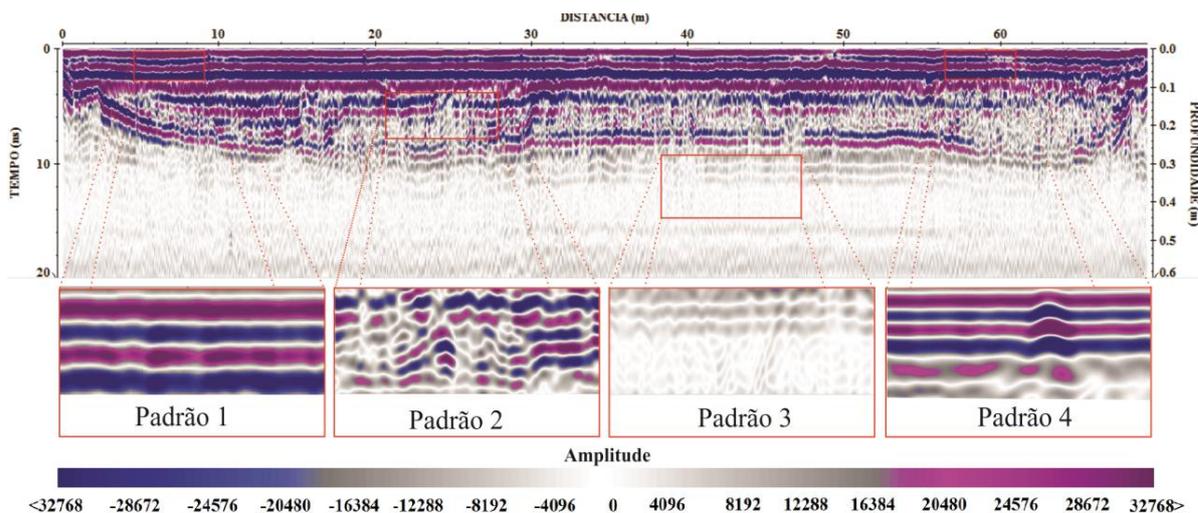


Figura 5.1 – Padrões de reflexão encontrados no pavimento da PECV.

O Padrão 3 apresenta uma textura mais homogênea e refletores de menor amplitude e está associado ao material do subleito, um solo silte-arenoso, com baixa presença de pedregulhos.

Pode-se classificar como Padrão 4 os refletores hiperbólicos que estão relacionados a ocorrências pontuais associadas a objetos enterrados em subsuperfície (vergalhões, tubulações) e localizados ao longo de toda a extensão da pista em diferentes profundidades.

Procurou-se identificar um quinto padrão de reflexão para indicar a presença de RCD misturado ao solo laterítico. Entretanto, isso não foi possível provavelmente porque o solo laterítico naturalmente é constituído de material granular semelhante aos materiais presentes no RCD.

Foram realizados furos de sondagem no pavimento para calibrar o método GPR pelos valores medidos em campo das espessuras de base H_b e revestimento H_r (Figura 5.2). Os valores medidos de espessura e os valores de tempo duplo de propagação da onda eletromagnética (Tabela 5.1) aplicados à Equação 5.1, permitiram calcular os valores de velocidade para cada camada do pavimento. Os resultados apontam para valores de velocidade média de 0,071 m/ns para a camada de base e de 0,055 m/ns para a camada do revestimento.

$$v = \frac{2h}{t} \quad (5.1)$$

Tabela 5.1 – Valores de velocidade obtidos com o ajuste de tempo x profundidade nos perfis de GPR para a PECV.

Furo	Estaca	File	H_r Medido (m)	Tempo (ns)	Velocidade H_r (m/ns)	H_b Medido (m)	Tempo (ns)	Velocidade H_b (m/ns)
1	25	75	0.0500	1.6253	0.0615	0.107	3.476	0.061568
2	35	87	0.0350	1.4094	0.0497	0.232	5.943	0.078081
3	40	71	0.0330	1.4069	0.0469	0.200	4.953	0.080766
5	50	72	0.0430	1.3822	0.0622	0.210	5.882	0.071400
Média=			0.0403	1.4559	0.0551	0.175	5.218	0.070962

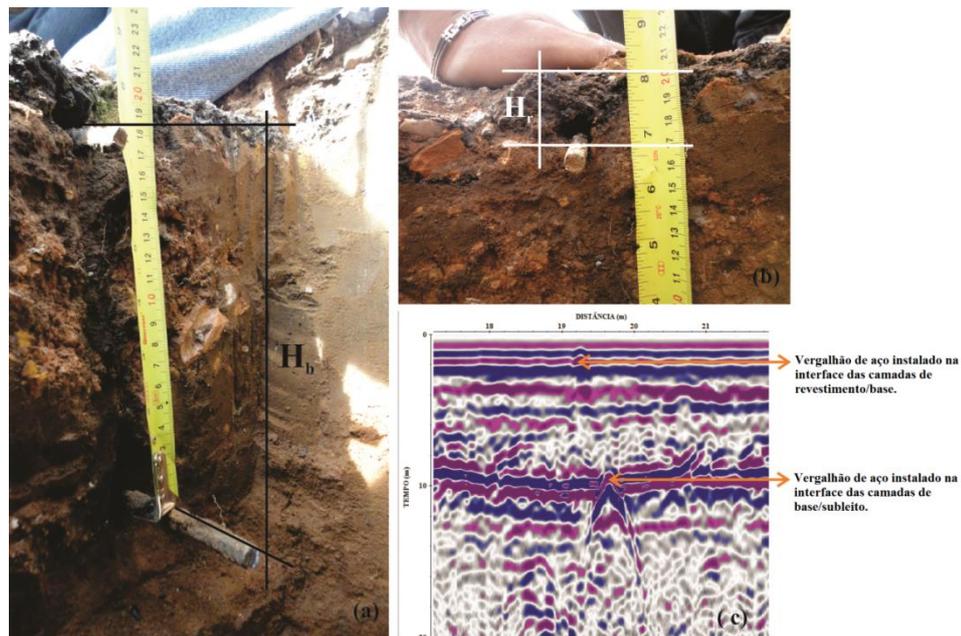


Figura 5.2 – Registros fotográficos (a) e (b) de uma trincheira aberta próximo da estaca de 50m e obtenção dos valores medidos de H_b e H_r , que se destinam à calibração do método; (c) do perfil do radargrama associado a esse trecho do pavimento e, em destaque, os refletores hiperbólicos referidos aos vergalhões de ferro enterrados.

Com os valores de velocidade média para as espessuras de base e revestimento do pavimento, utilizou-se o modo *continuous pick* do software ReflexW, que permitiu realizar vários *picks* sobre os refletores associados às interfaces das camadas em uma extensa faixa do perfil (Figura 5.3). Cada *pick* está associado a valores que informam a profundidade, o tempo de propagação da onda e a distância horizontal onde está localizado o traço picado. No perfil de GPR da figura 5.3, as linhas verticais contínuas na cor preta estabelecem os limites, entre 10m e 65m do pavimento, considerados para o cálculo das médias das espessuras de base do pavimento da PECV. A interface das camadas revestimento-base está pontilhada por uma linha amarela e calculada para a velocidade de 0,055m/ns. Já a interface das camadas base-subleito está pontilhada por uma linha vermelha e calculada para a velocidade de 0,071 m/ns.

O *continuous pick* foi aplicado em todos os perfis de GPR adquiridos, o que possibilitou realizar uma análise estatística por meio das tabelas de variação de espessura das camadas de base e de revestimento em todo o pavimento. Esse trabalho proporcionou uma análise da variabilidade dessas camadas. Foram excluídos os primeiros 10 metros e os últimos 5 metros de pavimento dessa análise (extremidades do pavimento). Isso se deveu à constatação pela observação dos perfis de radar que as espessuras da camada de base nos primeiros 10 metros de pavimento era muito irregular. Esse detalhe da construção dessa camada foi atribuído à uma viga de concreto existente no portão de entrada da área onde foi construído o pavimento e que prejudicou os trabalhos da moto-niveladora. No final do pavimento, pela proximidade do edifício do Instituto, a moto-niveladora também teve o seu trabalho prejudicado, tornando irregular a espessura da camada de base.

Analisaram-se todos os valores de espessura das camadas de revestimento e de base encontrados nos perfis de GPR (Tabelas 5.2 e 5.3).

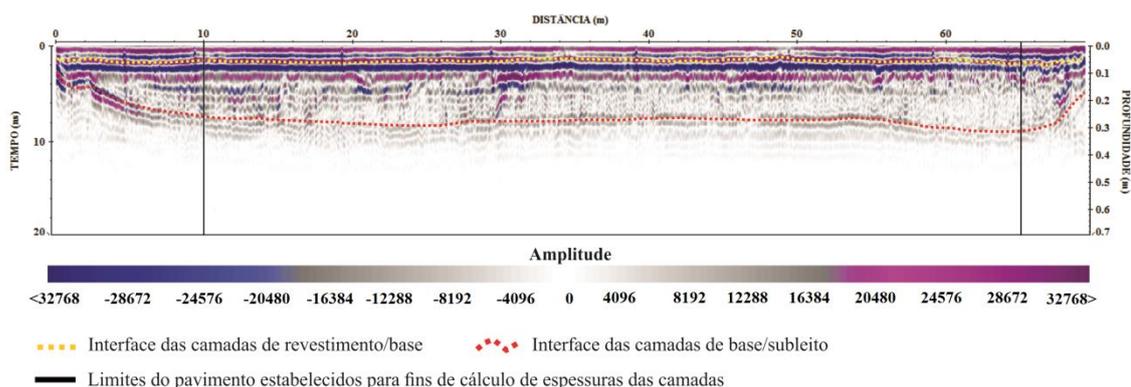


Figura 5.3 – Perfil de GPR com resultado do processamento de picagem nas interfaces das camadas de revestimento/base e de base/subleito do pavimento da PECV.

Estimou-se a espessura da camada de revestimento no pavimento da PECV para um valor médio de 4,24 cm. Para a espessura da camada de base estimou-se um valor médio de 25,10 m. Os valores médios foram calculados para as espessuras que resultaram da análise de todos os perfis de GPR adquiridos para as camadas de revestimento e de base do pavimento (Tabelas 5.2a e 5.2b), respectivamente.

Tabela 5.2a – Variabilidade dos valores de espessura para a camada de revestimento extraídos dos perfis de GPR do pavimento do pavimento da PECV.

Perfis	H _r (m)	Desvio Padrão (m)	Variância	Coefficiente de Variação (%)
L71	0.0431	0.0054	2.87E-05	12.53
L72	0.0400	0.0045	2.04E-05	11.29
L73	0.0429	0.0039	1.53E-05	9.13
L74	0.0420	0.0030	8.89E-06	7.10
L75	0.0423	0.0034	1.14E-05	7.98
L76	0.0436	0.0029	8.61E-06	6.72
L77	0.0431	0.0051	2.55E-05	11.72
L78	0.0431	0.0051	2.55E-05	11.72
L79	0.0433	0.0009	8.07E-07	2.08
L80	0.0433	0.0005	2.55E-07	1.17
L81	0.0458	0.0024	5.70E-06	5.22
L82	0.0462	0.0134	1.80E-04	29.04
L83	0.0462	0.0134	1.80E-04	29.04
L84	0.0418	0.0049	2.36E-05	11.61
L85	0.0409	0.0021	4.47E-06	5.17
L86	0.0410	0.0025	6.16E-06	6.06
L87	0.0409	0.0037	1.39E-05	9.10
L88	0.0408	0.0034	1.17E-05	8.38
L89	0.0399	0.0031	9.55E-06	7.74
L90	0.0400	0.0097	9.33E-05	24.14
L91	0.0410	0.0064	4.10E-05	15.60
MÉDIA	0.0424 m	0.0047 m	3.41E-05	11.07 %

Tabela 5.2b – Variabilidade dos valores de espessura para a camada de base extraídos dos perfis de GPR do pavimento do pavimento de Campo Verde.

Perfis	H _b (m)	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de Variação
L71	0.2261	0.03430	0.0012	12.74
L72	0.2430	0.03443	0.0012	12.17
L73	0.2370	0.03267	0.0011	11.67
L74	0.2476	0.03408	0.0012	11.77
L75	0.2586	0.03571	0.0013	11.87
L76	0.2673	0.09128	0.0083	29.35
L77	0.2713	0.01587	0.0003	5.05
L78	0.2670	0.08454	0.0071	27.26
L79	0.2614	0.07385	0.0055	24.24
L80	0.2622	0.11114	0.0124	36.37
L81	0.2588	0.02369	0.0006	7.78
L82	0.2590	0.00301	0.0000	0.99
L83	0.2549	0.10353	0.0107	34.38
L84	0.2632	0.09866	0.0097	32.34
L85	0.2623	0.12526	0.0157	41.31
L86	0.2643	0.12417	0.0154	40.67
L87	0.2606	0.13065	0.0171	43.33
L88	0.2530	0.03032	0.0009	10.32
L89	0.2403	0.00454	0.0000	1.62
L90	0.2399	0.02181	0.0005	7.79
L91	0.1733	0.03379	0.0011	15.76
MÉDIA	0.2510 m	0.05940 m	0.0053	19.94 %

Calcularam-se, também, os valores máximo e mínimo (Tabela 5.3) verificados em cada uma dessas camadas.

Tabela 5.3 – Informações sobre os valores de espessura para a camada de revestimento e base extraídos dos perfis de GPR do pavimento do pavimento da PECV.

Espessura	Camadas	
	Revestimento	Base
Valor Médio (m)	0,0424	0,2510
Desvio Padrão (m)	0,0047	0,0594
Variância (m ²)	0,0000341	0,0053000
Coefficiente de Variação (%)	11,07	19,94
Valor Máximo (m)	0,0706	0,4402
Valor Mínimo (m)	0,0302	0,1903

Os perfis de GPR permitiram elaborar um mapeamento das interfaces Revestimento/Base e Base/Subleito do pavimento de Campo Verde. Com isso pode-se visualizar essas interfaces. O resultado proporcionou um modelo das camadas do pavimento (Figura 5.4).

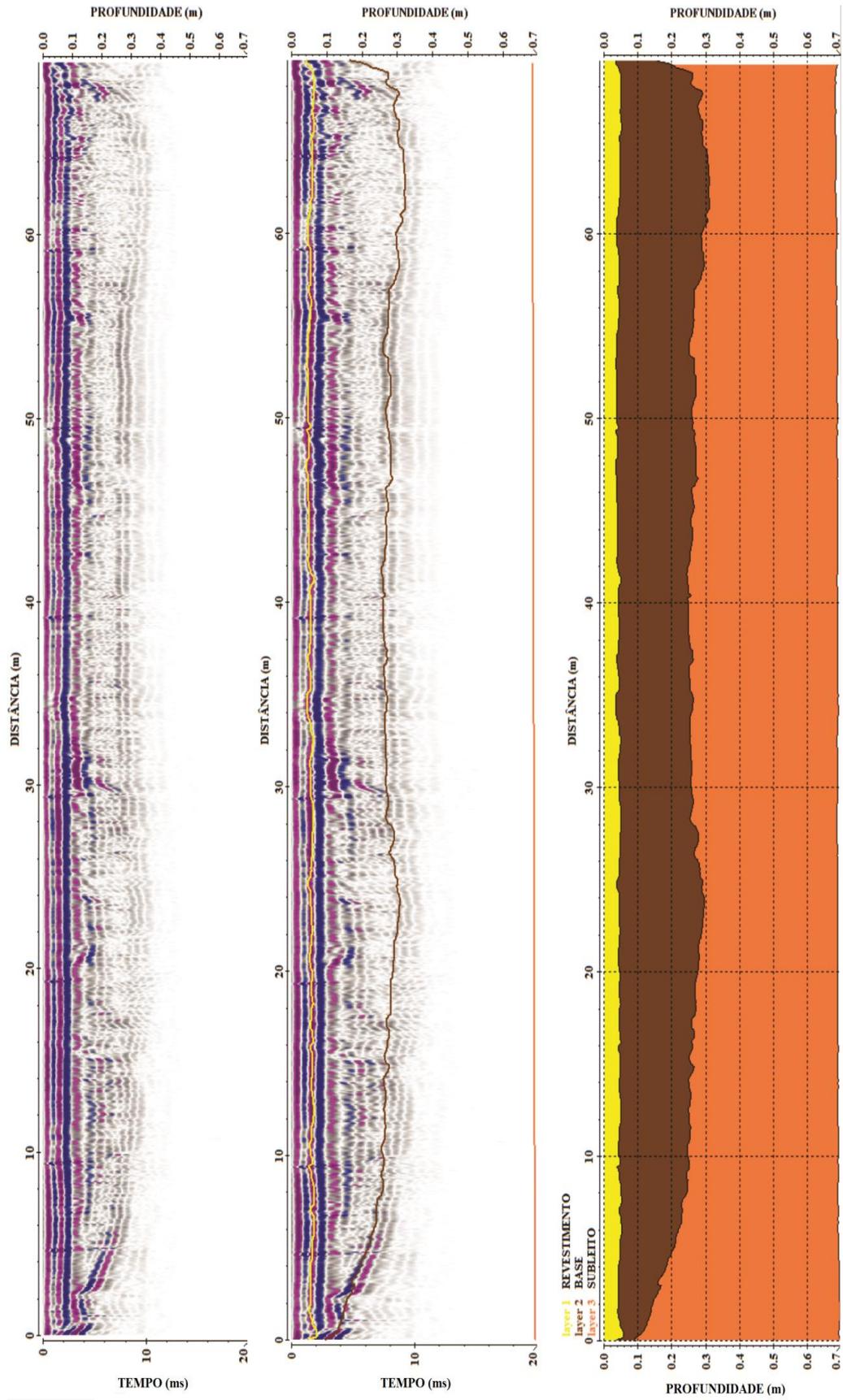


Figura 5.4 - Perfil de GPR do pavimento da PECV com modelo de camadas.

Os valores de espessura da camada de revestimento do pavimento de Campo Verde foram interpolados no software SURFER, para permitir a visualização da variabilidade desses valores em toda a extensão do pavimento (Figura 5.5).

Na interpolação observa-se que os valores de espessura dessa camada maiores que 4,5 cm estão presentes no início e no fim do pavimento. Já os valores de espessura menores que 3,6 cm têm a sua concentração nas bordas do pavimento, entre as estacas de 25 e 40 m, do lado direito da pista, e entre 40 e 50 m do lado esquerdo. As espessuras próximas da média de 4,24 cm são predominantes em toda a extensão do pavimento. Os valores mínimo e máximo, respectivamente, encontrados na investigação das espessuras da camada de revestimento com o uso do método GPR foram de 3,02 cm, ou seja, 28,77% menor e 7,06 cm, que corresponde a 66,50% maior, que o valor da média estimada (4,24 cm). Se essa comparação for feita em relação ao valor de espessura de projeto da camada de revestimento (5 cm), a menor espessura da camada será inferior à espessura de projeto em 39,6%; já o maior valor de espessura será superior à espessura de projeto em 41,2%.

Foram interpolados, também, os valores de espessura da camada de base do pavimento da PECV no software SURFER, que permitiu a visualização da variabilidade das espessuras dessa camada em toda a extensão do pavimento (Figura 5.6).

Na interpolação dos valores de H_b observou-se que as espessuras próximas da média de 25,1cm (maiores que 22 cm e menores que 36 cm) são predominantes em toda a extensão do pavimento. Em menor frequência, os valores de espessura menores que 22 cm encontram-se presentes nos extremos da pista, com maior incidência, próximo do portão de acesso ao Campus. As espessuras superiores a 30 cm encontram-se próximos à estaca 20 e entre as estacas 60 e 70 da extensão do pavimento.

Os valores mínimo e máximo, respectivamente, encontrados na investigação das espessuras da camada de base com o uso do método GPR foram de 19 cm, ou seja, 24,18% menor e 44 cm, que corresponde a 75,37% maior, que o valor da média estimada (25,1 cm). Se essa comparação for feita em relação ao valor de espessura de projeto da camada de base (20 cm), a menor espessura da camada será inferior à espessura de projeto em 4,85%; em compensação, o maior valor de espessura será superior à espessura de projeto em 120,1%, ou seja, o equivalente a mais que duas camadas de base.

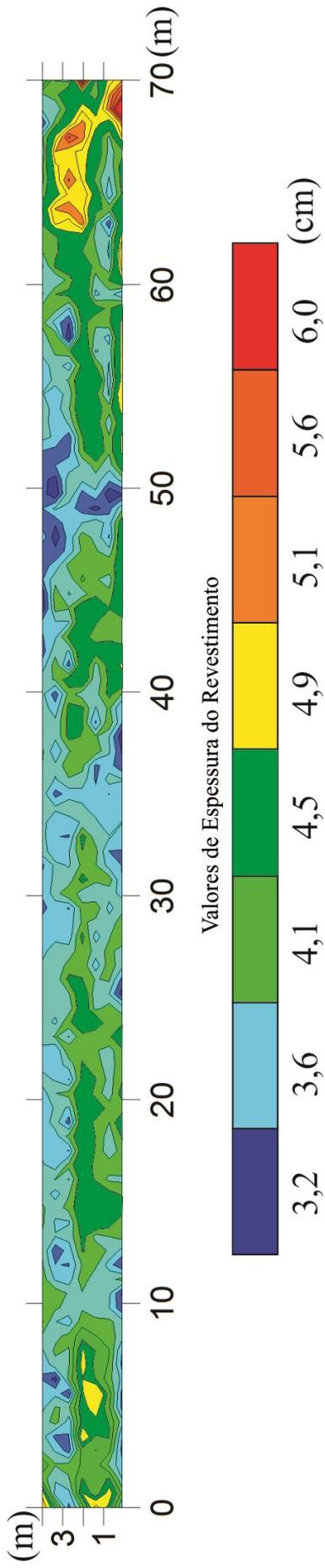


Figura 5.5 – Interpolação dos valores de espessura do revestimento (Hr), para o pavimento de Campo Verde.

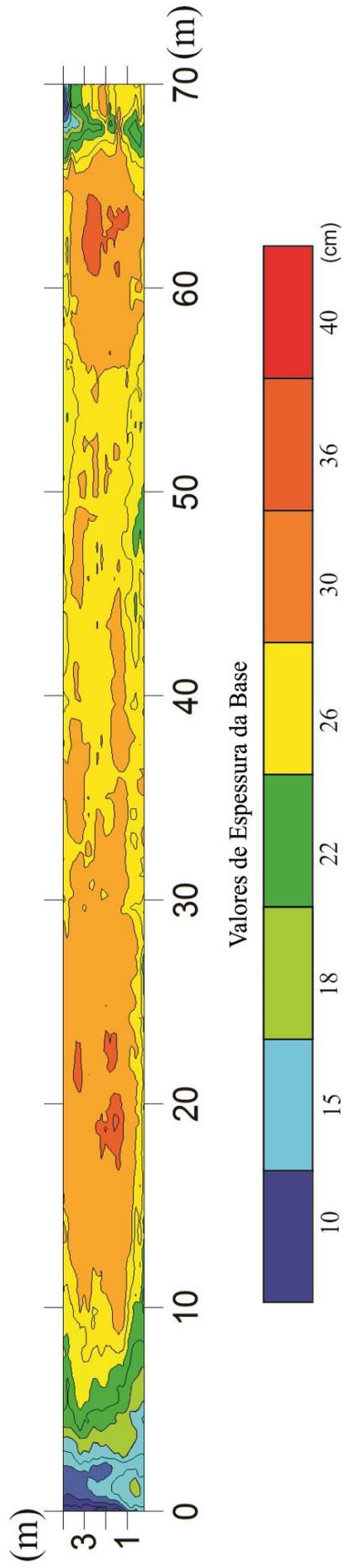


Figura 5.6 – Interpolação dos valores de espessura de base (Hb), para o pavimento de Campo Verde.

Um modelo quase-3D foi elaborado a partir dos perfis de GPR (Figura 5.7). Nesse modelo foi possível visualizar as barras de aço localizadas à mesma profundidade (*slice* feito à profundidade de 4,2 cm), na interface revestimento/base.

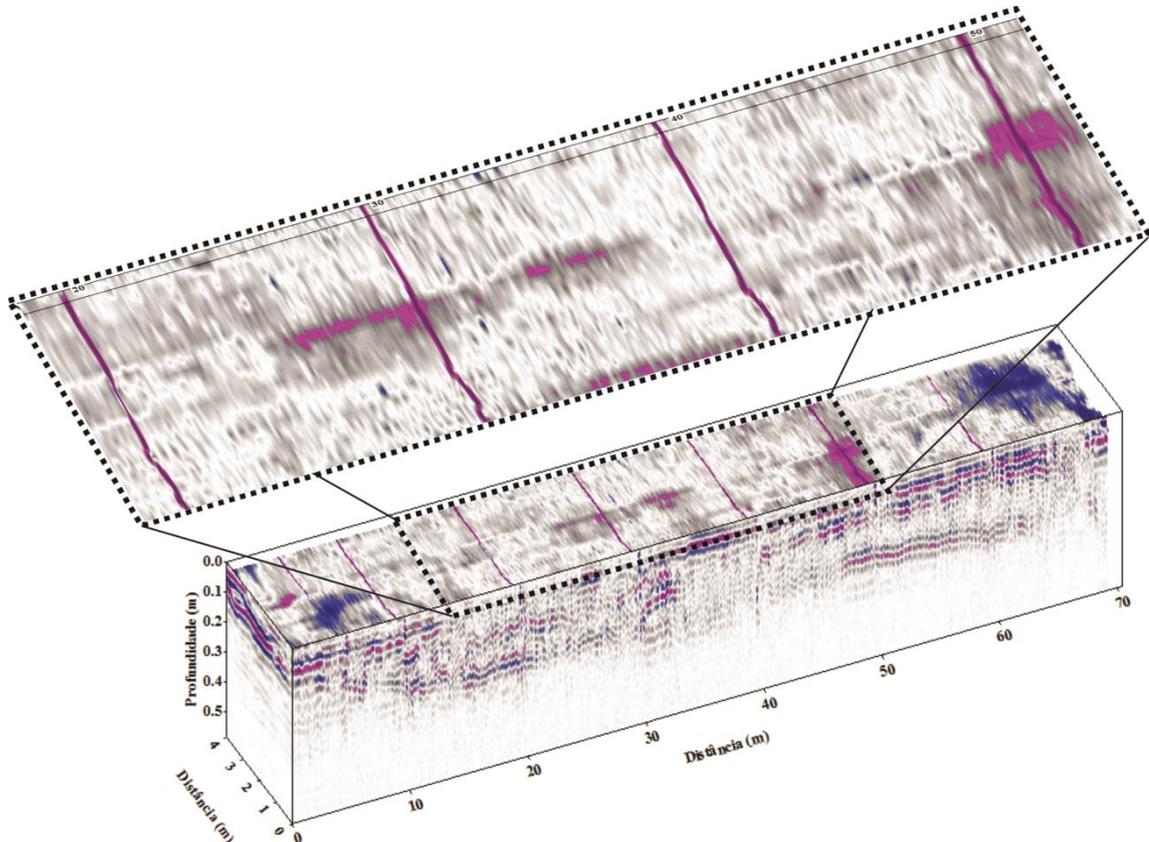


Figura 5.7 – Modelo quase-3D dos perfis de GPR para o pavimento da PECV, com slice na interface revestimento/base.

A mesma imagem quase-3D, com um *slice* mais profundo, permitiu visualizar as barras de aço instaladas na interface das camadas base/subleito a, aproximadamente, 25,45 cm de profundidade. Nessa interface, talvez pelas características do material da camada de subleito, uma argila arenosa, algumas barras tenham sido enterradas nessa camada com a pressão exercida pelo rolo compressor durante a compactação. Essa hipótese justifica de que nem todas as barras de aço tiveram o seu refletor visualizado (Figura 5.8).

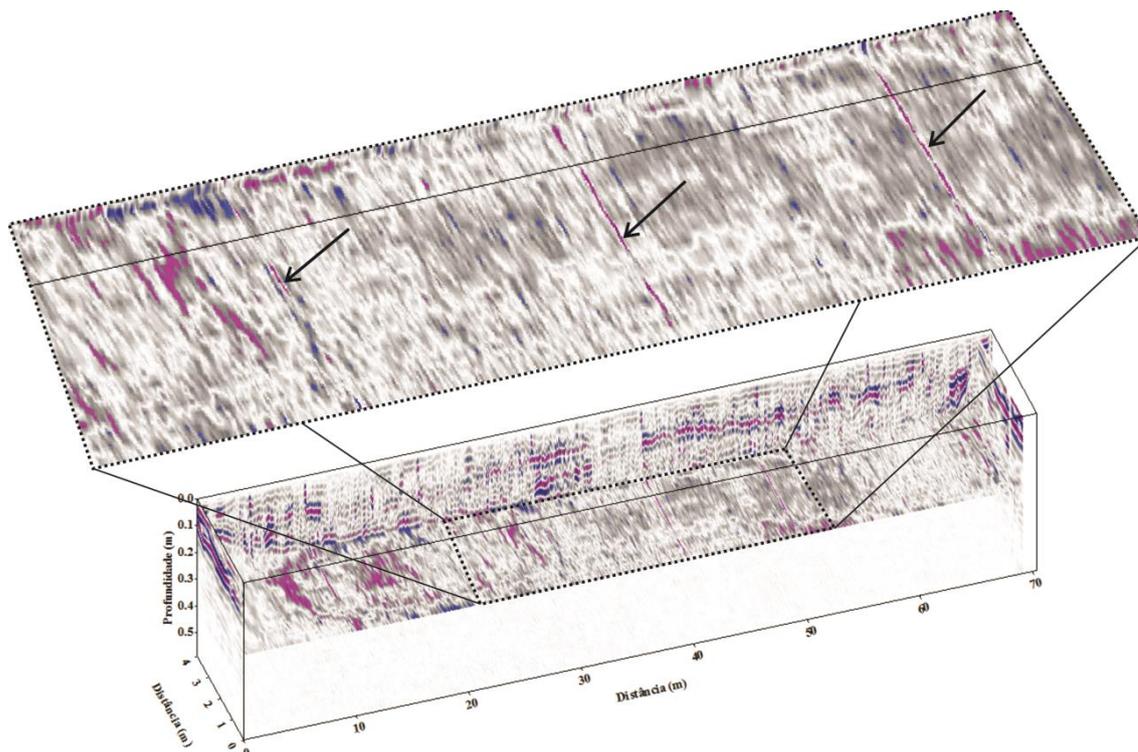


Figura 5.8 – Modelo quase-3D dos perfis de GPR para o pavimento da PECV, com slice na interface base/subleito.

5.1.2 Medidas de deflexão do Pavimento da PECV com Viga Benkelman

Com o propósito de se obter o valor da constante da viga Benkelman de fabricação da PAVITEST, com uma relação entre os braços (a:b) de 2:1, de propriedade do IFMT, realizou-se a aferição do equipamento. A aferição da viga Benkelman deu-se de acordo com os procedimentos da norma PRO 175 (DNER, 1994d). Esse procedimento ocorreu antes da aquisição de dados em campo, nos laboratórios de Mecânica dos Solos do IFMT. O valor da constante da viga é de 2,113.

O ensaio realizado na PECV dois anos após a sua liberação ao tráfego se deu nos mesmos dois sentidos que os originalmente realizados em 2012: no sentido de aquisição de dados denominado Sentido 1, do início para o final da pista, distante 45 cm da borda direita; e no Sentido 2, para a sequência de execução do ensaio do final para o início da pista, distante 0,45m da borda esquerda (Figura 5.9).

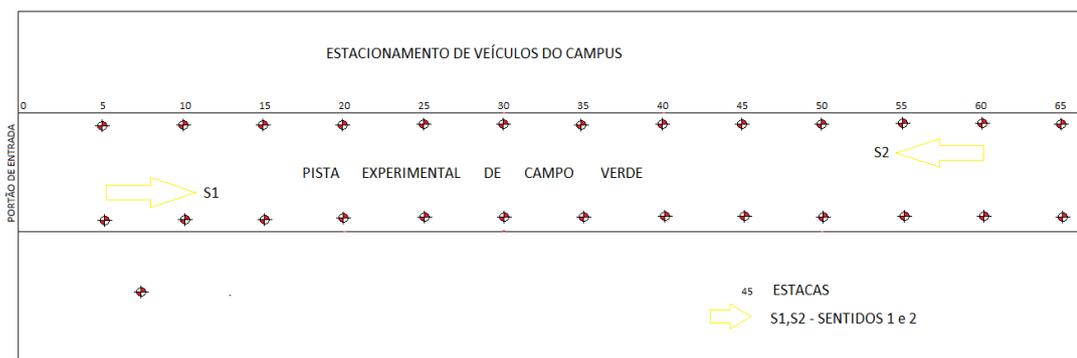


Figura 5.9 – Sentidos 1 e 2 de aquisição de dados com viga Benkelman.

Esses dados possibilitaram a elaboração dos gráficos das bacias deflectométricas nos três trechos da pista construídos com materiais diferentes para as camadas de base. Cada gráfico apresenta duas curvas de deflexões médias, uma para cada um dos dois sentidos (Sentido 1 e Sentido 2, como denominados). Elaborou-se uma terceira curva com os dados das médias dos resultados apresentados para os dois sentidos de aquisição. Construíram-se essas bacias deflectométricas após os dados terem sido depurados, de acordo com as prescrições do procedimento PRO 011 (DNER, 1979) para a determinação de parâmetros estatísticos, como a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de aceitação dos valores.

Os resultados obtidos com o ensaio com a viga Benkelman e as curvas de deflexão serão apresentadas para um dos três trechos da pista.

- Trecho 1 (Inicial) – Estacas de 0 até 30 metros

Os primeiros 30 metros da PECV possuem basicamente 3 camadas: a primeira, mais superficial, camada de revestimento, foi executada em pré-misturado a frio (PMF), com 5 cm de espessura de projeto. A camada de revestimento está assentada sobre a segunda camada, de base, com 20 cm de espessura de projeto, compactada na energia Proctor Intermediário, sem reuso de material e, nesse primeiro trecho, é constituída de solo laterítico puro. A terceira camada é a de subleito, considerada de espessura semi-infinita.

Os ensaios com viga Benkelman nesse trecho da pista permitiram obter-se a média dos valores encontrados em cada ponto onde as medições se realizaram no Sentido 1. Ensaiou-se o mesmo trecho com a viga Benkelman no Sentido 2, ou seja, com os pontos de aquisição de dados partindo do fim da pista, estaca 65 m, para o início da pista, estaca 5 m, na borda oposta, a 0,45 m (borda esquerda), cujos resultados propiciaram calcular as médias das deflexões D0 à D150 (Tabela 5.5).

Os valores médios das deflexões obtidas em cada estaca, nas duas bordas, direita e esquerda, foram calculados para Sentido 1 e Sentido 2 (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Tabela com os valores médios das deflexões D0 a D150, para as aquisições de dados nos Sentidos 1 e 2, Trecho 1 da pista.

Trecho 1 - Deflexões – Médias Sentidos 1 e 2 ($\times 10^{-2}$ mm)								
	D0	D12,5	D25,0	D50	D75	D100	D125	D150
	0,0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Média de S1	48,6	34,2	25,4	16,5	10,6	5,5	3,0	0,0
Média de S2	36,3	25,8	14,4	7,6	3,4	1,7	0,0	0,0
Média S1/S2	46,1	35,3	25,6	15,4	9,1	4,4	2,3	0,0

As três curvas (Figura 5.10) representam as duas bacias deflectométricas elaboradas a partir dos dados processados para os Sentido 1 e para o Sentido 2 de aquisição de dados, respectivamente, e uma terceira bacia elaborada com a média dessas duas aquisições.

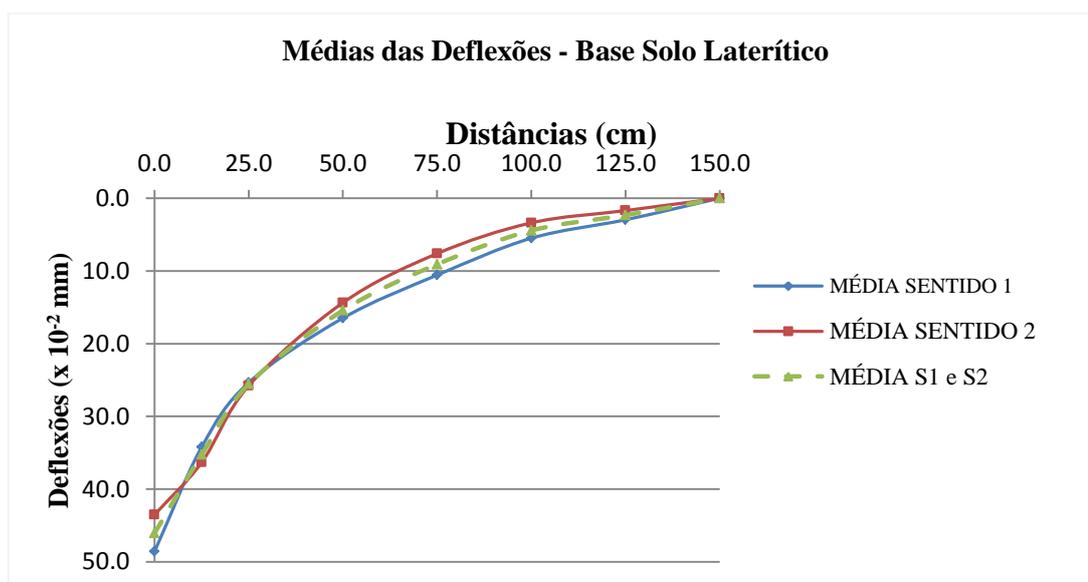


Figura 5.10 – Gráfico das curvas de deflexão médias para o Trecho 1 da PECV.

- Trecho 2 (Intermediário) – Estacas de 30 até 40 metros:

A estrutura dos próximos 10 metros da PECV foi projetada com 4 camadas: a primeira, mais superficial, camada de revestimento, foi projetada para ser do tipo pré-misturado a frio (PMF), com 5 cm de espessura de projeto. A camada de revestimento está assentada sobre uma segunda camada, de base, com espessura de projeto de 10 cm, compactada na energia Proctor Intermediário, sem reuso de material e, nessa camada, o material é de solo laterítico puro. A terceira camada, de sub-base, com espessura de projeto de 10 cm, compactada na energia Proctor Intermediário, sem reuso de material é constituída de

uma mistura de 75% de solo laterítico e de 25% de RCD. Abaixo dessas camadas, encontra-se a camada de subleito, a quarta camada, considerada de espessura semi-infinita.

Os dados adquiridos com viga Benkelman nesse trecho da pista também propiciaram calcular a média dos valores encontrados em cada ponto onde as medições foram feitas (local das estacas distantes entre si de 5 metros) no Sentido 1.

O ensaio com a viga Benkelman no Sentido 2 também foi realizado nesse trecho de 10 metros da pista, ou seja, com as estações de aquisição de dados partindo do fim da pista, estaca 65 m, para o início da pista, estaca 5 m, na borda oposta, a 0,45 m desta. Os dados dessa aquisição permitiram calcular os valores médios das deflexões de D0 a D150, em cada ponto de aquisição.

Os dados obtidos geraram a média dos valores das deflexões em cada estaca desse trecho, nas duas bordas, direita e esquerda, Sentido 1 e Sentido 2 (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Tabela com os valores médios das deflexões D0 a D150 (em 10^{-2} mm), para as aquisições de dados nos Sentidos 1 e 2, Trecho 2 da pista.

	Trecho 2 - Deflexões Médias – Sentidos 1 e 2 (x 10^{-2} mm)							
	D0	D12,5	D25,0	D50	D75	D100	D125	D150
	0,0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Média de S1	28,9	20,4	14,1	9,9	4,9	2,1	0,0	0,0
Média de S2	38,7	31,7	23,2	13,4	6,3	5,6	1,4	0,0
Média de S1/S2	33,8	26,1	18,7	11,6	5,6	3,9	0,7	0,0

As três bacias de deflexão (Figura 5.11), duas bacias elaboradas a partir dos dados processados para os Sentido 1 e para o Sentido 2, respectivamente, e uma terceira bacia elaborada com a média dessas duas e calculada foram, então, construídas.

Médias das Deflexões - Base e Sub-base

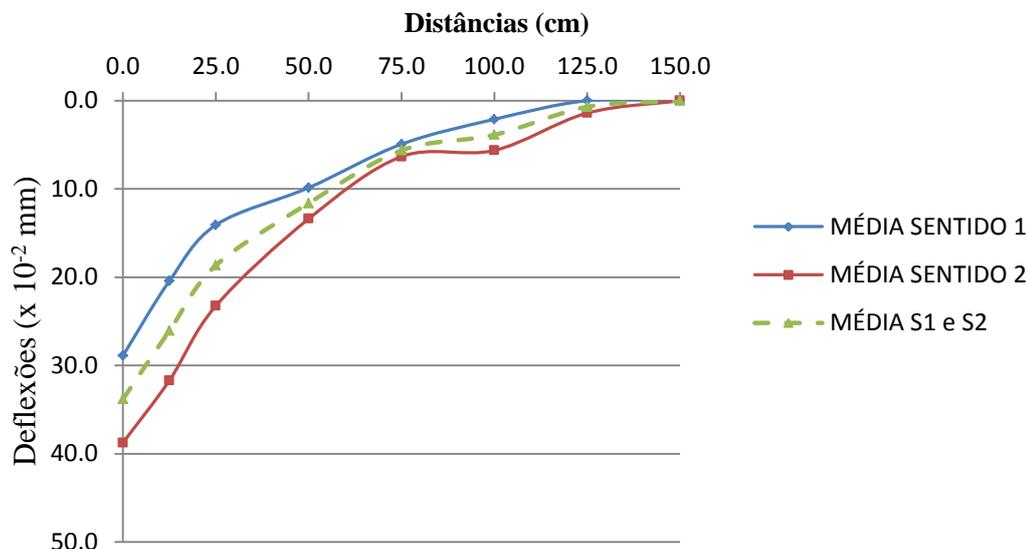


Figura 5.11 – Gráfico das curvas de deflexão médias para o Trecho 2 da PECV.

- Trecho 3 (Final) – Estacas de 40 até 65 metros:

A estrutura da pista dos últimos 25 metros da PECV possui 3 camadas, assim como o Trecho 1: o revestimento, primeira camada, é do tipo pré-misturado a frio (PMF), com 5 cm de espessura de projeto. A segunda camada de base tem 20 cm de espessura de projeto, compactada na energia Proctor Intermediário, sem reuso de material constituído de uma mistura de solo laterítico na proporção de 75%, e RCD na proporção de 25%. A terceira camada é a de subleito.

Os dados adquiridos com viga Benkelman nesse trecho da pista resultaram no cálculo da média dos valores encontrados em cada estação onde as medições foram realizadas para o Sentido 1.

O mesmo trecho final de 25 metros foi ensaiado com a viga Benkelman no Sentido 2, ou seja, com as estações de aquisição de dados partindo do fim da pista, estaca 65 m, para o início da pista, estaca 45 m, na borda oposta, a 0,45 m desta. Os dados também permitiram calcular as médias das deflexões D0 a D150, em cada ponto de aquisição.

Os dados obtidos pela média das deflexões (Tabela 5.6) foram calculados para cada estaca desse trecho da pista, nas duas bordas, direita e esquerda, Sentido 1 e Sentido 2.

Tabela 5.6 – Tabela com os valores médios das deflexões D0 a D150, para as aquisições de dados nos Sentidos 1 e 2, Trecho 3 da pista.

	<i>Trecho 3 - Deflexões Médias – Sentidos 1 e 2 (x 10⁻² mm)</i>							
	D0	D12,5	D25,0	D50	D75	D100	D125	D150
	0,0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Média de S1	28,7	15,6	10,6	5,9	2,5	0,8	0,0	0,0
Média de S1	31,7	26,2	20,7	12,7	8,9	5,9	2,1	0,0
Média S1/S2	30,2	20,9	15,6	9,3	5,7	3,4	1,1	0,0

As três bacias de deflexão, duas bacias elaboradas a partir da média dos dados processados para os Sentido 1 e para o Sentido 2, respectivamente, e uma terceira bacia que representa a média dessas duas bacias, foram elaboradas em um gráfico (Figura 5.12). Percebe-se uma maior dispersão entre os valores nos dois sentidos neste Trecho 3 em relação principalmente ao primeiro. Esta dispersão pode estar relacionada à heterogeneidade da base mista solo-RCD em relação à base mais homogênea apenas em trecho laterítico do primeiro trecho.

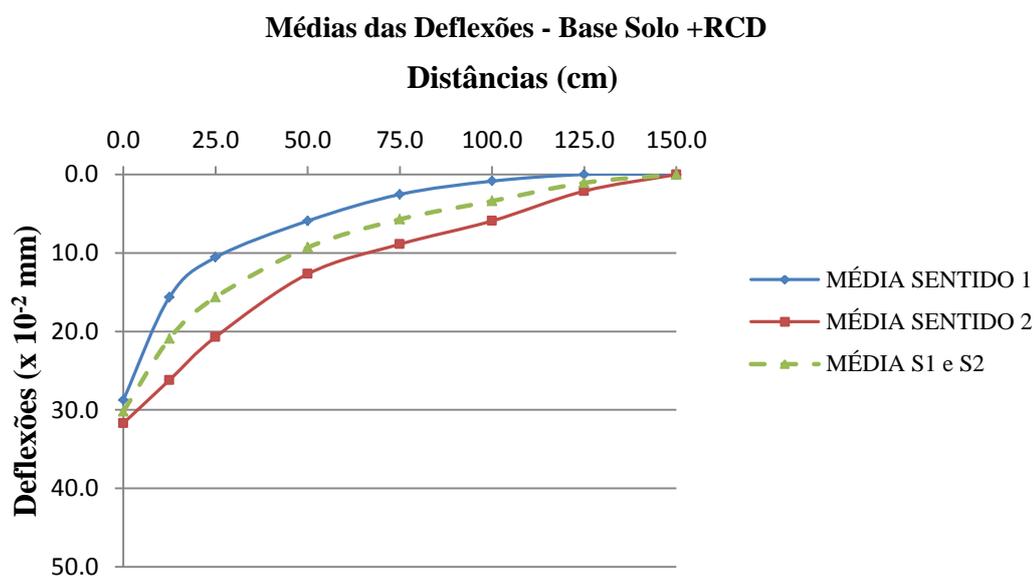


Figura 5.12 – Gráfico das curvas de deflexão médias para o Trecho 3 da PECV.

As curvas médias das deflexões obtidas pelo ensaio de viga Benkelman em 2014 foram utilizadas na retroanálise e na análise de danos do pavimento da PECV, assim como os dados de espessura das camadas do pavimento, adquiridas com o uso do Método GPR.

5.1.3 Retroanálise do Pavimento da PECV

O ajuste das bacias medida e calculada das deflexões do PECV com o programa KENPAVE (KENLAYER para pavimentos flexíveis) consistiu em realizar inferências de valores para os módulos de resiliência das camadas do pavimento, pela inserção das espessuras das camadas obtidas com auxílio do GPR. Esse processamento teve o propósito de obter os deslocamentos verticais resultantes da ação da carga vertical de 560 kPa distribuída sobre a área circular de raio 10 cm produzida pelo contato do pneu no pavimento (bacia calculada). Esses deslocamentos foram, então, comparados aos da bacia medida com o ensaio com a viga Benkelman. Enquanto o ajuste entre essas duas bacias não ocorreu, os valores de módulos de resiliência (MR) foram iterativamente modificados no programa, até que um ajuste satisfatório fosse obtido.

O procedimento descrito acima foi realizado para o trecho 1, construído com a camada de base constituída de solo laterítico puro, e para o trecho 3, construído com a camada de base constituído de uma mistura de solo laterítico (75%) + RCD (25%). Numa análise estatística utilizando a análise de variância ANOVA com o propósito de desenvolver um teste para avaliar a hipótese de diferenças ou não entre as médias populacionais das deflexões obtidas pelo ensaio com viga Benkelman nessa PECV, verificou-se que o primeiro trecho da pista difere dos dois trechos subsequentes da pista, constituindo famílias de dados diferentes. Entretanto, o Trecho 2, cujas camadas subjacentes à camada de revestimento eram constituídas de uma camada de base de 10 cm de espessura de solo laterítico, seguida de uma camada de sub-base de mesma espessura com uma mistura de solo (75%) + RCD (25%); e o trecho 3, constituído de uma camada de base da mesma mistura de solo + RCD, mostraram-se com comportamento muito semelhantes, motivo pelo qual optou-se por analisar os trechos 1 e 3 da pista.

Os valores médios obtidos para as espessuras das camadas de revestimento e base após o processamento dos perfis GPR empregados nesse processamento foram, respectivamente, 4,24 cm e 25,10 cm. Os valores dos MR que melhor permitiram ajustar as bacias deflectométricas medida e calculada para o primeiro trecho da pista (Tabela 5.7) foram, para a camada de revestimento, 1.000 MPa; 375 MPa para a camada de base constituída de solo laterítico e, para a camada de subleito, 95 MPa.

Tabela 5.7 – Valores obtidos para as bacias de deflexão medida e calculada e para as diferenças verificadas para o ajuste das referidas bacias da PECV, Trecho 1.

		Bacia Medida – Estaca de 20 m ($\times 10^{-2}$ mm)							
		0,0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Média do Tr.1		D0	D12,5	D25,0	D50	D75	D100	D125	D150
		41,2	34,9	29,6	21,1	15,8	11,6	8,5	0,0
		Bacia Calculada ($\times 10^{-2}$ mm)							
		42,07	37,07	29,71	20,03	14,27	10,76	8,54	7,06
Diferença (%)		4,29	6,33	0,43	5,21	5,51	9,95	7,41	1,04

Os primeiros 10 m da pista tiveram os valores das suas espessuras suprimidos para o cálculo do valor médio da espessura da camada de base da PECV, pelas razões já expressas: a viga de concreto existente no início da pista impediu que as máquinas construíssem uma camada de base com espessura regular. Da mesma forma, para a Retroanálise, foram excluídas as bacias de deflexão desse trecho.

Os valores referidos à bacia medida e calculada para os valores de módulos de resiliência e para os valores de espessura de camadas citados permitiram a elaboração da bacia deflectométrica calculada da Figura 5.13. A bacia deflectométrica da estaca de 20 m foi a que melhor ajustou à bacia calculada na Retroanálise. Outros dados fornecidos para o programa KENLAYER para realizar o processamento que forneceu esses resultados são resumidos na Tabela 5.8.

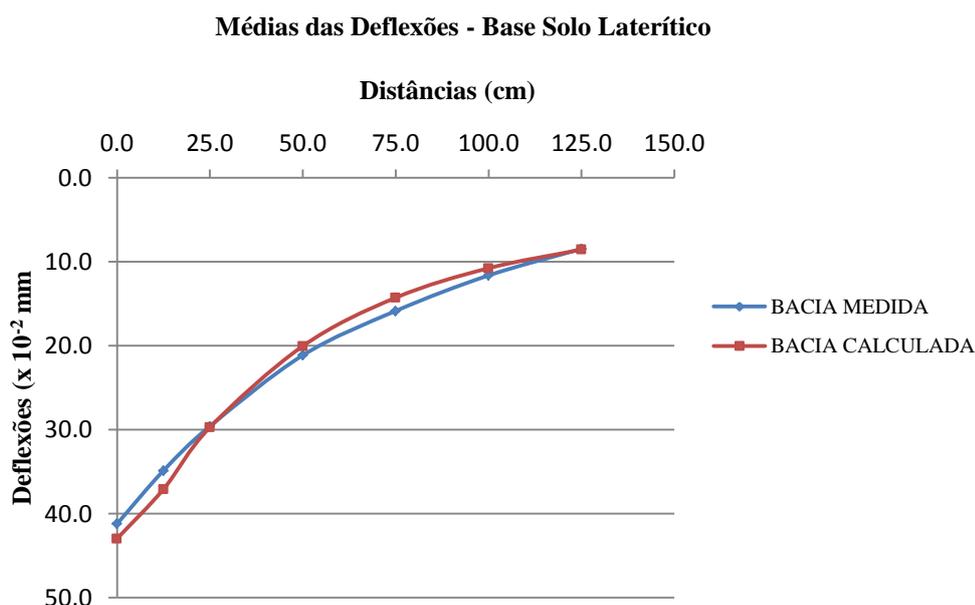


Figura 5.13 – Gráfico representando o melhor ajuste das bacias deflectométricas medida e calculada para a PECV, Trecho 1.

Tabela 5.8 - Valores inseridos no programa KENLAYER para o processamento da retroanálise da PECV.

Programa kenlayer (huang, 2004)			
Dados de Entrada (solicitados)	Sigla	Dados de entrada (fornecidos)	Referência
Tipo de Material	MATL	linear elástico	
Número de Períodos por ano	NPY	1	
Número de Grupos de Carga	NLG	1	combinações para eixo/rodas
Tolerância para Integração Numérica	DEL	0,01	padrão
Número de Camadas	NL	3	
Número de Coordenadas Z para análise	NZ	1	superfície do revestimento
Ciclos Máximos de Integração Numérica	ICL	80	padrão
Tipo de Respostas	NSTD	1	deflexões verticais
Todas as Camadas são Solidárias	NBON	1	sim
	D		
Nº de Camadas Tensão Tração na Base	NLBT	1	base do revestimento
Nº de Camadas Tensão Compressão no Topo	NLTC	1	topo do subleito
Sistema de Unidades	NUNIT	1	Sistema Internacional
Valor da Coordenada Z para análise	ZC	0	superfície do revestimento
Espessura da camada 1	TH	4,24	espessura do revestimento (cm)
Espessura da camada 2	TH	25, 1	espessura da base (cm)
Módulo de Poisson para o Revestimento	PR	0,3	(kN/m ³)
Módulo de Poisson para a base	PR	0,3	(kN/m ³)
Módulo de Poisson para o Subleito	PR	0,3	(kN/m ³)
Módulo de Resiliência para a Camada 1	E	1.000.000	(kPa)
Módulo de Resiliência para a Camada 2	E	375.000	(kPa)
Módulo de Resiliência para a Camada 3	E	95.000	(kPa)
O tipo de carga ou carregamento	LOAD	1	eixo simples/roda dupla
Raio de Contato da Área Circular Carregada	CR	10	(cm)
Pressão de Contato sobre a Área Circular Carregada	CP	560	(kPa)
Espaço Centro-a-centro entre duas rodas duplas na direção Y	YW	30	(cm)
Espaço Centro-a-centro entre dois Eixos na Direção X	XW	0	(cm)
Nº de Coordenadas Radiais p/ serem Analisadas sob Roda Simples	NR	7	D0 a D150 da Viga Benkelman
Coordenadas X e Y de Pontos de Respostas p/ o Grupo de Carga	XPT,Y PT	0-15; 12,5-15; 25-15 ;50-15 ;75-15; 100-15; 125-15; 150-15	

5.1.4 Análise de Danos da PECV

Após a retroanálise dos valores de módulos de resiliência e de posse das espessuras das camadas da estrutura do pavimento da PECV, utilizou-se novamente o programa KENLAYER, agora optando pela análise de danos, de modo a obter resultados dos valores das deformações de tração (ϵ_t) atuante na base da camada de revestimento e da deformação de compressão (ϵ_c) atuante no topo da camada de subleito. Encontraram-se, para o Trecho 1 da

PECV, valores de $\varepsilon_t = -2,610 \cdot 10^{-5}$ e de $\varepsilon_c = 6,960 \cdot 10^{-4}$ para as deformações de tração na base do revestimento e de compressão no topo do subleito, respectivamente.

Com base nos modelos de fadiga e deformação permanente do *Asphalt Institute*, o valor do número de repetições permitidas calculados para a carga adotada foi de $3,80 \times 10^9$ para a camada de revestimento, tendo como referência o valor do MR da camada de revestimento igual a $1,45 \cdot 10^5$ psi; e de $1,88 \times 10^5$ para a camada de subleito.

Os dados complementares de entrada no programa KENLAYER (Tabela 5.9) possibilitaram a determinação dos resultados apresentados.

Tabela 5.9 - Dados complementares inseridos no programa KENLAYER para o processamento da análise de danos do pavimento da PECV.

Programa Kenlayer (Huang, 2004)			
Dados De Entrada (Solicitados)	Sigla	Dados de Entrada (Fornecidos)	Referência
Nº da Camada para Análise de Dano da Tensão de Base	LNBT	1	Camada de Revestimento
Coefficiente de Fadiga, f_1	FT1	0,0796	<i>Asphalt Institute</i>
Coefficiente de Fadiga, f_2	FT2	3,291	<i>Asphalt Institute</i>
Coefficiente de Fadiga, f_3	FT3	0,854	<i>Asphalt Institute</i>
Nº da Camada para Análise de Dano da Tensão de Topo	LNTC	3	Camada de Subleito
Coefficiente de Deformação Permanente, f_4	FT4	$1,365 \cdot 10^{-9}$	<i>Asphalt Institute</i>
Coefficiente de Deformação Permanente, f_5	FT5	4,477	<i>Asphalt Institute</i>
Nº Total de Repetição de Cargas para cada Grupo de Carga, durante cada Período	TNLR	1	Volume de Tráfego

Para o pavimento em análise, a equação de Miner (1945) sugere que a razão entre o número de passadas previstas em projeto e o número de passadas que pode levá-lo à fadiga, deve ser menor ou, na pior das hipóteses, igual à unidade.

Considerando $N_p = 3,2 \times 10^6$, valor sugerido para o número de passadas de projeto da PECV para o Trecho 1 de acordo com o dimensionamento original baseado no método do CBR e apresentado por Amorim (2013), e o valor calculado de $N_f = 3,80 \times 10^9$, o consumo de fadiga desta estrutura (N_p/N_f) seria muito baixo ($8,42 \times 10^{-4}$). Ou seja, a camada de revestimento não romperia por fadiga do revestimento nos 10 anos, previstos no projeto.

Entretanto, considerando ainda $N_p = 3,2 \times 10^6$ e o valor limite $N_f = 1,88 \times 10^5$ para a camada de subleito, tem-se um consumo de fadiga (N_p/N_f), igual a 17,2. Por esse aspecto, a camada de subleito apresentaria sinais de deformação permanente excessiva após 1,72 anos (20 meses) de uso, ou seja, romperia muito antes do prazo previsto em projeto.

Apesar das grandes incertezas quanto ao valor do tráfego de projeto (N_p), este tipo de análise mostra a importância de um método de dimensionamento mecânico-empírico.

Somente com este tipo de abordagem é possível considerar as tensões atuantes nas diversas camadas do pavimento, calculadas por procedimentos com apoio científico na Mecânica dos Meios Contínuos e modelos constitutivos adequados aos materiais utilizados, aliado a equações de desempenho de fadiga e afundamento de trilhas de roda, calibrados com base em extensa base de dados empírica.

5.1.5 Análise Probabilística do Pavimento da PECV

Para a análise probabilística do pavimento da PECV aplicou-se o Método FOSM às deformações de tração na base do revestimento asfáltico e de compressão no topo do subleito, numa primeira etapa. Em seguida, aplicou-se o mesmo método para o número de passadas que leva a camada de revestimento à fadiga e também a de subleito, respectivamente, tendo como variáveis aleatórias as espessuras das camadas da estrutura do pavimento e os seus respectivos módulos de resiliência (MR).

Os valores médios das espessuras das camadas de revestimento e de base da estrutura do pavimento da PECV e os seus respectivos MR para o Trecho 1 são apresentados na Tabela 5.10. Mostram-se ainda os valores de coeficiente de variação, desvio padrão e variância de cada parâmetro considerados para a análise probabilística desse trecho do pavimento pelo Método FOSM.

As equações 3.48, 3.49 e 3.50 mostram as expressões das derivadas parciais obtidas para os incrementos em avanço, centrado e em atraso de $\pm 10\%$. Os valores numéricos obtidos com estes procedimentos são mostrados na Tabela 5.11. Esses valores, aplicados às equações 3.51, 3.52 e 3.53, determinaram a variância da deformação de tração na base do revestimento do pavimento da PECV, pelo Método FOSM, cujos valores são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.10 - Dados necessários para a análise probabilística do pavimento da PECV – aplicação do Método FOSM – Trecho 1.

Parâmetros	Média	Coeficiente Variação CoV (%)	Desvio Padrão S[X _i]	Variância v[X _i]
H _r (cm)	4,24	2,33	0,099	9,81-03
H _b (cm)	25,1	28,79	7,227	5,22E+01
M _r (kPa)	1,00E+06	15,78	1,58E+05	2,49E+10
M _b (kPa)	3,75E+05	19,6	7,35E+04	5,40E+09
M _{sl} (kPa)	9,50E+04	20,0	1,90E+04	3,61E+08
CoV(M _r) - referência Egan e Miranda (1995)				
CoV(M _b), CoV(M _{sb}) - referência Santos <i>et al.</i> (1995)				

Tabela 5.11 – Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento.

Variáveis	$(\partial\varepsilon/\partial x_i)_+$	$(\partial\varepsilon/\partial x_i)_\pm$	$(\partial\varepsilon/\partial x_i)_-$
H _r	-1,31E-05	-1,67E-05	-2,02E-05
H _b	-3,82E-07	-3,05E-07	-2,27E-07
M _r	-3,16E-11	-3,55E-11	-3,93E-11
M _b	3,80E-10	4,18E-10	4,55E-10
M _{sl}	-3,38E-10	-3,63E-10	-3,87E-10

Tabela 5.12 - Dados da análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento.

Incremento	v[Def]+	v[Def]±	v[Def]-
	Avanço	Centrado	Atraso
Infl. da H _r	1,69E-12	2,72E-12	3,99E-12
Infl. da H _b	7,64E-12	4,85E-12	2,69E-12
Infl. da M _r	2,49E-07	3,13E-07	3,85E-07
Infl. da M _b	7,81E-06	9,43E-06	1,12E-05
Infl. do M _{sl}	4,12E-07	4,75E-07	5,42E-07
Total	8,47E-06	1,02E-05	1,21E-05

Na Figura 5.14 mostra-se a influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância da deformação de tração na base da camada de revestimento desse pavimento, usando derivadas centradas.

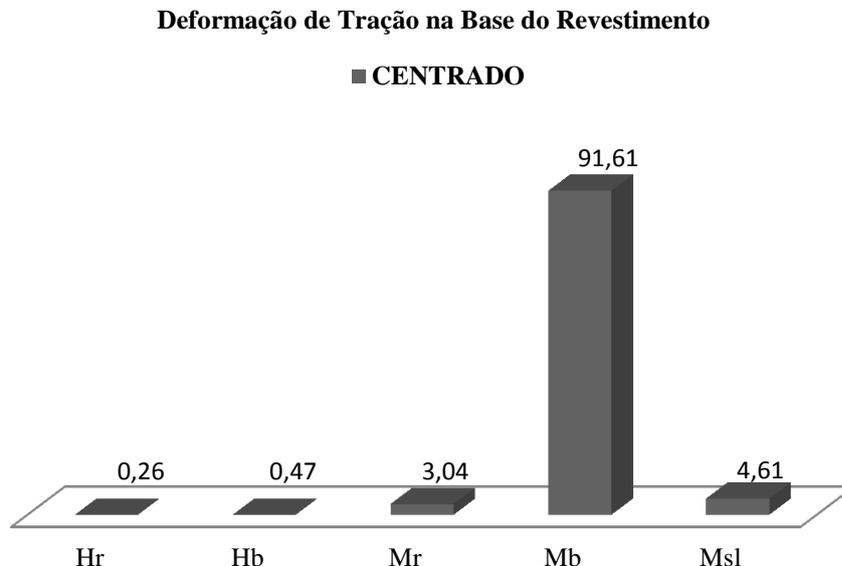


Figura 5.14 - Gráfico da influência das variáveis aleatórias, sobre o valor da deformação de tração na base da camada de revestimento do pavimento da PECV com o Método FOSM.

O fator mais influente para a determinação da variância da deformação de tração na base da camada de revestimento foi o MR da camada de base (91,61%). Os demais módulos se mostraram pouco expressivos neste caso, com contribuições de 4,61% e 3,04% para as camadas de subleito e de revestimento, respectivamente. Estas variáveis são as que apresentam a maior variância de acordo com a última coluna da Tabela 5.10. Os valores das espessuras das camadas de revestimento e de base pouco influenciaram nesse aspecto.

Segundo Monismith & Deacon (1969), quando a espessura do revestimento é da ordem de 1 polegada (2,54 centímetros), independente da rigidez do concreto asfáltico, a deformação de tração é praticamente constante. Revestimentos asfálticos delgados têm pouca influência sobre as deformações a que está sujeito. Por outro lado, quando a espessura do concreto asfáltico aumenta muito, a sua rigidez tem pouco efeito sobre as tensões, mas influencia significativamente a magnitude das deformações de tração. Na prática o autor sugere que revestimentos com menos de 5,0 cm de espessura estariam sujeitos a condições de deformação controlada, enquanto que revestimentos com espessuras superiores a 10,0 cm estariam sujeitos a condições de tensão controlada. Isto explica a pouca influência das variáveis relativas à espessura e módulo do revestimento da PECV, uma vez que este foi feito com PMF de baixa rigidez e espessura média medida de 4,24 cm.

Em função da baixa espessura da camada de revestimento em PMF, o desenvolvimento de tensões e deformações na fibra inferior do revestimento passa a ser controlado pela rigidez da camada de base, principalmente pelo seu módulo de resiliência, pois este apresenta ao mesmo tempo uma variância elevada ($5,40 \cdot 10^{+9}$) e também a maior derivada parcial em valores absolutos dentre os três fatores com maior variância, ou seja, os módulos de resiliência dos materiais. A espessura da camada de base, que também afeta de forma significativa na sua rigidez, apresenta uma variância muito baixa (da ordem 10^{+1}) em relação aos módulos dos materiais cuja variância é da ordem de 10^{+9} .

O Método FOSM também foi aplicado para determinar a variância da deformação de compressão no topo da camada de subleito da estrutura do pavimento da PECV para o incremento de $\pm 10\%$ das variáveis aleatórias, com derivadas em avanço, centrada e em atraso. Os valores das derivadas parciais se encontram na Tabela 5.13 e as variâncias encontradas são mostradas na Tabela 5.14.

Tabela 5.13 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV para o parâmetro deformação de compressão no topo da camada de subleito.

Variáveis	$(\partial\varepsilon/\partial xi)^+$	$(\partial\varepsilon/\partial xi)^\pm$	$(\partial\varepsilon/\partial xi)^-$
H _r	-3,25E-05	-3,29E-05	-3,33E-05
H _b	-1,51E-04	-2,70E-05	-1,68E-04
M _r	-1,25E-05	-5,55E-11	-1,37E-05
M _b	-5,05E-05	-6,00E-10	-5,57E-05
M _{sl}	-9,22E-05	-4,40E-09	-1,05E-04

Tabela 5.14 - Dados da análise probabilística do pavimento da PECV para a deformação de compressão no topo da camada do subleito

Incremento	v[Def]+	v[Def]±	v[Def]-
	Avanço	Centrado	Atraso
Infl. da H _r	1,04E-11	1,06E-11	1,08E-11
Infl. da H _b	3,40E-08	3,80E-08	4,23E-08
Infl. da M _r	6,99E-11	7,67E-11	8,38E-11
Infl. da M _b	1,76E-09	1,94E-09	2,14E-09
Infl. do M _{sl}	6,12E-09	6,99E-09	7,92E-09
Total	4,19E-08	4,70E-08	5,24E-08

O resultado dessa análise proporcionou a criação da Figura 5.15 para ilustrar a influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor dessa variância.

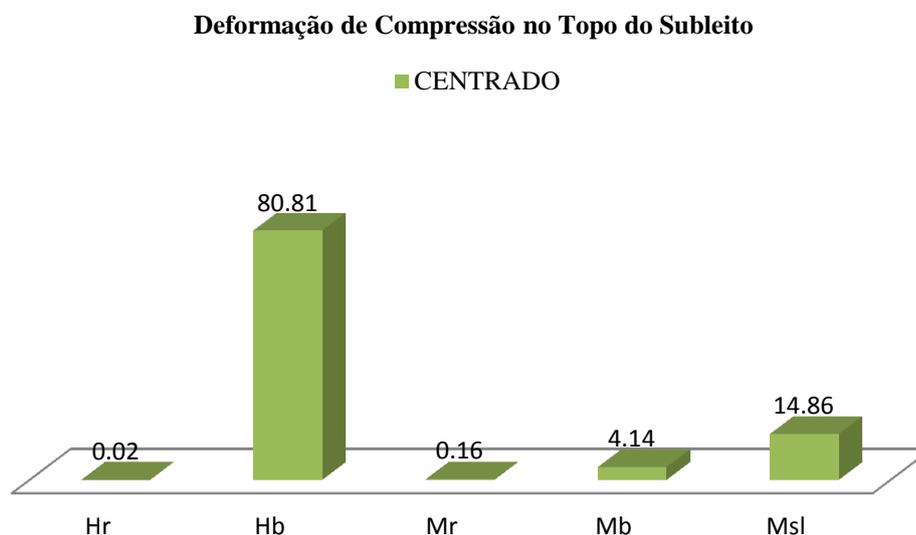


Figura 5.15 – Gráfico da influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da deformação de compressão no topo da camada de subleito do pavimento da PECV, Trecho 1, com incremento centrado de $\pm 10\%$, com o Método FOSM.

O valor esperado para a deformação de compressão no topo de subleito foi influenciado, predominantemente, pelos valores de H_b (80,81%), seguido pelo MR da camada

de subleito (14,86%). A maior influência da H_b deve-se ao fato de sua derivada parcial ter maior valor absoluto, relativamente às derivadas das demais variáveis. Esta diferença é ampliada, pois as derivadas parciais são elevadas ao quadrado no cálculo das variâncias da variável dependente. A espessura e o MR da camada de revestimento tiveram pouca influência para a variância da deformação no topo do subleito.

O Método FOSM também foi aplicado para determinar a influência das variáveis aleatórias no cálculo da variância do número de passadas permitidas para o pavimento em estudo, para os incrementos em avanço, em atraso e centrado de $\pm 10\%$, para as camadas de revestimento e subleito, respectivamente. Os valores das derivadas parciais e das variâncias para o número de passadas permitidas para o revestimento e o subleito encontram-se, respectivamente nas Tabelas 5.15 e 5.16 e nas Tabelas 5.17 e 5.18. Os gráficos (Figuras 5.16 e 5.17) ilustram as contribuições de cada variável aleatória para esses valores esperados.

Os dados provenientes da análise probabilística pelo Método FOSM para a variância do número de passadas permitidas para a camada de revestimento (Tabela 5.16), para o incremento centrado, destacou a importância do valor do MR da camada de base (92,08%) outra vez, seguido pelo valor do módulo da camada de subleito (4,32%) e, depois, do revestimento (2,89%). Outra vez os valores das espessuras das camadas pouco influenciaram devido aos seus baixos valores de variância. As derivadas parciais para esse parâmetros estão na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento.

Variáveis	$(\partial \varepsilon / \partial x_i)_+$	$(\partial \varepsilon / \partial x_i)_\pm$	$(\partial \varepsilon / \partial x_i)_-$
H_r	-3,29E+07	-5,28E+07	-7,26E+07
H_b	-1,07E+06	-8,65E+05	-6,60E+05
M_r	-8,38E+01	-1,04E+02	-1,25E+02
M_b	1,63E+03	1,26E+03	8,96E+02
M_{sl}	-8,95E+02	-1,06E+03	-1,22E+03

Tabela 5.16– Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%.

Incremento	$v[Def]_+$	$v[Def]_-$	$v[Def]_\pm$
	Avanço	Atraso	Centrado
Infl. da H_r	1,06E+13	5,17E+13	2,73E+13
Infl. da H_b	5,98E+13	2,27E+13	3,91E+13
Infl. da M_r	1,75E+14	3,86E+14	2,70E+14
Infl. da M_b	1,43E+16	4,33E+15	8,61E+15
Infl. do M_{sl}	2,89E+14	5,37E+14	4,04E+14
Total	1,49E+16	5,33E+15	9,35E+15

O gráfico (Figura 5.16) ilustra o comportamento dos parâmetros do pavimento que influenciam na determinação da variância do número de passadas permitidas para a camada de revestimento do pavimento.

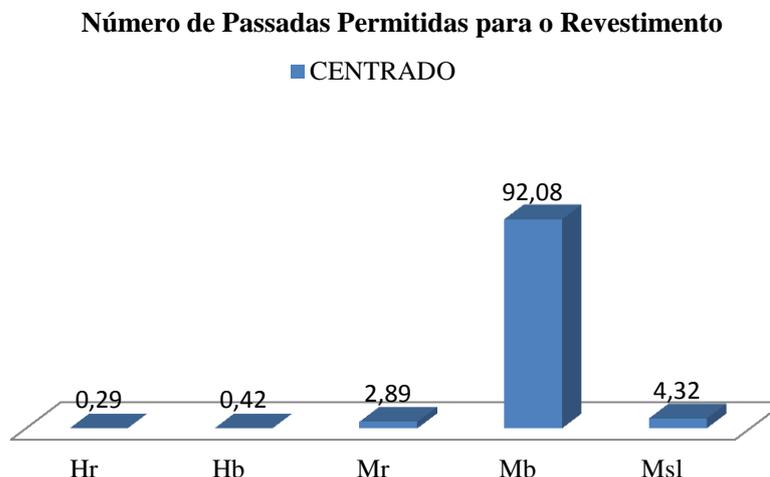


Figura 5.16 – Gráfico da influência das variáveis aleatórias para o número de passadas permitidas para a camada de revestimento do da PECV, Trecho 1.

Para a camada de subleito o valor da variância do número de passadas permitidas determinadas pelo Método FOSM se comportou de forma diferente da anterior, para a camada de revestimento (Tabela 5.18). Nessa análise, H_b mostrou-se mais influente (81,64%), seguido pelo valor do MR da camada de subleito (14,24%). A maior influência da H_b se deve ao maior valor absoluto da derivada parcial do número de passadas em relação a este módulo. As derivadas parciais desse parâmetro encontram-se na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito.

Variáveis	$(\partial\varepsilon/\partial xi)^+$	$(\partial\varepsilon/\partial xi)\pm$	$(\partial\varepsilon/\partial xi)^-$
H_r	4,16E+04	3,98E+04	3,80E+04
H_b	4,04E+04	3,35E+04	2,65E+04
M_r	6,54E-02	6,69E-02	6,85E-02
M_b	7,52E-01	7,23E-01	6,95E-01
M_{sl}	5,84E+00	5,32E+00	4,79E+00

Tabela 5.18 – Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PECV, Trecho 1, para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%.

Incremento	v[Def]+	v[Def]±	v[Def]-
	Avanço	Centrado	Atraso
Infl. da H_r	1,69E+07	1,55E+07	1,42E+07
Infl. da H_b	8,53E+10	5,85E+10	3,67E+10
Infl. da M_r	1,06E+08	1,12E+08	1,17E+08
Infl. da M_b	3,05E+09	2,82E+09	2,61E+09
Infl. do M_{sl}	1,23E+10	1,02E+10	8,28E+09
Total	1,01E+11	7,16E+10	4,77E+10

Um gráfico foi elaborado (Figura 5.17) para ilustrar o comportamento dos parâmetros do pavimento que influenciaram na determinação do número de passadas permitidas para a camada de subleito do pavimento.

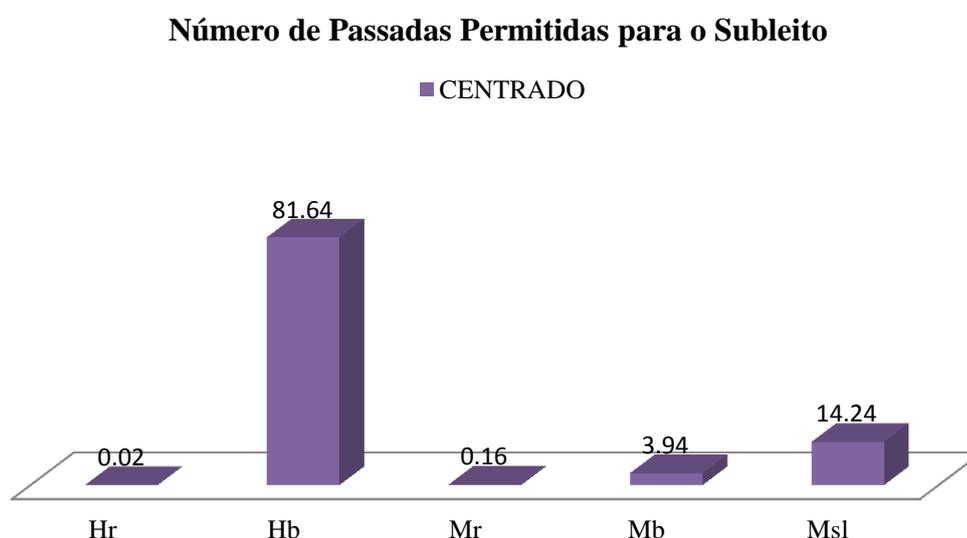


Figura 5.17 – Gráfico da influência das variáveis aleatórias sobre o número de passadas permitidas para a camada do subleito do pavimento da PECV, Trecho 1.

Numa análise final para o estudo probabilístico do pavimento da PECV do Trecho 1 pode-se dizer que os fatores que mais influenciaram na determinação das variâncias das deformações e número de passadas relativas a camada de revestimento desse trecho do pavimento foram os MR das camadas de base e de subleito, destacando a importância da rigidez relativa dessas camadas para a vida do revestimento. Para a camada de subleito, entretanto, foram mais influentes os valores de espessura da camada de base e o MR da camada de subleito, destacando a importância da rigidez da camada de base para absorver as tensões impostas pelas cargas verticais no pavimento.

5.2 PISTA DA AVENIDA ANTÁRTICA (PAA)

Alguns resultados de ensaios serão apresentados a seguir, para melhor caracterizar os materiais que constituíram as camadas da estrutura do pavimento da PAA, em Cuiabá-MT. Os ensaios de compactação foram realizados pela equipe construtora do pavimento e os ensaios de caracterização foram realizados com amostras de solo retiradas das camadas durante a sua construção nos laboratórios de Mecânica dos Solos do IFMT. Os materiais ensaiados para a camada de revestimento são oriundos de amostras de núcleos extraídos do pavimento após a construção dessa camada e que, inclusive, permitiram medir as suas dimensões de espessura.

5.2.1 Ensaios de Caracterização dos Materiais da Estrutura do Pavimento da PAA

Foram realizados os ensaios para caracterização dos solos usados nas camadas de regularização do subleito e sub-base e base da pista, de acordo com as prescrições das normas da ABNT. A preparação das amostras baseou-se nas prescrições da NBR 6457/86. Os ensaios de peneiramento permitiram a elaboração da curva granulométrica de acordo com a norma NBR 7181/84. Os ensaios para determinação dos índices de Atterberg (Limite de Liquidez, NBR 6459/84 e Limite de Plasticidade, NBR 7180/84) também foram realizados.

O solo utilizado na camada de regularização do subleito apresentou Limite de Liquidez de 19,36% e Limite de Plasticidade de 18,73%. O Índice de Plasticidade, portanto, foi de 0,6%. A massa específica dos sólidos calculada foi de 2,39 g/cm³.

O solo utilizado na camada de base e sub-base apresentou Limite de Liquidez de 24,91% e Limite de Plasticidade de 23,06%. O Índice de Plasticidade, portanto, foi de 1,85%. A massa específica dos sólidos foi estimada em 2,64g/cm³.

Os ensaios de Compactação e de Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como CBR – California Bearing Ratio tiveram os seus procedimentos balizados pelas normas da ABNT NBR 7182/86 e NBR 9895/87, respectivamente. Os valores obtidos de CBR e expansão, além dos parâmetros de ótimos de compactação para a energia correspondente são mostrados na Tabela 5.19. Todos os materiais atendem às especificações do DNIT, tendo a base CBR superior a 80% e a sub-base CBR superior a 20%. O CBR do subleito é bastante elevado e não deve corresponder a um solo natural. Os materiais não apresentam expansividade, o que está de acordo com o valor praticamente nulo de Índice de Plasticidade.

O revestimento é constituído de uma camada de Concreto Betuminoso Usinado a Quente – CBUQ com 5,0 cm de espessura de projeto. Após a construção da camada de revestimento e antes de ser entregue ao tráfego, foram extraídos três corpos de prova com uma Sonda Rotativa. Com os ensaios laboratoriais e de campo foram determinadas as propriedades do revestimento, tais como teor de betume, grau de compactação, granulometria, espessura da camada e parâmetros físicos como porcentagem de vazios (%Vv), relação betume vazios (%RBV). Os valores encontrados estão relacionados na Tabela 5.20.

Quanto ao revestimento percebe-se que a espessura construída média foi de 7,0 cm, ou seja, 40% superior ao valor de projeto. O coeficiente de variação (desvio padrão sobre a média) foi de 13%. O grau de compactação teve baixa dispersão com valor médio de 88%, bem abaixo do valor mínimo de 97%, prescrito pela Especificação de Serviço ES-031 (DNIT, 2006). Isto é indicativo de deficiências no controle construtivo, muito provavelmente ligado a baixas temperaturas durante a compactação.

Todos os parâmetros volumétricos (Vv, RBV) das amostras de CBUQ retiradas do revestimento foram considerados fora das especificações. O volume de vazios de ar médio de 12,9% e a baixa relação betume vazio (55%), mais uma vez são indicativos de problemas com o controle de compactação. O teor de ligante médio de 7,5% está muito acima do especificado na dosagem de 5%. Todos estes fatores devem se refletir negativamente nos parâmetros mecânicos e no desempenho da mistura utilizada. Ademais o uso excessivo de ligante e a maior espessura em relação ao projeto indicam um custo mais elevado que o necessário para a obtenção de uma camada de qualidade inferior à esperada.

A construção das camadas subjacentes à camada de revestimento, constituídas de materiais granulares distinguiram-se basicamente, pela energia de compactação imprimida a elas para lhes oferecer resistência ao tráfego. As camadas de base e sub-base, respectivamente com 20 cm de espessuras de projeto cada, foram construídas com solo laterítico de coloração avermelhada, com presença de material pedregulhoso de diversas dimensões, inclusive pedras cangas, denominação dada às pedras de mão constituídas de concreções ferruginosas.

Tabela 5.19 – Valores dos resultados dos ensaios de compactação (NBR 7182/86) e ISC/CBR (NBR9895/87) dos solos usados nas camadas de sub-base e base da estrutura da PAA.

Data	Estaca	Camada	Borda	Energia	$\gamma_{ap.seca}$	H _{ót.}	CBR	Expansão		
				PROCTOR	(g/cm ³)	(%)	(ISC)	(%)		
Maio/2013	90	Subleito	Esquerda	Normal	2,030	9,1	47,2	0,01		
	90		Direita		1,865	10,7				
	92		Direita		1,865	10,7				
	95		Esquerda		1,910	7,1				
	95		Direita		1,910	7,5				
	100		Esquerda		1,942	9,3				
	105		Esquerda		1,975	9,8				
	110		Esquerda		1,960	10,0				
	115		Esquerda		2,018	8,9				
	115		Direita		2,018	8,9				
	120		Esquerda		2,031	8,1			32,3	0,0
	125		Direita		1,995	9,6				
	130		Esquerda		1,950	9,0				
	135		Direita		1,894	9,3				
Maio/2013	90	Sub-Base	Direita	Intermediária	2,035	8,5	76,0	0,0		
	90		Esquerda		2,03	9,2				
	95		Direita		2,045	8,3				
	100		Esquerda		2,030	9,5				
	105		Esquerda		2,080	9,4				
	110		Esquerda		2,050	9,2				
	115		Direita		2,061	9,3				
	120		Esquerda		2,085	7,9			57,3	0,0
	125		Esquerda		2,055	9,2				
	130		Esquerda		2,078	8,4				
	90		Direita		2,083	9,7				
	92		Esquerda		2,083	9,7				
	95		Direita		2,075	9,7			97,5	0,0
	100		Esquerda		2,075	9,8				
Junho/2013	105	Base	Esquerda	Modificada	2,083	9,3	80,3	0,0		
	110		Esquerda		2,090	9,3				
	115		Direita		2,080	9,7				
	120		Esquerda		2,043	11,0				
	125		Esquerda		2,085	9,2				
	130		Esquerda		2,085	9,9				

As camadas de regularização do subleito constituíram-se de um material granular de coloração amarelada com, siltoso e mais homogêneo, com pouca presença de pedregulho.

Tabela 5.20 – Dados de teor de betume, grau de compactação, granulometria, espessura da camada e parâmetros físicos como porcentagem de vazios (%Vv), relação betume vazios (%RBV) obtidos por ensaios de laboratório e de campo da PAA.

Parâmetros	Valor das Amostras					Valor de projeto	Referência DNIT
	A1 E103	A2 E108	A3 E115	Média	Desv. Padr.		
Espessura média (cm)	5,8	8,0	7,3	7,0	0,92	5,0	4,75 - 5,25
Grau Compactação (%)	89,3	87,3	88,5	88,3	0,82	97-101	97 - 101
Volume da amostra (cm ³)	42,5	58,8	53,5	51,6	6,79	-	-
Teor ligante (%)	8,2	7,8	6,4	7,5	0,77	5	4,7 - 5,3
Estabilidade (kgf)	752,5	581,9	872,0	726,5	119,04	-	≥ 500 kgf
Vv (%)	10,83	12,92	11,67	12,89	0,86	-	3 - 5
RBV (%)	59,51	53,81	51,54	54,95	3,35	-	75 - 82

5.2.2 Medidas de espessura das camadas com o GPR na PAA

Implantaram-se placas de aço, na interface das camadas da estrutura do pavimento da PAA, com a finalidade de auxiliar na estimativa das espessuras das camadas com o Método GPR, por tomarem-se os seus refletores como referência. Essas placas refletem as ondas eletromagnéticas propagadas a partir das antenas transmissoras do radar e esses refletores são detectados pelas antenas receptoras e visualizados com clareza nos perfis GPR como foi verificado para a PECV.

Com o uso do pavimento ao longo do tempo, as deformações impostas às suas camadas, deformam e alteram a profundidade das suas interfaces e, conseqüentemente, desses elementos metálicos. Espera-se que as placas de aço sirvam de referência para futuras campanhas com o GPR com o propósito de medir as espessuras das camadas desse pavimento.

As campanhas geofísicas foram desenvolvidas no pavimento da PAA logo após o espalhamento e a compactação dos materiais da camada de regularização do subleito. Os referenciais metálicos (placas de aço) para as campanhas com o GPR foram implantados entre as camadas de regularização do subleito e sub-base, entre as camadas de sub-base e base e, por fim após a imprimação da camada de base, na interface das camadas revestimento e base. Portanto, na interface das camadas de regularização do subleito/subleito não foram implantadas as placas de aço. Os perfis de GPR foram adquiridos logo após a conclusão da camada de revestimento.

Cinco Padrões de Reflexão foram observados durante o processamento e a interpretação dos dados de GPR (Figura 5.18).

O Padrão 1 está relacionado à camada de revestimento da estrutura do pavimento. Caracteriza-se por ser constituído de refletores planos e contínuos, de valor de amplitude elevada (refletores fortes).

O Padrão 2 está associado à camada de base e sub-base do pavimento e é a área onde se encontram refletores descontínuos e inclinados que indicam, em alguns trechos, as interfaces dessas camadas. Esses refletores estão relacionados, portanto, a interfaces geotécnicas e geológicas.

O Padrão 3 está associado ao material da camada de regularização do subleito. Esse padrão identifica áreas sem a presença de refletores fortes, características de um solo mais homogêneo, com baixa presença de pedras e pedregulhos.

A camada de subleito, material (filito alterado) com característica de baixa resistência mecânica e alta expansibilidade, bastante homogêneo, está associado ao Padrão 4. As suas características são de refletores fracos (baixa amplitude) e contínuos, que forma uma textura uniforme.

No Padrão 5, os refletores hiperbólicos que estão relacionados a ocorrências pontuais associadas a objetos enterrados em subsuperfície (vergalhões, pedregulhos e tubulações) e localizados ao longo de toda a extensão da pista em diferentes pontos do perfil e em diversas profundidades.

Essas características produzem perfis de GPR com menos evidência das interfaces das camadas pelos padrões semelhantes dos materiais e, conseqüentemente, de suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas, etc. Isso torna as suas constantes dielétricas com valores muito próximas, ou seja, o contraste entre elas é quase inexistente.

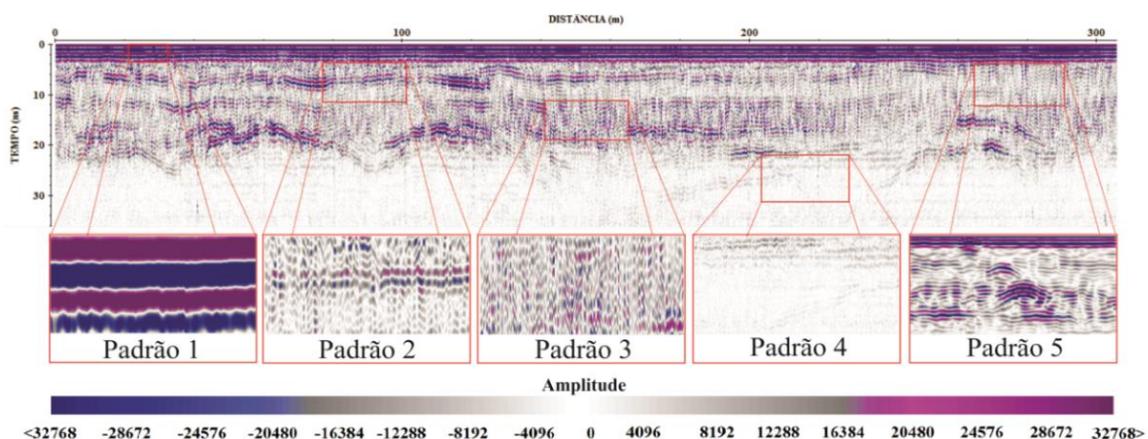


Figura 5.18 - Padrões de reflexão encontrados no pavimento da PAA.

A inserção de placas metálicas nas interfaces das camadas teve o propósito de chamar a atenção para o refletor horizontal presente na profundidade em que se encontravam refletores hiperbólicos associados a essas placas metálicas para indicarem a sua presença (Figura 5.19). Nessa figura, no primeiro perfil (Figura 5.19a) não se distingue a interface das camadas. A presença do refletor hiperbólico da Figura 5.19b na interface revestimento/base permite identificar um refletor horizontal associado a essa interface. Na Figura 5.19c a interface das camadas base/sub-base é identificada pela presença de um refletor hiperbólico que indica a presença de uma placa metálica instalada nessa interface. Na Figura 5.19d é possível identificar três refletores hiperbólicos. O refletor mais profundo foi associado a uma formação geológica, provavelmente um aglomerado de concreção laterítica, localizado nessa região.

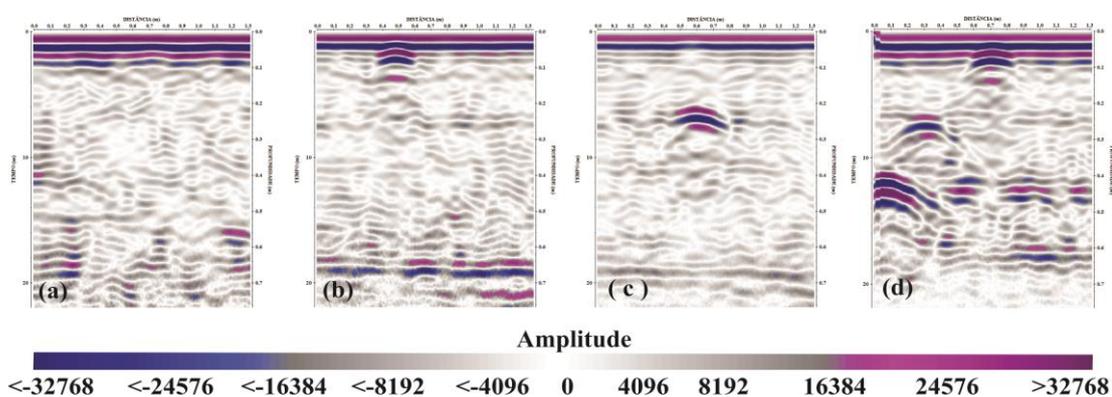


Figura 5.19 – Identificação das interfaces das camadas pela presença dos refletores hiperbólicos nos perfis associados às placas de aço implantadas no pavimento da PAA.

No pavimento da PAA foram adquiridos 15 perfis curtos de GPR (Figura 5.20), de aproximadamente 1,2m de comprimento, paralelos e distantes entre si de, aproximadamente 0,1m. Os perfis, portanto, dispostos lado-a-lado, foram adquiridos paralelamente e na direção transversal à pista, no sentido da borda esquerda para a direita da pista. Esses perfis, depois de processados, permitiram a elaboração de uma imagem tridimensional (quase-3D). Uma sequência de perfis quase-3D apresentados nessa figura, tem o propósito de realçar a importância da presença dos refletores hiperbólicos que indicam a presença das placas metálicas implantadas em interfaces de camadas constituídas de material granular. Sem a presença delas há um aumento significativo nos trabalhos de interpretação e pode haver erro na indicação de valores de espessuras das camadas da estrutura do pavimento.

Observar nessa figura, que uma placa de aço foi implantada na interface das camadas de revestimento e base e o refletor hiperbólico que indica a sua presença aparece nitidamente no 11º e no 12º perfis, contados da direita para a esquerda, ou seja, da borda para o centro da

pista. Nessa interface, todas as placas de aço foram fixadas distantes de 1,3 m da borda da camada de revestimento, o que coincide com o refletor mais forte no 12° perfil. A explicação do mesmo refletor aparecer no 11° perfil é dada pela extensão do feixe (Zona de Fresnel) de onda EM emitida pela antena do GPR. Essa antena possui uma largura de, aproximadamente 20 cm e, portanto, faz a varredura da placa de aço duas vezes, uma em cada perfil. Além disso, importa lembrar que as placas de aço têm 15 cm de comprimento e foram implantadas com a sua maior dimensão no sentido ortogonal ao percurso da antena de GPR.

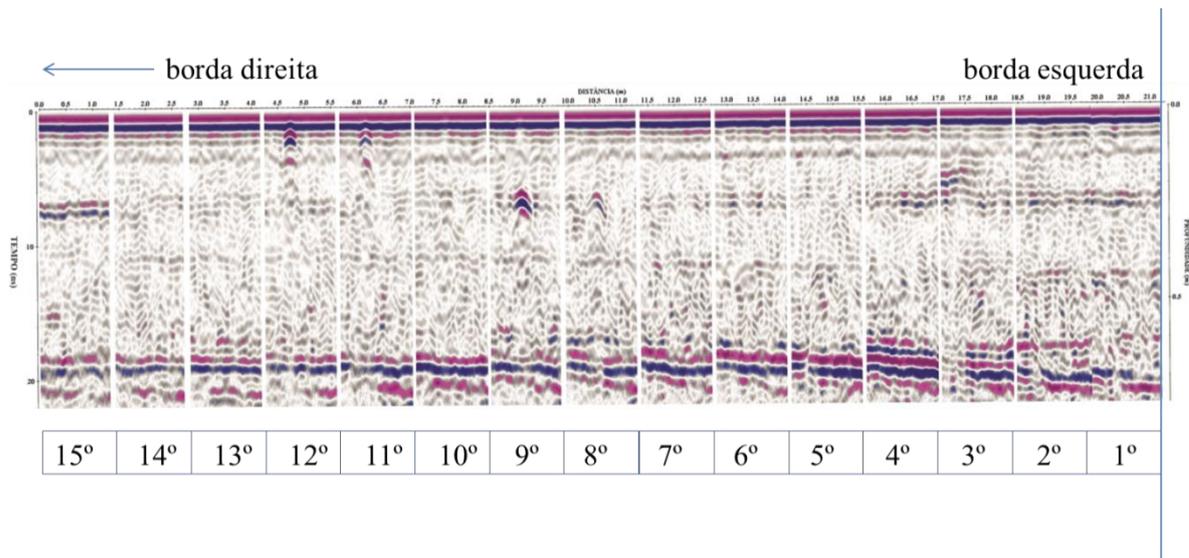


Figura 5.20 Perfis paralelos de 1,2m de comprimento e distantes entre si de 0,1m, na Estaca 103, adquiridos na PAA, no lado esquerdo da pista, do centro para a borda, no sentido Sucuri-Cuiabá.

Foram realizados furos de sondagem sobre o pavimento da PAA para obtenção dos valores das espessuras de revestimento e base. A Figura 5.21 destaca: em (a) o momento em que o furo de sondagem da estaca 103 está sendo realizado com a sonda rotativa para extração do núcleo da camada de revestimento (em *b*); nessa estaca foi possível medir a espessura da camada de base, pela localização de uma placa implantada na interface base/sub-base; essa placa foi encontrada na profundidade de 0,28 m da superfície (em *c / d*); o perfil de GPR adquirido na direção da estaca 105 (em *e*) destaca dois refletores hiperbólicos associados a placas de aço implantadas nas interfaces revestimento/base e base/sub-base. O terceiro refletor hiperbólico, pela sua extensão, sugere a presença de um bloco de concreção laterítica na camada de regularização de subleito. Nesse perfil são destacados, também, perfis horizontais de camadas de solo da estrutura do pavimento.

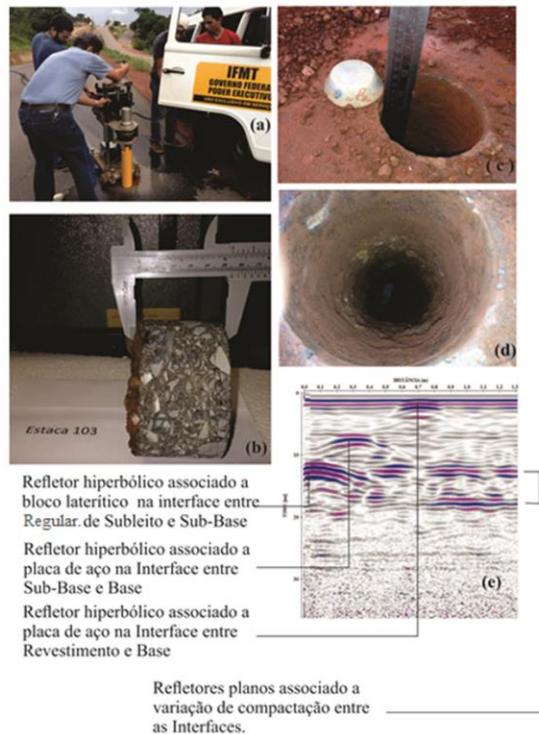


Figura 5.21 – Imagens da extração do núcleo de revestimento na estaca 103 e perfil de GPR da estaca 105 com destaque para os refletores hiperbólicos e planos.

Totalizaram-se três furos de sondagem, respectivamente nas estacas 103, 108 e 115. Os três furos permitiram obter os valores medidos de espessura da camada de revestimento do pavimento da PAA (Tabela 5.21). A espessura da camada de base só foi possível de ser medido na estaca 103, local onde foi encontrada uma placa de aço implantada.

Utilizaram-se os perfis de GPR localizados nas mesmas áreas onde ocorreram os furos de sondagem, e obtiveram-se os valores de tempo (ns) duplo de propagação da onda EM até as interfaces entre as camadas de revestimento /base e base/sub-base. A Figura 5.22 ilustra os perfis de GPR nessas duas interfaces, respectivamente, apontando (x, na cor vermelha) o local do pick sobre o refletor hiperbólico com maior amplitude máxima do sinal eletromagnético.

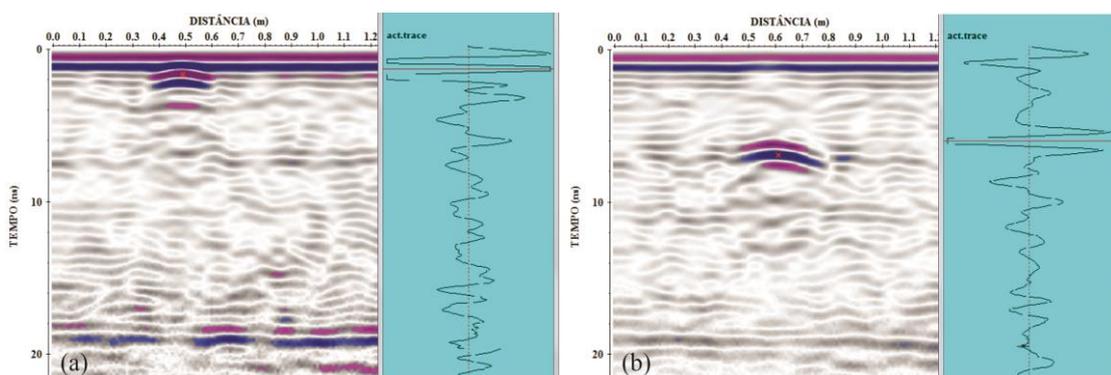


Figura 5.22 – Perfis curtos de GPR adquiridos na direção da estaca 108 (a) Pick sobre a hipérbole da interface revestimento/. (b) Pick sobre a hipérbole da interface base/sub-base.

Com os valores de espessura (m) das camadas de revestimento e base, e do tempo duplo de propagação da onda EM (ns) nessas camadas encontradas pela sondagem direta, permitiu-se calcular (Equação 5.1) os valores de velocidade do sinal eletromagnético dos perfis de GPR nas camadas de revestimento (0,055 m/ns) e de base (0,065 m/ns), respectivamente. Os dados estão na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Valores comparativos de espessuras entre os medidos nos furos e os calculados nos perfis de GPR. Valores de tempo e velocidade calculados.

Estaca	File	H _r - medido (m)	Tempo (ns)	Velocidade (m/ns)	H _r - calculado (m)	Diferença [H _{r(m)} - H _{r(c)}]	Erro (%)
103	172	0,0571	2,38	0,048	0,0573	-0,0002	-0,32
105	232	0,0715	2,61	0,055	0,0718	-0,0003	-0,42
108	310	0,0781	2,53	0,062	0,0731	0,0050	6,40
Média				0,055			

Estaca	File	H _b - medido (m)	tempo (ns)	velocidade (m/ns)	H _b - calculado (m)	Diferença [H _{b(m)} - H _{b(c)}]	Erro (%)
105	232	0,235	5,179	0,065	0,24	0,005	2,13

Nas interfaces das camadas de sub-base/regularização do subleito e de regularização do subleito/subleito, não foram encontradas as placas de aço usadas como referência para a conversão tempo/profundidade no método GPR e, conseqüente obtenção das velocidades de propagação da onda EM nessas camadas.

Portanto, o valor estabelecido para a velocidade da onda EM para a camada de sub-base de 0,060 m/ns é uma média das velocidades da onda EM das camadas de revestimento e de base. Para a camada de regularização do subleito, atribuiu-se a velocidade de 0,063 m/ns. Os valores de tempo (ns) e espessura (m) das camadas do pavimento da PAA sem o auxílio de sondagem direta estão discriminados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Valores de espessura e tempo para os perfis de GPR nas interfaces regularização do subleito e subleito da avenida Antártica, estimativa indireta.

SubBase	Estaca	File	H _r - medido (m)	Tempo (ns)	Velocidade (m/ns)
	105	232	0,186	6.186	0,060

Regularização do Subleito	Estaca	File	H _r - medido (m)	Tempo (ns)	Velocidade (m/ns)
	105	232	0,196	6.317	0,063

O processo de picagem das interfaces das camadas foi aplicado a um perfil de GPR de aproximadamente 320 metros de comprimento, que compreendeu o espaço entre as estacas 98 e 114. Os dados desse perfil foram adquiridos próximo da borda esquerda do pavimento da PAA, a 1,2 m de distância. A figura 5.23 apresenta o referido perfil em três situações:

imediatamente após o processamento básico (static-correction; filtro; ganho e time-cut); com as interfaces em destaque pelo processo de picagem; após um tratamento no software ReflexW para a criação do modelo das camadas.

Após o processo de picagem no software Reflex W, conseguiu-se produzir um arquivo com os dados de cada traço que compõem as interfaces das camadas. Esse arquivo, então, foi aberto numa planilha de cálculo e permitiu calcular os valores associados às interfaces (espessuras médias; maior e menor valor de espessura; desvio padrão; coeficiente de variação, dentre outros). Esses valores encontram-se na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 – Dados da estrutura do pavimento da PAA.

	Hr	Hb	Hsb
Média (m)	0,052	0,212	0,339
DesvPadr (m)	0,004	0,012	0,013
Coef Var (%)	6,881	5,819	3,955
Variância	1,26E-05	1,52E-04	1,79E-04
Máximo V1 (m)	0,066	0,469	0,486
Mínimo V1 (m)	0,029	0,149	0,260

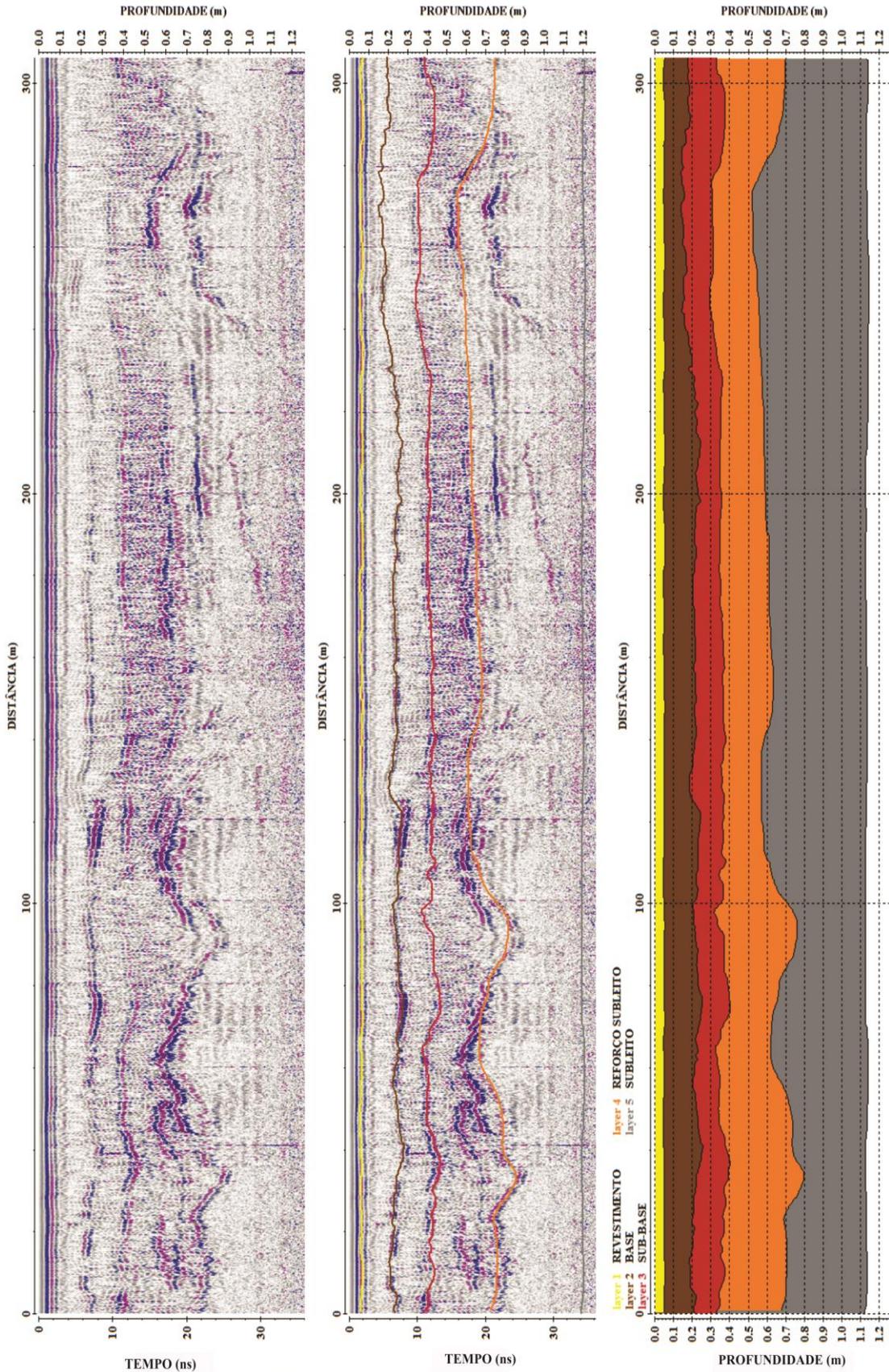


Figura 5.23 – Perfil de GPR adquirido na direção longitudinal do pavimento da PAA, entre as estaças 98 e 115, com 320 m de comprimento.

A figura 5.24 apresenta o resultado de um processamento quase-3D elaborado a partir de 80 perfis paralelos adquiridos na direção transversal do pavimento da PAA na estaca 108

(croqui da aquisição desses dados ilustrado na Figura 4.36, do Capítulo 4). Nessa figura 5.24 (a) destacam-se duas placas de aço localizadas na interface das camadas revestimento/base, a 7,6 cm de profundidade; em (b), destaca-se o refletor que está associado à placa de aço instalada na interface base/sub-base, localizada a 21,5 cm de profundidade; em (c) destacam-se duas placas de aço instaladas na interface sub-base/regularização do subleito, a 35,2 cm de profundidade.

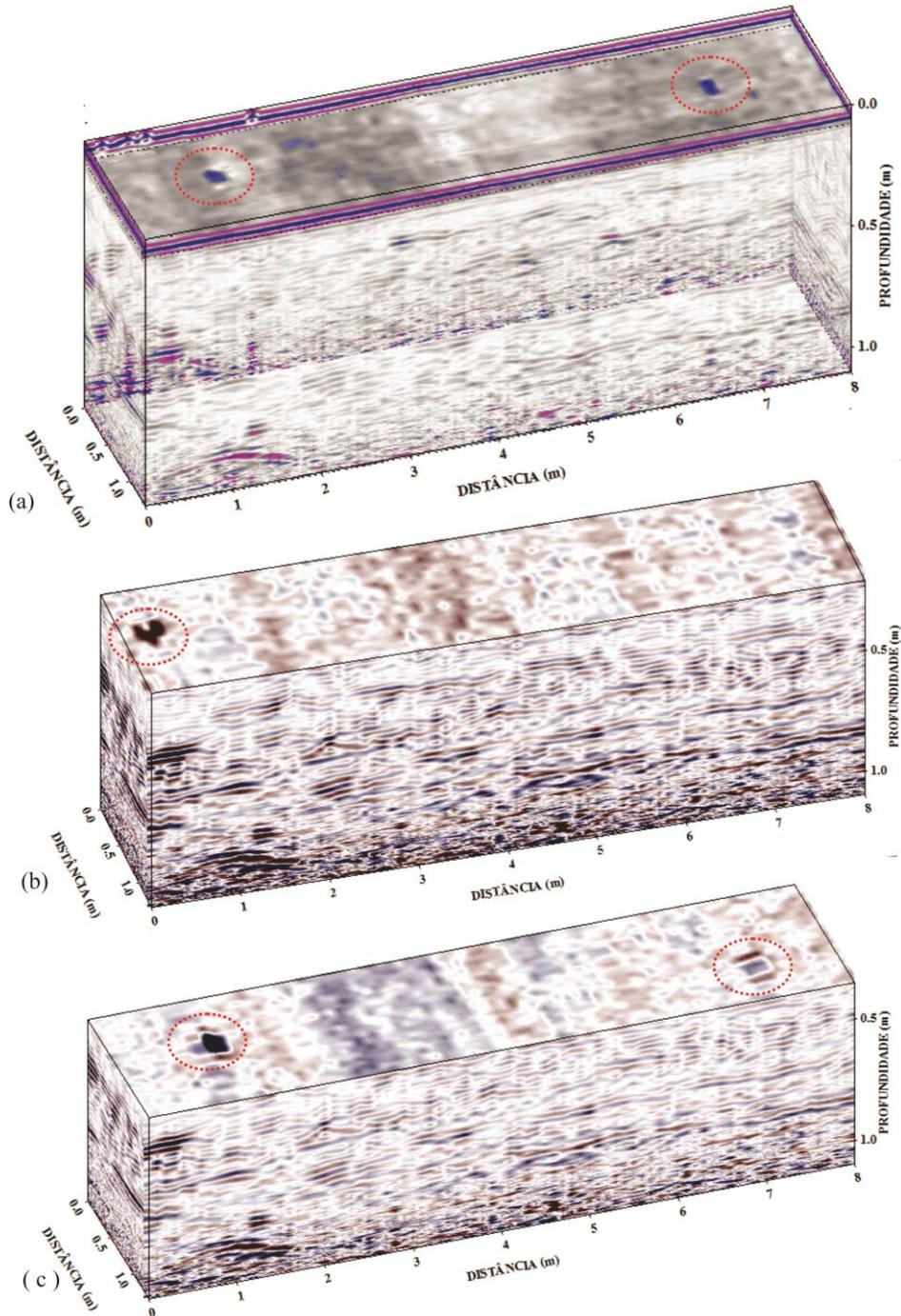


Figura 5.24 – Processamento Quase-3D dados de perfis GPR adquiridos na direção transversal do pavimento da PAA no local da Estaca 108.

Na direção da estaca 108 do pavimento da PAA foram adquiridos dados de GPR que permitiram construir um perfil ilustrado à esquerda da Figura 5.25. Após o processamento básico e o procedimento de picagem, foi possível traçar as linhas de interface das camadas (perfil do centro) e um modelo onde se distingue essas camadas.

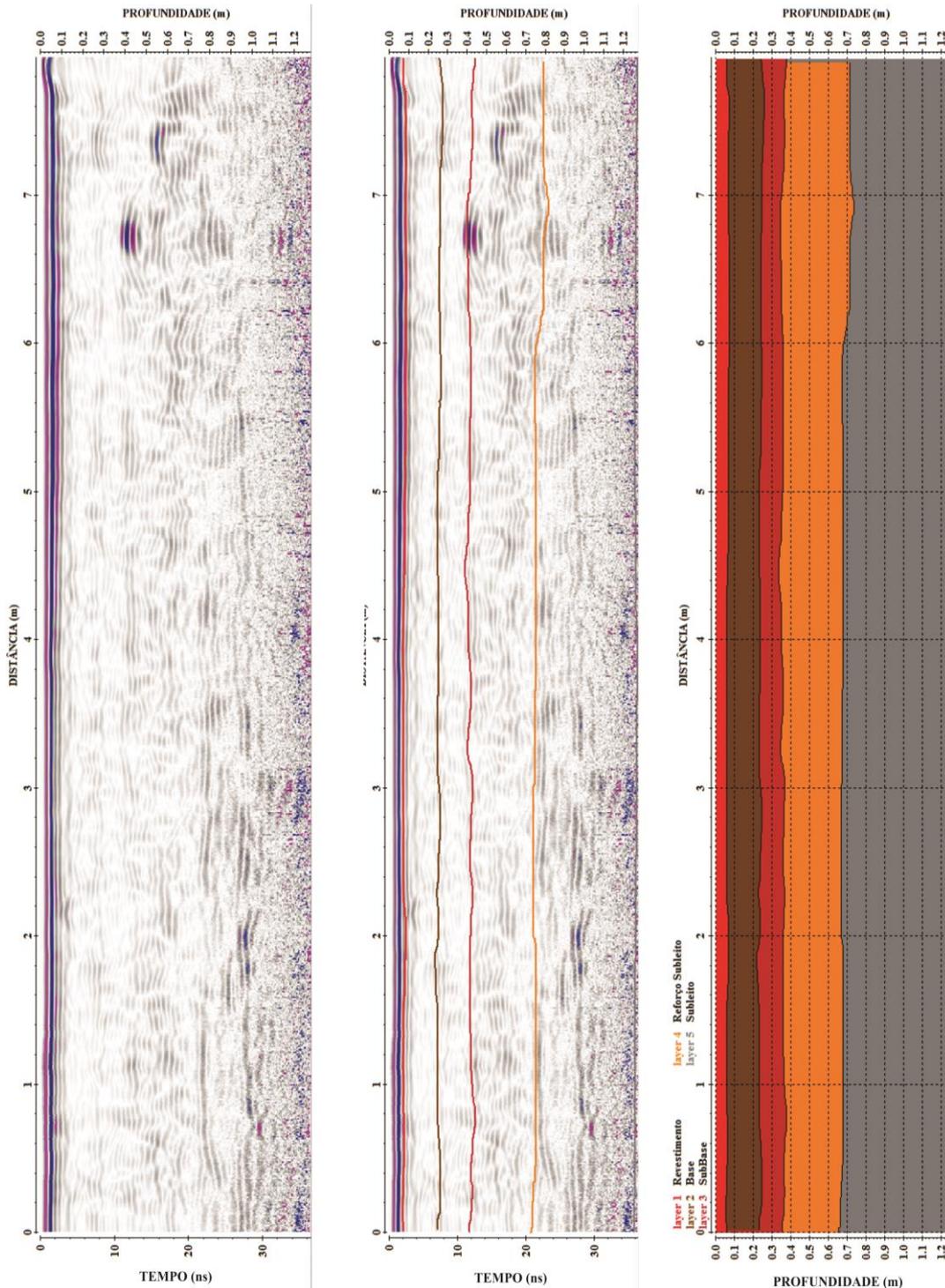


Figura 5.25 – Perfil de GPR adquirido na direção transversal do pavimento da PAA na direção da estaca 108.

Na Figura 5.26 o mesmo perfil, após os processamentos descritos acima, tiveram os dados migrados para uma planilha de cálculo e, no programa SURFER pode-se criar figuras

com espectro de cores indicando regiões da faixa do pavimento com mesmos valores de espessuras (iso-espessuras).

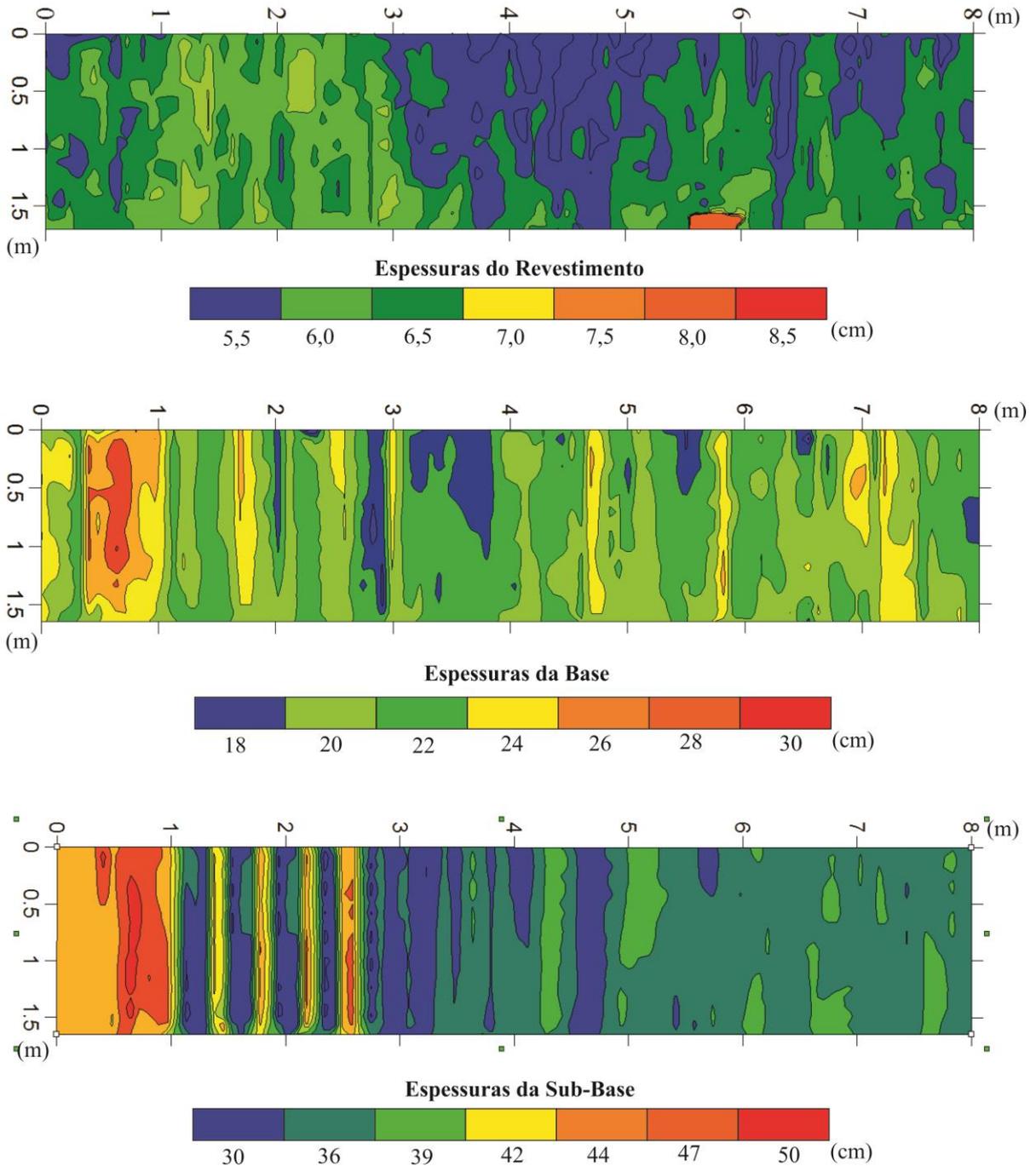


Figura 5.26 – Processamento dos dados do perfil de GPR adquiridos na direção transversal do pavimento da PAA no local da Estaca 108 no programa SURFER que gerou imagens de iso-espessuras das camadas.

Na camada de revestimento (Figura 5.26a), verifica-se o predomínio de espessuras com valores variando entre 5,5 cm e 6,5 cm.

Na camada de base (Figura 5.26b) predominam espessuras no intervalo de 20 e 22 cm, com manchas de isso-espessuras de 18 e 24 cm. Uma área com aumento no valor da espessura dessa camada aparece próximo da margem direita da pista, com valores superiores a 24 cm e que chega a 30 cm. Pequenas áreas aparecem no centro da pista, com espessuras reduzidas, abaixo de 18 cm.

Na camada de sub-base (Figura 5.26c) predominam espessuras com valores entre 30 e 39 m. Uma região próxima da borda direita da pista aponta valores de espessura acima de 42 cm.

5.2.3 Ensaio com Viga Benkelman na PAA

O ensaio realizado na pista da Avenida Antártica, Cuiabá/MT em março de 2014, forneceu os dados para os dois sentidos de aquisição de dados, Sentido 1 (margem direita) e Sentido 2 (margem esquerda), respectivamente. Os dados foram adquiridos na sequência de execução do ensaio, nas estacas pares, com início na estaca 98 e término na estaca 132 (Sentido 1), no sentido Cuiabá-Sucurí. Os dados foram adquiridos, também, na sequência de execução do ensaio, nas estacas ímpares, com início na estaca 131 e término na estaca 99 (Sentido 2), no sentido Cuiabá-Sucurí (Figura 5.27).

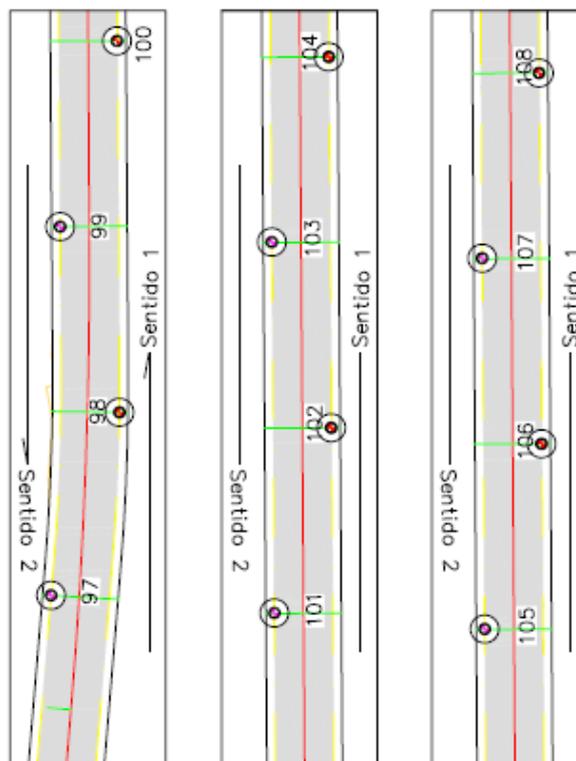


Figura 5.27 – Ilustração com a localização dos pontos de aquisição de dados com viga Benkelman, destacando os Sentidos 1 e 2 para realização dos ensaios.

Os dados obtidos com o ensaio com viga Benkelman possibilitaram a construção das curvas de deflexão que representam as bacias de deflexão nos pontos onde foram realizados a partir dos resultados com os valores das médias dos dados processados para os dois sentidos de aquisição (Tabela 5.24).

Foram elaboradas duas curvas dos valores médios das leituras feitas com a viga Benkelman, ilustrando as bacias de deflexão construídas com os dados levantados nos dois sentidos: Sentido 1 e Sentido 2 (Figura 5.28). Observar que a curva de deflexões obtida para o Sentido 1 (margem direita da pista) apresenta valores acentuados de deslocamento vertical, que chegam próximo de 90.10^{-2} mm, que pode estar associado ao fato de que o sistema de drenagem não foi executado, havendo infiltração de água ao longo da borda da pista.

Tabela 5.24 – Média das deflexões obtidas nos dois sentidos de aquisição de dados, S1 e S2, representando a bacia de deflexão média da PAA.

Estaca	Faixa Lado	Deflexões Médias ($\times 10^{-2}$ mm)								
		L E I T U R A S (cm)								
		L 0	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	Lf
			12,5	25	50	75	100	125	150	300
Média s1	D/D	95,3	66,5	39,3	19,6	9,1	3,7	1,0	0,0	64,2
Média s2	E/E	53,2	31,8	20,1	11,1	6,5	2,5	0,6	0,0	134,3
Média		74,3	49,2	29,7	15,4	7,8	3,1	0,8	0,0	99,2

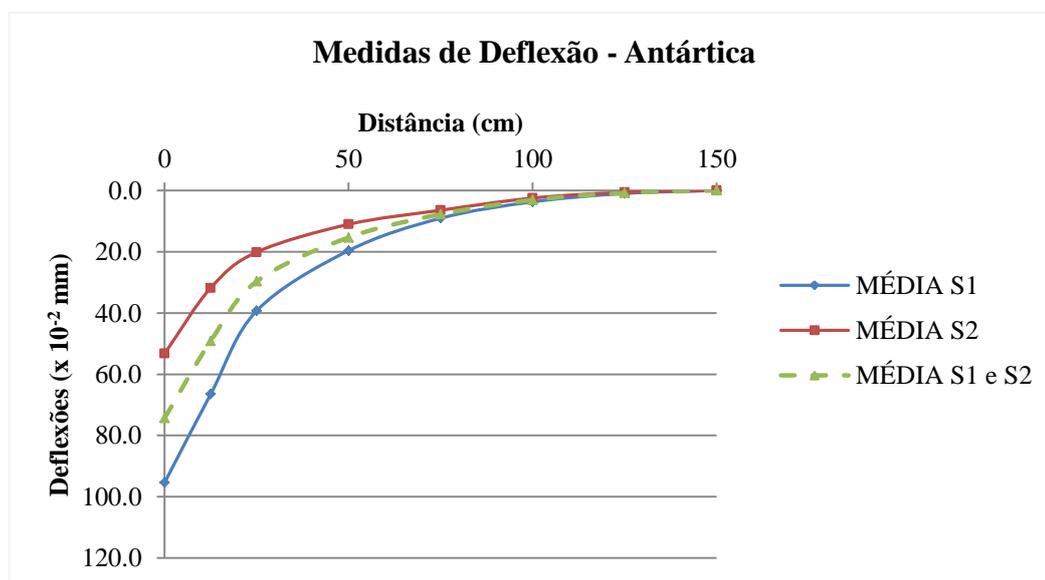


Figura 5.28 – Gráfico das curvas de deflexão médias obtidas a partir dos dados adquiridos nos Sentidos 1 e 2 e curva da deflexão média dos dados obtidos nos dois sentidos, S1 e S2 da PAA.

Essas duas curvas permitiram a construção de uma terceira, com a média dos resultados apresentados para os dois sentidos de aquisição. Essas bacias de deflexão foram elaboradas após os dados terem sido submetidos ao procedimento PRO 011 (DNER, 1979)

para a determinação de parâmetros estatísticos como a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de aceitação dos valores.

5.2.4 Retroanálise do Pavimento da PAA

O processamento dos dados, assim como para a PECV também foi realizado no programa KENPAVE, KENLAYER para pavimentos flexíveis. Os dados inseridos no programa KENLAYER (Tabela 5.25) associados à estrutura do pavimento resultaram em dados que permitiram elaborar a bacia de deflexões calculada. Para cada curva da bacia de deflexões calculada procurou-se obter o melhor ajuste com a bacia medida com o ensaio com a viga Benkelman. Os valores médios obtidos para as espessuras das camadas da estrutura do pavimento após o processamento dos perfis GPR foram, respectivamente: 5,16 cm para a camada de revestimento; 21,19 cm para a camada de base; 33,85 cm para a camada de sub-base; 61,71 cm para a camada de regularização do subleito. Outros dados foram fornecidos para o programa KENLAYER (Tabela 5.25) para realizar o processamento que forneceu os resultados que permitiram a elaboração das curvas que representam as bacias deflectométricas ajustadas do PAA.

Tabela 5.25 - Valores fornecidos para o programa KENLAYER para o processamento da retroanálise do pavimento de Campo Verde.
Programa kenlayer (huang, 2004)

Dados de entrada (solicitados)	Sigla	Dados de entrada (fornecidos)	Referência
Tipo de Material	MATL	linear elástico	
Número de Períodos por ano	NPY	1	
Número de Grupos de Carga	NLG	1	combinações para eixo/rodas
Tolerância para Integração Numérica	DEL	0,01	padrão
Número de Camadas	NL	4	
Número de Coordenadas Z para análise	NZ	1	superfície do revestimento
Ciclos Máximos de Integração Numérica	ICL	80	padrão
Tipo de Respostas	NSTD	1	deflexões verticais
Todas as Camadas são Solidárias	NBON D	1	Sim
Nº de Camadas Tensão Tração na Base	NLBT	1	base do revestimento
Nº de Camadas Tensão Compressão no Topo	NLTC	1	topo do subleito
Sistema de Unidades	NUNIT	1	Sistema Internacional
Valor da Coordenada Z para análise	ZC	0	superfície do revestimento
Espessura da camada 1	TH	5,16	Espes. do revestimento (cm)
Espessura da camada 2	TH	21,2	Espessura da base (cm)
Espessura da camada 3	TH	33,85	Espessura da sub-base (cm)
Módulo de Poisson para o Revestimento	PR	0,3	(kN/m ³)
Módulo de Poisson para a base	PR	0,3	(kN/m ³)

Tabela 5.25 - Valores fornecidos para o programa KENLAYER para o processamento da retroanálise do pavimento de Campo Verde – Continuação.

Módulo de Poisson para a sub-base	PR	0,3	(kN/m ³)
Módulo de Poisson para o subleito	PR	0,3	(kN/m ³)
Módulo de Resiliência para a Camada 1	E	2.500.000	(kPa)
Módulo de Resiliência para a Camada 2	E	500.000	(kPa)
Módulo de Resiliência para a Camada 3	E	300.000	(kPa)
Módulo de Resiliência para a Camada 5	E	40.000	(kPa)
O tipo de carga ou carregamento	LOAD	1	eixo simples/roda dupla
Raio de Contato da Área Circular Carregada	CR	10	(cm)
Pressão de Contato sobre a Área Circular Carregada	CP	560	(kPa)
Espaço Centro-a-centro entre duas rodas duplas na direção Y	YW	30	(cm)
Espaço Centro-a-centro entre dois Eixos na Direção X	XW	0	(cm)
Nº de Coordenadas Radiais p/ serem Analisadas sob Roda Simples	NR	7	D0 a D150 da Viga Benkelman
Coordenadas X e Y de Pontos de Respostas p/ o Grupo de Carga	XPT,Y PT	0-15; 12,5-15; 25-15 ;50-15; 75-15; 100-15; 125-15; 150-15	

Não se obteve um ajuste satisfatório para as bacias de deflexão calculada e medida (Tabela 5.27). A bacia calculada se manteve com inclinação pouco acentuada, com os valores de deflexão das camadas entre D0 ($39 \cdot 10^{-2}$ mm) e D150 ($44 \cdot 10^{-2}$ mm) para a bacia calculada, que divergiram de apenas 12,2%. O melhor ajuste, apresentado na Figura 5.34, forneceu os valores de MR que foram usados no cálculo das deformações e do número de passadas permitidas para as camadas de revestimento e subleito desse pavimento e para a análise probabilística. Os valores dos módulos referidos que melhor ajustaram as bacias deflectométricas medida e calculada foram: 2500 MPa para a camada de revestimento; 500 MPa para a camada de base constituída de solo laterítico; 300 MPa para a camada de sub-base, constituída de solo laterítico; e 40 MPa para a camada de subleito.

Tabela 5.26 - Valores encontrados para as bacias de deflexão medida e calculada e para as diferenças verificadas para o ajuste das referidas bacias para a PAA.

		Bacia medida (x 10⁻² mm)							
		0,0	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Média S1/S2	D0	73,09	46,57	28,92	16,35	8,17	2,08	0,40	0,00
			Bacia calculada (x 10⁻² mm)						
		45,4	41,43	36,38	30,06	25,62	22,06	19,12	16,69

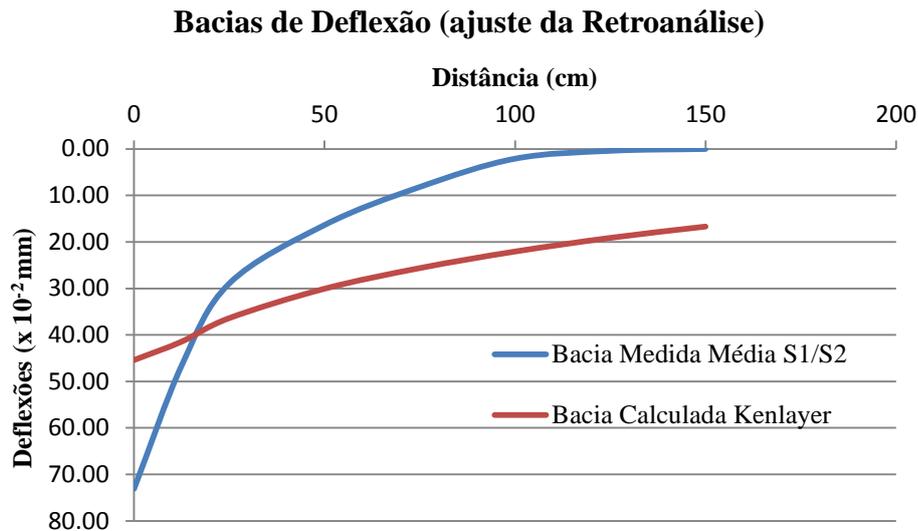


Figura 5.29 – Bacias deflectométricas medida e calculada para o PAA.

5.1.4 Análise de Danos do Pavimento da PAA

Com a inserção dos valores de módulos de resiliência determinados na retroanálise do PAA e de espessuras das camadas da estrutura do pavimento obtidas com o GPR no programa KENLAYER, e agora optando pela análise de danos, foi possível obter resultados dos valores das deformações de tração atuante na base da camada de revestimento e de compressão atuante no topo da camada de subleito. O valor médio para a deformação de tração na base do revestimento foi de $-9,0 \cdot 10^{-5}$ e de $2,9 \cdot 10^{-4}$ para a deformação de compressão no topo do subleito, respectivamente.

O valor do número médio de repetições permitidas para a carga foi de $3,6 \times 10^7$ para a camada de revestimento, em que o valor do Módulo da camada de revestimento utilizado na Equação (3.41) foi de $3,6 \cdot 10^5$ psi. Os valores dos coeficientes de dano informados para o programa KENLAYER foram os sugeridos pelo Asphalt Institute (Tabela 5.28).

Tabela 5.27 - Dados complementares fornecidos para o programa KENLAYER para o processamento da análise de danos do pavimento de Campo Verde.

Programa Kenlayer (Huang, 2004)			
Dados de entrada (Solicitados)	Sigla	Dados de entrada (fornecidos)	Referência
Nº da Camada para Análise de Dano da Tensão de Base	LNBT	1	Camada de Revestimento
Coefficiente de Fadiga, f_1	FT1	0,0796	Asphalt Institute
Coefficiente de Fadiga, f_2	FT2	3,291	Asphalt Institute
Coefficiente de Fadiga, f_3	FT3	0,854	Asphalt Institute
Nº da Camada para Análise de Dano da Tensão de Topo	LNTC	3	Camada de Subleito
Coefficiente de Deformação Permanente, f_4	FT4	$1,365 \cdot 10^{-9}$	Asphalt Institute
Coefficiente de Deformação Permanente, f_5	FT5	4,477	Asphalt Institute
Nº Total de Repetição de Cargas para cada Grupo de Carga, durante cada Período	TNLR	1	Volume de Tráfego

O valor do número de passadas de projeto para esse pavimento foi estimado com base no Manual de Pavimentação do DNIT, que atribui o valor de $N_p=3,0 \times 10^5$ para um pavimento de 0,60 m de espessura média total e subleito com CBR=4%. Considerando a correlação de MR igual a 10,4 vezes o valor do CBR, sugerido por Heukelom e Klomp (1962), apud Medina e Motta (2005), foi adotado esse valor de N_p para o pavimento da PAA, visto que o módulo de resiliência da camada de subleito encontrado na retroanálise de 40 MPa é compatível com o valor de CBR. Portanto, a análise de danos (Equação 5.14) para a camada de revestimento, cujo valor limite foi $N_f=3,6 \times 10^7$, resultaria num consumo de fadiga de:

$$\left(\frac{N_p}{N_f}\right)_{\text{revest.}} = 0,0085 < 1 \quad (5.14)$$

Ou seja, a camada de revestimento resistiria ao tráfego projetado para os 10 anos previstos no projeto.

Considerando o mesmo valor de $N_p=3,0 \times 10^5$, calculado para o pavimento com base no método do CBR, o consumo de dano para a camada de subleito, cujo valor crítico foi de $N_f=9,67 \times 10^6$ seria:

$$\left(\frac{N_p}{N_f}\right)_{\text{subleito}} = 0,031 < 1 \quad (5.15)$$

Ou seja, a camada de subleito também não romperia rapidamente por acúmulo de deformações permanentes.

5.1.5 Análise Probabilística do Pavimento da PAA

O Método FOSM foi aplicado para a realização da análise probabilística do pavimento da PAA para as deformações de tração na base do revestimento asfáltico e de compressão no topo do subleito, numa primeira etapa e, em seguida, foi aplicada ao número de passadas que poderá levar à fadiga o revestimento e o subleito, respectivamente, tendo como variáveis aleatórias as espessuras das camadas da estrutura do pavimento e os seus respectivos módulos de resiliência retroanalisados, além das variâncias assumidas ou calculadas.

Os valores médios das espessuras das camadas de revestimento e base da estrutura do pavimento da PAA e os seus respectivos módulos de resiliência são mostrados na Tabela 5.29, onde além desses dados, constam os seus respectivos valores de coeficiente de variação,

desvio padrão e variância, necessários para a análise probabilística desse pavimento pelo Método FOSM.

Tabela 5.28 - Dados necessários para a análise probabilística do pavimento da Avenida Antártica – aplicação do Método F.O.S.M.

Parâmetros	Média	Coef. Vari.	Desv.Padr.	Variância
		CoV (%)	S[X _i](kPa)	V[X _i]
Hr (cm)	5,16E+00	0,07	3,55E-03	1,26E-05
Hb (cm)	2,12E+01	0,06	1,23E-02	1,52E-04
Hsb (cm)	3,01E+01	0,04	1,34E-02	1,79E-04
Mr (kPa)	2,50E+06	15,78	3,95E+05	1,56E+11
Mb (kPa)	5,00E+05	19,6	9,80E+04	9,60E+09
Msb (kPa)	3,00E+05	15,78	4,73E+04	2,24E+09
Msl (kPa)	4,00E+04	20,0	8,00E+03	6,40E+07

Na Tabela 5.30 apresentam-se os valores das derivadas parciais das variáveis usadas na análise probabilística desse pavimento. Os valores apresentados na Tabela 5.48 resumem os dados destinados a determinar o valor da variância da deformação de tração na base da camada de revestimento da estrutura do pavimento da PAA. Na primeira coluna, estão as derivadas parciais das deformações para o incremento em avanço, de +10%, destinados às variáveis aleatórias correspondentes. Na segunda coluna, são apresentados os valores correspondentes ao incremento centrado de $\pm 10\%$. Na terceira coluna, os valores, para o incremento em atraso, de -10%. Na Figura 5.22 ilustra-se a influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância dessas deformações para os incrementos de $\pm 10\%$ (centrado).

Tabela 5.29 – Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento.

Variáveis	$(\partial \epsilon / \partial x_i)^+$	$(\partial \epsilon / \partial x_i) \pm$	$(\partial \epsilon / \partial x_i)^-$
Hr	-2,17E-05	-3,01E-05	-3,86E-05
Hb	-7,55E-08	-1,42E-08	4,72E-08
Hsb	-3,19E-07	-3,29E-07	-3,39E-07
Mr	-1,59E-11	-1,77E-11	-1,96E-11
Mb	2,59E-10	2,83E-10	3,07E-10
Msb	-2,67E-12	-2,83E-12	-3,00E-12
Msl	-2,57E-10	-2,73E-10	-2,88E-10

Tabela 5.30- Dados da análise probabilística do pavimento da PAA, para o parâmetro deformação de tração na base da camada de revestimento.

Influência	v[Def]+	v[Def]±	v[Def]-
Hr	5,94E-15	1,15E-14	1,88E-14
Hb	8,91E-16	8,13E-19	1,00E-15
Hsb	6,61E-16	8,11E-18	4,01E-16
Mr	1,85E-10	3,78E-11	1,76E-12
Mb	2,30E-10	7,64E-10	1,61E-09
Msb	6,79E-11	1,22E-14	6,43E-11
Msl	1,28E-10	1,10E-12	8,46E-11
Total	6,11E-10	8,03E-10	1,76E-09

O valor da variância calculado pelo Método FOSM para a deformação de tração na base do revestimento com incremento centrado de $\pm 10\%$ foi de $\varepsilon_r = 8,03 \times 10^{-10}$. Na Figura 5.30 fica evidente a predominância da influência do Módulo de Resiliência da camada de base (93,49%) da estrutura desse pavimento na determinação das deformações de tração na base do revestimento, seguida pelo valor do Módulo de Resiliência da camada do revestimento (apenas 5,93%). A explicação novamente é a menor ordem de grandeza da variância adotada para estas variáveis independentes em relação às demais.

Deformação de Tração na base da Camada de Revestimento

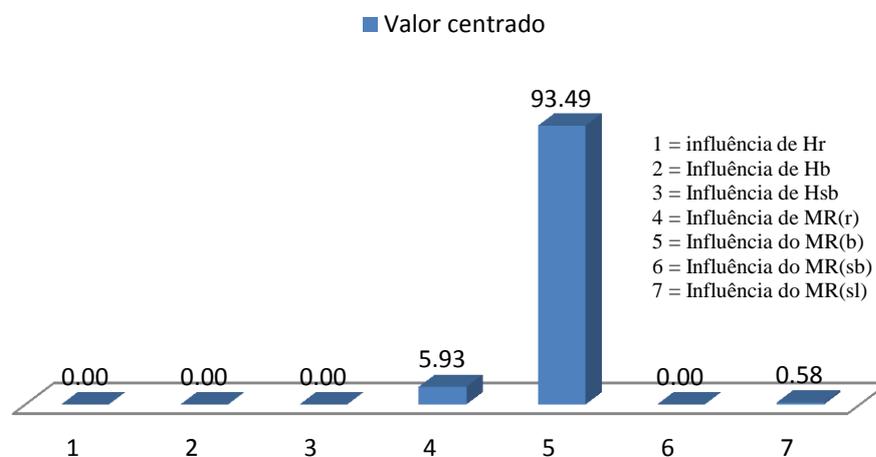


Figura 5.30 – Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância da deformação de tração na base da camada de revestimento do pavimento da Avenida Antártica, com incremento centrado de $\pm 10\%$, pelo Método FOSM.

Em seguida, as derivadas parciais calculadas para determinação da variância da deformação de compressão no topo da camada de subleito da estrutura do pavimento da PAA são apresentadas na Tabela 5.32. Da mesma forma, os valores apresentados correspondem, respectivamente, às derivadas das deformações no subleito consideradas os incrementos em avanço, em atraso e centrado de 10% e os valores das influências de cada parâmetro constituinte da estrutura do pavimento para a determinação da deformação de compressão no topo do subleito. Os valores das contribuições absolutas de cada variável independente para a variância total da deformação no topo do subleito se encontram na Tabela 5.33.

Tabela 5.31 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro deformação de compressão no topo da camada de subleito.

Variáveis	$(\partial\varepsilon/\partial x_i)_+$	$(\partial\varepsilon/\partial x_i)_\pm$	$(\partial\varepsilon/\partial x_i)_-$
Hr	-1,34E-05	-1,54E-05	-1,74E-05
Hb	-1,00E-05	-1,03E-05	-1,06E-05
Hsb	7,31E-07	7,64E-07	7,97E-07
Mr	-5,60E-12	-6,00E-12	-6,40E-12
Mb	-1,04E-10	-1,06E-10	-1,08E-10
Msb	-7,03E-10	-7,62E-10	-8,20E-10
Msl	1,75E-10	1,62E-10	1,50E-10

Tabela 5.32 – Dados da análise probabilística do pavimento da PAA para a deformação de compressão no topo da camada do subleito.

Influência	$v[\text{Def}]_+$	$v[\text{Def}]_\pm$	$v[\text{Def}]_-$
Hr	2,25E-15	2,99E-15	3,84E-15
Hb	7,82E-15	1,65E-14	2,83E-14
Hsb	1,20E-15	5,07E-17	4,19E-16
Mr	5,74E-11	5,98E-12	1,55E-10
Mb	2,46E-12	1,20E-10	5,53E-10
Msb	5,91E-10	1,38E-09	2,49E-09
Msl	1,69E-10	1,60E-13	1,49E-10
Total	8,19E-10	1,50E-09	3,34E-09

Na Figura 5.31 ilustra-se a influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância dessas deformações para os incrementos de $\pm 10\%$ centrado. O valor da variância calculado pelo Método FOSM para a deformação de compressão no topo da camada do subleito com incremento centrado de $\pm 10\%$ foi de $\varepsilon_{sl} = 1,50 \times 10^{-9}$. Na Figura 5.36 fica evidente a predominância da influência do Módulo de Resiliência da camada de sub-base (91,86%) da estrutura desse pavimento na determinação das deformações de compressão no topo da camada do subleito, seguida pelo MR da camada de base (7,62%). Pela análise desse gráfico, as espessuras das camadas não têm influência significativa para a deformação de compressão do topo do subleito. A razão novamente é a baixa variância das espessuras em relação aos módulos supracitados.

Deformação de Compressão no topo da Camada de Subleito

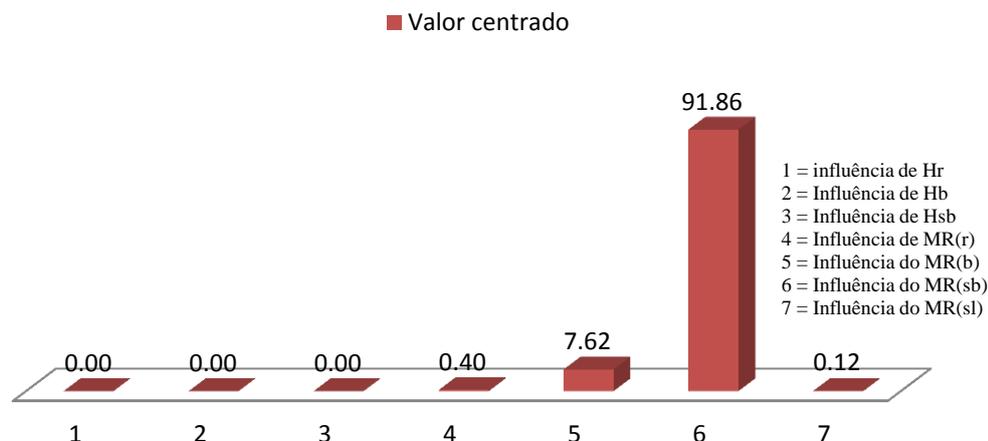


Figura 5.31 – Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância da deformação de compressão no topo da camada de subleito do pavimento da Avenida Antártica, com incremento centrado de $\pm 10\%$, pelo Método FOSM.

O que se observou na análise da variância da deformação das camadas de revestimento e subleito do pavimento da PAA foi que os módulos de resiliência das camadas foram mais influentes do que propriamente as espessuras das camadas. Para a camada de revestimento, a deformação de tração sofre maior influência do módulo da camada de base (93,49%), enquanto que, para o subleito, a deformação de compressão sofre maior influência do módulo da sub-base (91,86%). As camadas que vem acima destas, respectivamente, contribuem com a sua influência em segundo plano. No pavimento da PECV o comportamento foi bastante semelhante: prevaleceram as influências dos módulos das camadas mais inferiores (base, com 92,29%; e subleito, com 77,53%) sobre as deformações de tração na base do revestimento e de compressão no topo do subleito, respectivamente. Nesse pavimento (PECV), também foram influentes no cálculo da variância das deformações, porém em segundo plano, os módulos do subleito (4,65%), para o revestimento, e da base (21,57%), para o subleito. Em nenhum dos dois pavimentos foi significativa a influência das espessuras das camadas da estrutura dos pavimentos.

Para o cálculo da variância do número de passadas permitidas para a camada de revestimento do pavimento em estudo, o Método FOSM foi aplicado para determinar a influência das variáveis aleatórias correspondente aos incrementos em avanço, em atraso e centrado de 10%. As derivadas parciais são mostradas na Tabela 5.34 e as variâncias calculadas na Tabela 5.35. Na Figura 5.37 são mostradas as contribuições de cada variável aleatória para esses valores de variância do número de passadas permitido para o revestimento desse pavimento.

Tabela 5.33 - Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento.

Variáveis	$(\partial Nr/\partial xi)_+$	$(\partial Nr/\partial xi)_\pm$	$(\partial Nr/\partial xi)_-$
Hr	-2,32E+07	-6,04E+07	-9,77E+07
Hb	-1,04E+05	-1,95E+04	6,51E+04
Hsb	-4,31E+05	-4,56E+05	-4,81E+05
Mr	-1,99E+01	-2,54E+01	-3,08E+01
Mb	5,17E+02	4,09E+02	3,01E+02
Msb	-3,68E+00	-3,92E+00	-4,16E+00
Msl	-3,47E+02	-3,78E+02	-4,10E+02

Tabela 5.34 - Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PECV para o parâmetro número de passadas permitidas para o revestimento, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%.

Influência	$v[Nr]_+$	$v[Nr]_\pm$	$v[Nr]_-$
Hr	6,77E+09	4,61E+10	1,20E+11
Hb	1,65E+06	5,76E+04	6,45E+05
Hsb	3,33E+07	3,73E+07	4,15E+07
Mr	6,19E+13	1,00E+14	1,48E+14
Mb	2,57E+15	1,61E+15	8,70E+14
Msb	3,04E+10	3,45E+10	3,88E+10
Msl	7,72E+12	9,17E+12	1,07E+13
Total	2,64E+15	1,72E+15	1,03E+15

O valor da variância calculado pelo Método FOSM com incremento centrado de $\pm 10\%$ para o número de passadas permitido para a camada de revestimento foi de $1,72 \times 10^{+15}$. Na Figura 5.24 fica evidente a predominância da influência do Módulo de Resiliência da camada de base (93,63%) para a determinação da variância do número de passadas permitido para o revestimento desse pavimento. O Módulo de Resiliência da camada de revestimento exerce uma influência bem menor (5,83%).

Nº de Passadas Permitidas para a Camada de Revestimento

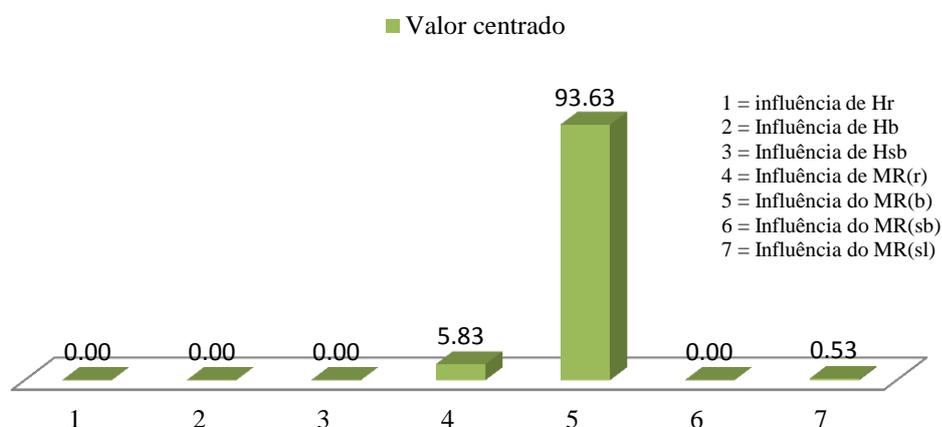


Figura 5.32 – Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância do número de passadas permitidas para a camada de revestimento do pavimento da Avenida Antártica, com incremento em avanço, em atraso e centrado de 10%, pelo Método FOSM.

As derivadas parciais e as variâncias calculadas pelo Método FOSM para do número de passadas permitido para a camada de subleito do pavimento em estudo são mostradas nas Tabelas 5.35 e 5.36, respectivamente. Na Figura 5.33 mostram-se as contribuições de cada variável aleatória para esses valores de variância do número de passadas permitido para o subleito desse pavimento.

Tabela 5.35- Valores das derivadas parciais das variáveis aleatórias usadas na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito.

Variáveis	$(\partial N_{sl}/\partial x_i)_+$	$(\partial N_{sl}/\partial x_i)_\pm$	$(\partial N_{sl}/\partial x_i)_-$
Hr	2,14E+06	2,28E+06	2,41E+06
Hb	1,86E+06	1,58E+06	1,30E+06
Hsb	-1,07E+05	-1,15E+05	-1,22E+05
Mr	8,52E-01	8,99E-01	9,46E-01
Mb	1,64E+01	1,59E+01	1,54E+01
Msb	1,31E+02	1,15E+02	9,89E+01
Msl	-2,61E+01	-2,44E+01	-2,26E+01

Tabela 5.36 – Dados resultantes da aplicação do Método F.O.S.M. na análise probabilística do pavimento da PAA para o parâmetro número de passadas permitidas para o subleito, com incremento em avanço, em atraso e centrado de +10% e de -10%.

Influência	$v[Nr]_+$	$v[Nr]_\pm$	$v[Nr]_-$
Hr	5,80E+07	6,54E+07	7,31E+07
Hb	5,26E+08	3,79E+08	2,56E+08
Hsb	2,07E+06	2,37E+06	2,69E+06
Mr	1,13E+11	1,26E+11	1,39E+11
Mb	2,59E+12	2,43E+12	2,28E+12
Msb	3,82E+13	2,95E+13	2,19E+13
Msl	4,36E+10	3,80E+10	3,28E+10
Total	4,09E+13	3,21E+13	2,44E+13

O valor da variância calculado pelo Método FOSM com incremento centrado de 10% para o número de passadas permitido para a camada de subleito foi de $3,21 \times 10^{+13}$. Na Figura 5.25 percebe-se a importância que a influência do Módulo de Resiliência da camada de sub-base (91,91%) exerce no valor da variância do número de passadas permitido para o subleito, seguido pelo Módulo de Resiliência da camada de base (7,58%), com influência pouco significativa.

Nº de Passadas Permitidas para a Camada de Subleito

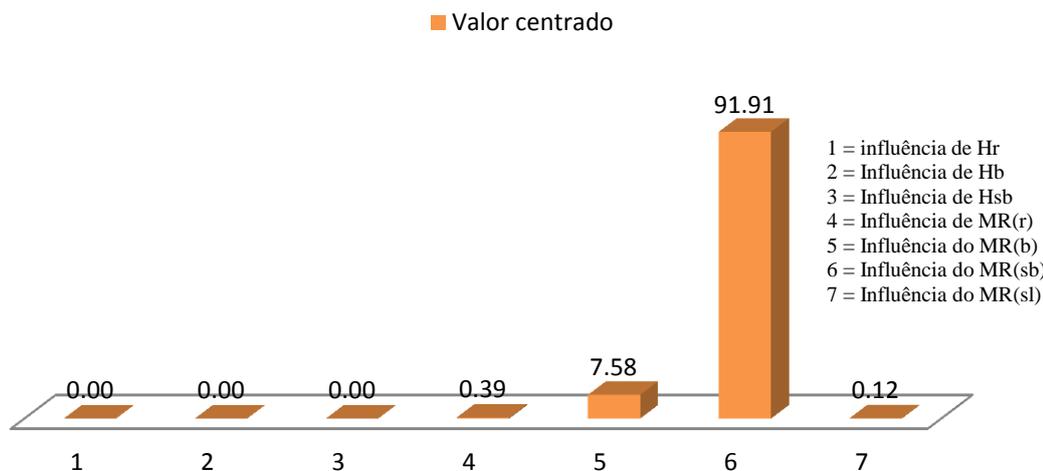


Figura 5.33 – Gráfico do percentual de influência de cada variável aleatória que contribuiu para a determinação do valor da variância do número de passadas permitidas para a camada do subleito do pavimento da PAA, com incremento em avanço, em atraso e centrado de 10%, pelo Método FOSM.

As duas áreas de estudo a seguir são de pavimentos rígidos. Nelas, o que se pretende neste trabalho, é mostrar a importância do Método GPR no estudo da variabilidade das espessuras das camadas da estrutura do pavimento, fatores que estão diretamente associados à sua rigidez. Para o pavimento da BR-101/NE foi possível verificar que o controle da construção da pista em todas as suas etapas pode evitar falhas consequentes da execução em descumprimento às especificações do projeto.

5.3 RODOVIA BR 101-NE, LOTE 7, RECIFE – PE

A análise dos resultados é apresentada, tendo como referência o projeto executivo da BR-101/NE. Os dados analisados permitiram identificar a profundidade e a espessura das camadas do pavimento.

Para a conversão da seção de tempo para profundidade, foi realizado um ajuste hiperbólico de alguns pontos de difração (barras de aço) encontrados ao longo dos perfis, bem como a verificação da profundidade em algumas placas destruídas. A velocidade média obtida foi de 0,072 m/ns, utilizada na inversão dos dados (tempo para profundidade). As especificações do projeto exigiram a espessura de 22 cm para o revestimento de concreto e 10 cm para a base de concreto compactado com rolo (CCR). As análises de um único segmento aleatório com o comprimento de 600 m (Figura 5.34) apontaram espessuras de placas de

concreto com valores na faixa entre 16,4 e 28,2 cm, 25% abaixo e 28% acima dos valores exigidos, respectivamente. A espessura média das placas foi de 22 cm, exatamente o valor necessário, mas com um desvio padrão de 1,7 cm e coeficiente de variação de 8%. Isso significa que exatamente 50% das amostras estavam abaixo da espessura de projeto necessária (22 cm). Para a base de macadame hidráulico a espessura varia de 6,1 para 19,7 cm, 39% abaixo e 97% acima do valor exigido, respectivamente. A espessura da base média foi de 13 cm, mais espesso do que o exigido, 10 cm, com uma variação padrão de 2,0 cm e um coeficiente de variação de 16%. Isso significa que apenas 7% das amostras estavam abaixo da espessura de projeto para a base, de 10 cm, mas significa, também, que é mais difícil controlar a espessura da base granular.

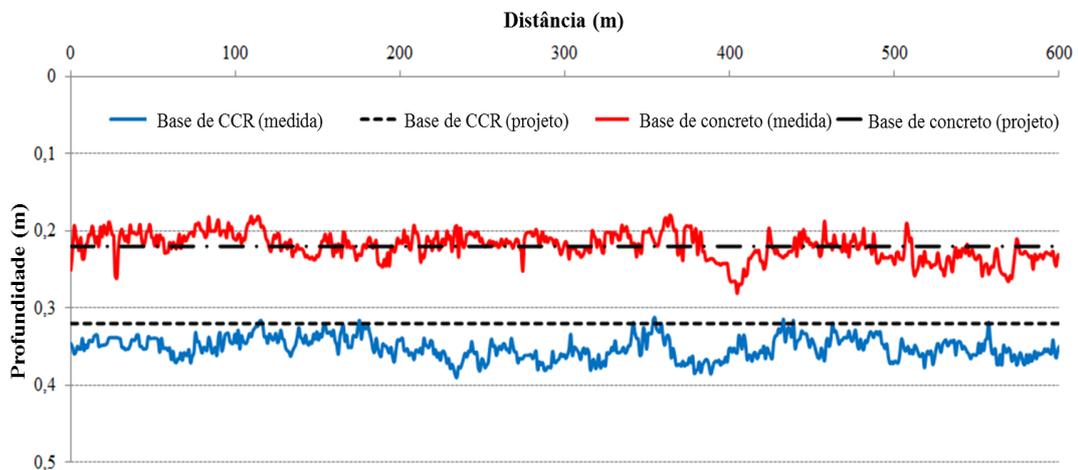


Figure 5.34 – Gráfico com as espessuras de concreto e macadame, medidas com o GPR e planejadas no projeto, em um trecho da BR-101/NE.

Na Figura 5.35 encontram-se os radargramas de duas seções curtas, com cerca de 14m de comprimento cada, para fins de comparação e visualização das barras de ligação. Na primeira seção (Figura 5.35a e 5.35b), as barras de ligação estão corretamente espaçadas a cada 50 cm, totalizando 11 barras em cada placa de 6,0 m de comprimento, de acordo com o projeto executivo. Na segunda seção (Figuras 5.35c e 5.35d), as barras de ligação não estão devidamente espaçadas e apenas 7 barras puderam ser identificadas em cada placa.

Os resultados dos dados globais de cerca de 90 km de perfis 2D adquiridos na faixa central mostram que apenas 5,25% dos barras de ligação atenderam as especificações de projeto necessárias com relação ao tamanho e espaçamento na pista central. As barras restantes foram perdidas, ou simplesmente inexistentes. A situação era ainda pior na faixa de segurança, onde apenas 0,88% das barras atenderam as exigências de projeto.

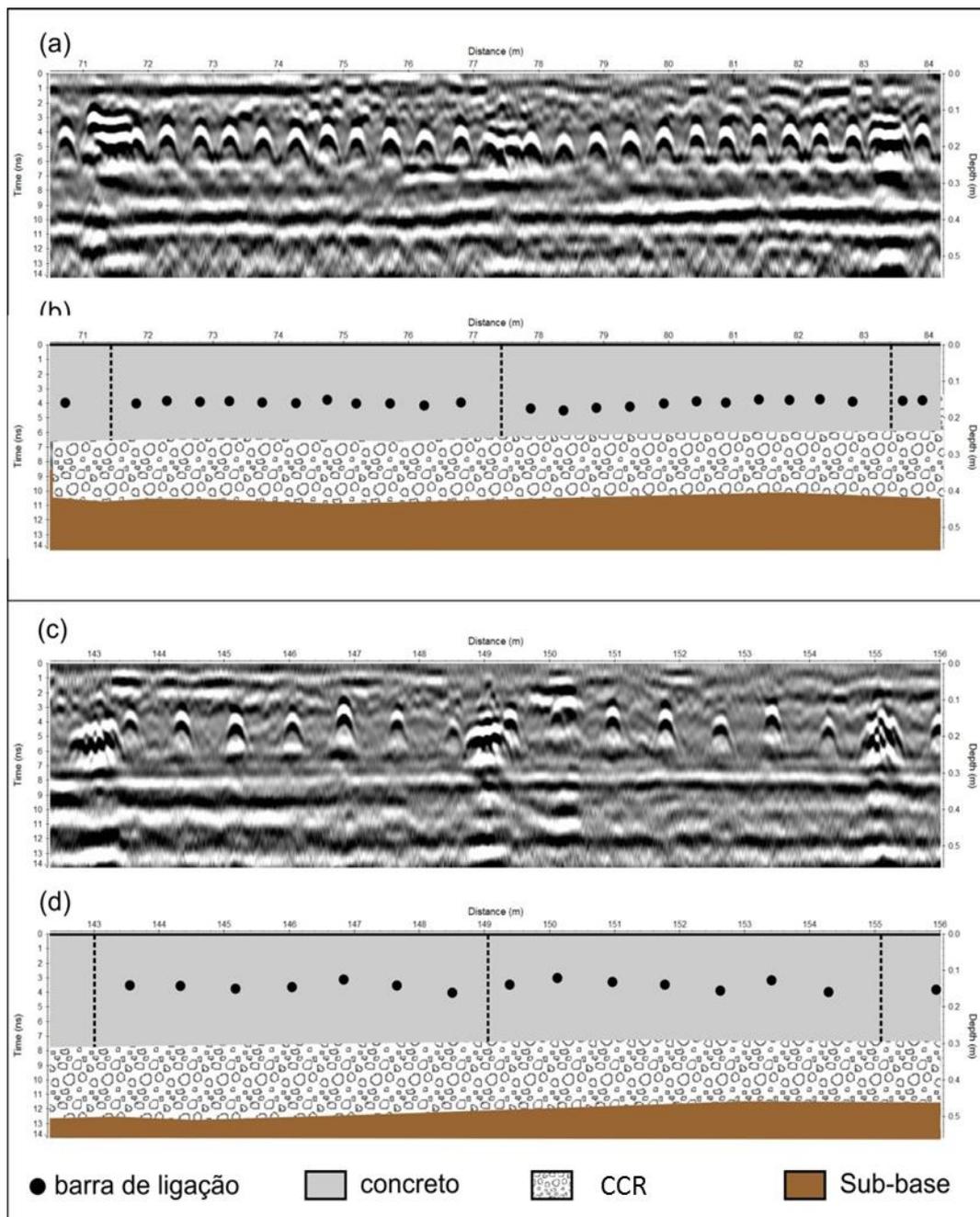


Figura 5.35 - (a) radargrama de GPR obtido em uma área onde o número e a posição das barras de ligação estavam corretos; (b) detalhe das camadas do solo (base de macadame e subleito) da seção anterior (a); (c) radargrama de GPR obtidos em uma área onde o número e a posição das barras de ligação estão incorretos; (d) detalhe das camadas do solo (base de macadame e subleito) da seção anterior (c).

De um total de 7.632 placas de concreto na pista central, apenas 1.100 (14,4%) tinham o número necessário de 11 barras de ligação, mas 9,1% estavam fora de lugar. A maioria das placas (34%) tinha barras espaçadas de 1,0 m (o dobro do espaçamento necessário), ou seja, apenas 7 barras por placa (Figura 5.35c e 5.35d). Cerca de 20% das placas tinha menos de 7 barras e 51 placas não tinham nenhuma barra. De um total de 83.952 barras necessárias na pista central investigada, apenas 70% estavam presentes, o resto estava faltando. A

distribuição global do número de barras com o número de placas (em porcentagem) na pista central é ilustrada na Figura 5.36.

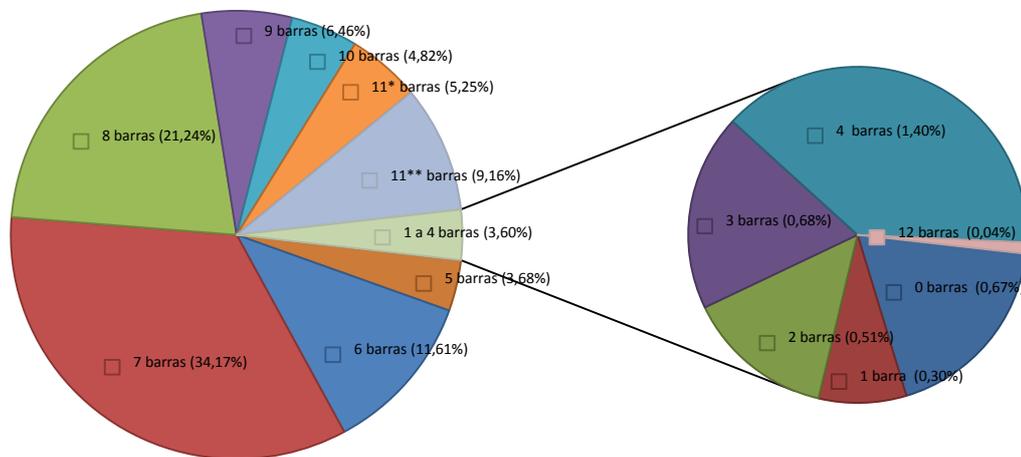


Figura 5.36 - Porcentagem de placas com número de barras de ligação.(11 * = barras de ligação de acordo com o projeto; 11 ** = barras de ligação em desacordo com o projeto).

As imagens GPR foram muito eficazes na identificação das posições espaciais das barras, bem como a determinação da espessura da camada de pavimento.

Os resultados mostraram que as barras de ligação não cumpriram as especificações exigidas no que diz respeito ao espaçamento e tamanhos. Na pista central, apenas 5% das barras estavam de acordo com o projeto executivo. Mais drasticamente, cerca de 30% das barras de ligação estavam faltando. Isso certamente afetará seriamente o desempenho das placas de concreto, depois que a pista for entregue ao tráfego.

Os perfis de GPR também mostraram diferenças significativas entre a espessura da camada observada e a programada. A camada de base de CCR era na maior parte mais espessa do que o projetado, o que favorece a segurança, mas as placas de concreto, que são mais críticas com relação à vida de fadiga do pavimento, foram subestimadas em 50% do comprimento investigado.

A falta de homogeneidade na espessura da camada e espaçamento das barras de ligação implica em áreas com alta concentração de estresse com relação ao que foi definido no projeto executivo e pode resultar em menor vida de fadiga para toda a estrutura. Isto deve ser investigado pelas análises mecanicistas.

Os resultados globais sugerem deficiências nas rotinas de construção e controle.

5.4 AEROPORTO SANTOS DUMONT, RIO DE JANEIRO – RJ

No pátio de manobras de aeronaves do Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, adquiriram-se seis perfis de GPR (Figura 5.37). Os resultados apresentados correspondem a linha 2 com aproximadamente 640 m de comprimento, próximo da qual perfuraram três furos de sondagem para investigação das características dos materiais usados para a estrutura do pavimento. A caracterização desses materiais e suas respectivas localizações em subsuperfície permitiram a realização da conversão da seção de tempo para profundidade durante o processamento e a interpretação dos dados.

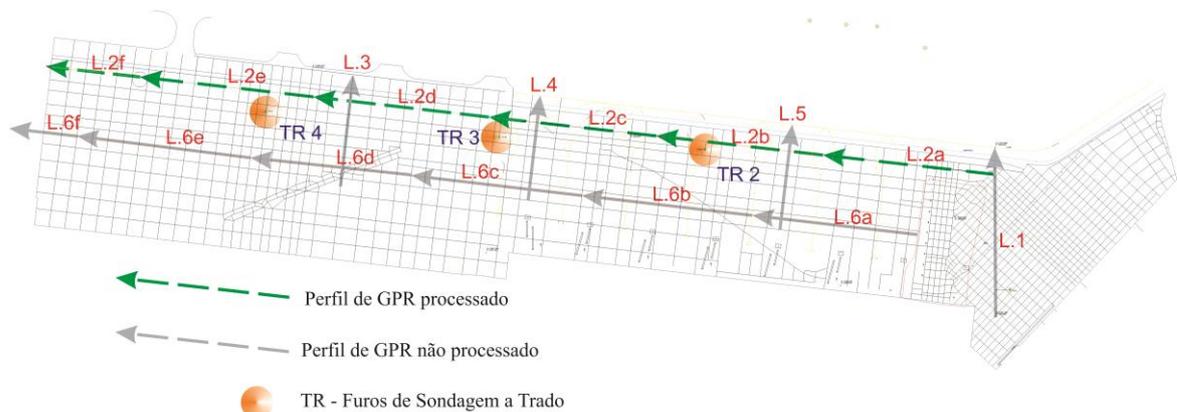


Figura 5.37 – Croqui com a localização dos perfis de GPR adquiridos no pátio de manobras de aeronaves do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro/RJ, e dos furos de sondagem perfurados nos locais indicados. A linha cor verde indica o perfil adquirido e processado cujos dados estão comentados neste trabalho.

O primeiro perfil analisado é o Perfil 2b. O furo de sondagem feito para a caracterização dos materiais constituintes da estrutura do pavimento desse trecho em subsuperfície está localizado a uma distância de aproximadamente 84 m do início do perfil 2b e está afastado de aproximadamente 5 m do referido perfil (Figura 5.38).

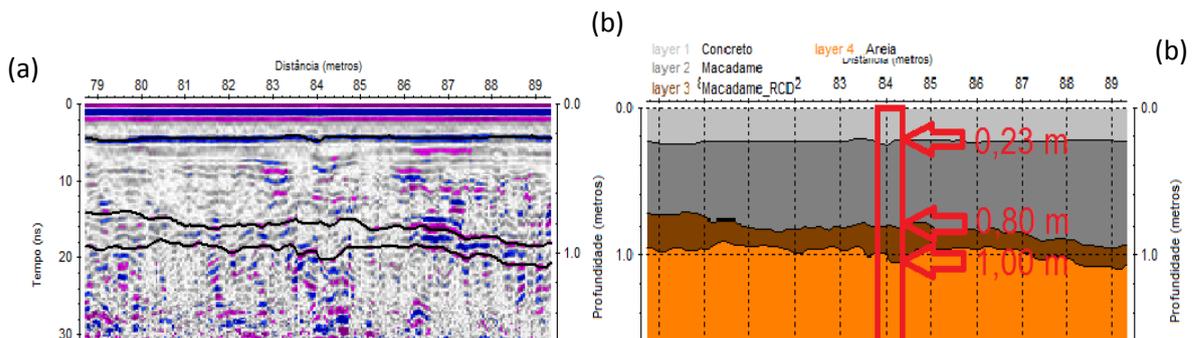


Figura 5.38 – (a) Seção de GPR Perfil 2b com os principais refletores identificados. (b) Modelo geotécnico interpretado com a seção GPR e correlação com o poço TR 02.

A velocidade usada para a conversão da seção de tempo para profundidade para a camada de concreto-cimento foi de 0,07 m/ns, que levou a uma constante dielétrica de 18,3 considerada elevada para os padrões dos valores, entre 6 e 8 atribuídas por Daniels (1996) e Annan (2001). O conhecimento da espessura da camada de revestimento desse pavimento (0,23 m) permitiu a obtenção da velocidade de propagação da onda eletromagnética na camada de concreto-cimento.

A velocidade usada para a conversão da seção de tempo para profundidade para a camada de macadame foi de 0,10 m/ns, o que permitiu calcular o valor da constante dielétrica dessa camada, igual a 9. A obtenção dessa velocidade foi possível, devido ao conhecimento da localização da base do macadame a, aproximadamente 80 cm da superfície.

O segundo perfil analisado é o Perfil 2d (Figura 5.39). O furo de sondagem feito para a caracterização dos materiais constituintes da estrutura do pavimento desse trecho em subsuperfície, TR 03, está localizado a uma distância de aproximadamente 7,5 m do início do perfil 2d e está afastado de aproximadamente 12,5 m do referido perfil.

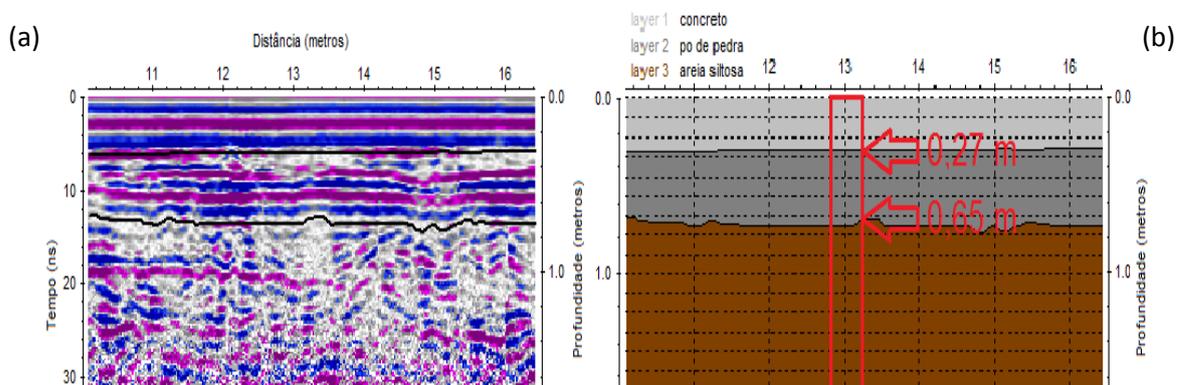


Figura 5.39 – (a) Seção de GPR Perfil 2d com os principais refletores identificados. (b) Modelo geotécnico interpretado com a seção GPR e correlação com o poço TR 03.

Foram usadas as mesmas velocidades de propagação da onda do radar nas camadas de revestimento em concreto-cimento e base constituída de pó de brita, respectivamente 0,0875 m/ns e 0,096 m/ns, o que conferiu a essas camadas constantes dielétricas de valores, respectivamente, de 11,7 e 9,7. As profundidades das bases do concreto-cimento e do pó de brita, medidos no furo de sondagem TR 03 foram de, respectivamente, 27 cm e 65 cm.

O terceiro furo de sondagem foi perfurado a uma distância de 58m do início do Perfil 2e e a uma distância de 13,5 m deste (Figura 5.40).

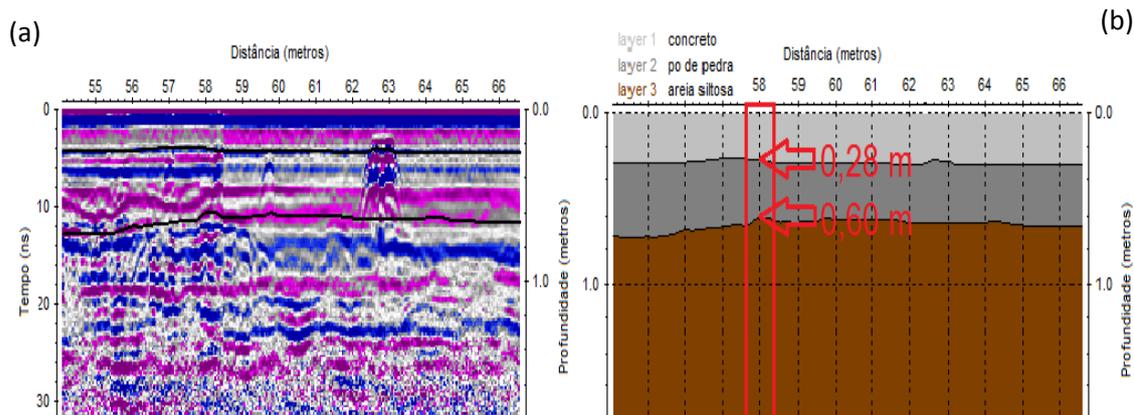


Figura 5.40 – (a) Seção de GPR Perfil 2e com os principais refletos identificados. (b) Modelo geotécnico interpretado com a seção GPR e correlação com o poço TR 04.

A velocidade usada para a conversão da seção de tempo para profundidade para a camada de concreto-cimento foi de 0,137 m/ns. A constante dielétrica para essa camada foi calculada com valor de 4,8. A obtenção dessa velocidade foi possível, devido ao conhecimento da localização da base do revestimento, a 28 cm da superfície.

A velocidade usada para a conversão da seção de tempo para profundidade para a camada de pó de pedra deste perfil foi de 0,113 m/ns, o que permitiu calcular o valor da constante dielétrica dessa camada, igual a 7,0. A obtenção dessa velocidade foi possível, devido ao conhecimento da localização da base do macadame a, aproximadamente 60 cm da superfície.

A Figura 5.41 apresenta um gráfico da variabilidade das espessuras camadas do perfil de GPR adquirido e processado da extensão completa da linha 2 do Aeroporto Santos com os valores encontrados e os valores sugeridos pelos furos de sondagem perfurados próximos dessa linha.

A análise dos dados permite identificar a profundidade e espessura das camadas do pavimento. Os dados obtidos pelos furos de sondagem mostraram uma espessura de 23 cm para o revestimento de concreto próximo ao furo TR 02 (perfil de GPR da linha 2b) e 57 cm para a base de macadame, acrescidos de 20 cm de Resíduo de Construção e Demolição - RCD. Consideramos os primeiros 200 m do perfil com essas características, visto que o poço TR 02 fica distante 184 m, aproximadamente, do início do perfil. Os mesmos dados obtidos pelos furos de sondagem mostraram uma espessura de 27 cm para o revestimento de concreto próximo ao furo TR 03 (perfil de GPR denominado linha 2d) e 38 cm para a base de pó de pedra. Consideramos os próximos 210m do perfil com essas características, visto que o poço TR 03 fica distante 316 m, aproximadamente, do início do perfil e 64 m do fim da linha 2d. Os últimos 230 m do perfil de GPR foram caracterizados pelos dados do furo de sondagem

TR 04, que apresentou uma espessura de 28 cm para o revestimento de concreto e 32 cm para a base de pó de pedra. A linha 2e foi adquirida próximo ao furo TR 04.

Considerando o comprimento total da linha 2 de 640m e a espessura média medida nos três furos de sondagem, para o revestimento de concreto de 26 cm e, para o macadame/pó de pedra de 42 cm e após as análises dos resultados dos perfis adquiridos com o GPR, apontaram os seguintes dados: placas de concreto com espessura entre 20 cm e 33 cm, 46,33% abaixo e 53,67% acima da média medida nos furos de sondagem, respectivamente; a espessura média das placas foi de 26 cm, exatamente o valor necessário, mas com um desvio padrão de 23,8 cm e coeficiente de variação de 9,0%. Isso significa que exatamente 46,33% das amostras estavam abaixo da espessura média medida nos furos de sondagem (26 cm). Para a base de macadame hidráulico, com espessura média medida de 42 cm, essa espessura varia de 22 cm para 71 cm, 46,03% abaixo e 68,59% acima do valor medido, respectivamente. A espessura da base média foi de 45 cm, mais espesso do que o medido, 42 cm, com uma variação padrão de 3cm e um coeficiente de variação de 20,54%. Isso significa que 44,46% das amostras estavam abaixo da espessura média medida nos furos de sondagem para a base, de 42 cm.

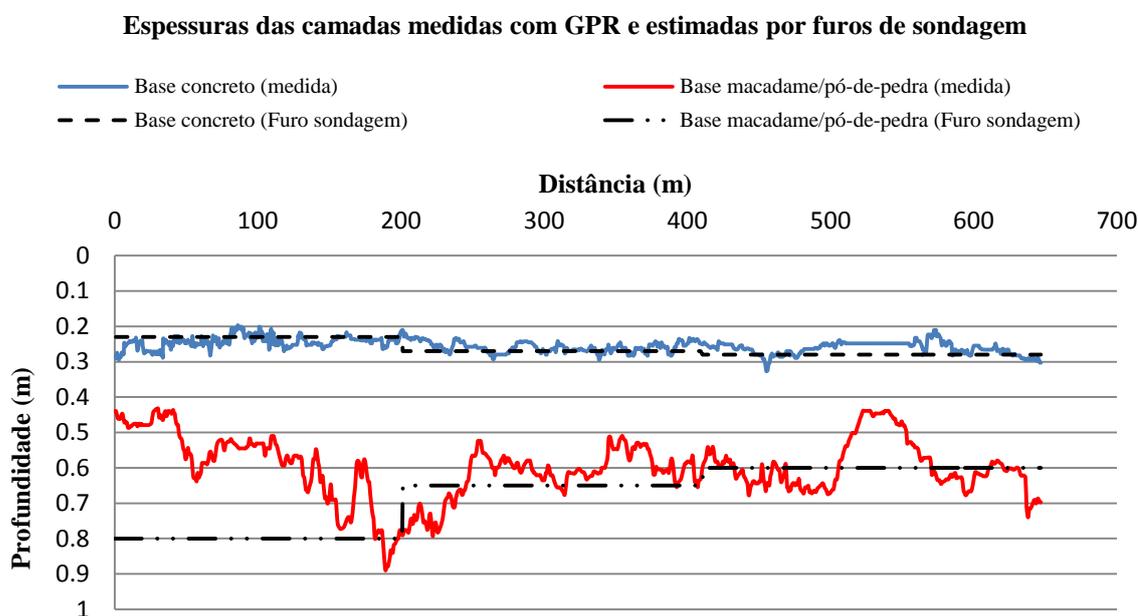


Figura 5.41 – Gráfico com as espessuras de concreto e macadame, medidas com o GPR e obtidas diretamente em furos de sondagem, na área do Aeroporto Santos Dumont, Rio de Janeiro-RJ.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo são resumidas as conclusões do trabalho desenvolvido. Pretende-se, numa primeira abordagem, apresentar as considerações finais sobre a abrangência dos resultados obtidos com o uso do GPR na identificação das camadas da estrutura dos pavimentos flexíveis e rígidos, assim como relacionar os principais eventos que contribuíram para alcançar os objetivos propostos nesse aspecto. Em seguida, pretende-se dar um enfoque nas médias e variâncias dos módulos de resiliência obtidos nas retroanálises e nos resultados da análise probabilística dos pavimentos, comentar o grau de influência dos parâmetros considerados e destacar a importância do controle das propriedades mecânicas e das espessuras das camadas da estrutura do pavimento durante a sua construção.

6.1 O MÉTODO GPR APLICADO NA MEDIDA DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DA “PECV” E DA “PAA” E RÍGIDOS DA BR-10/NE E DO PÁTIO DO AEROPORTO SANTOS DUMONT

Dois pavimentos flexíveis foram construídos e, durante a sua construção, o radar foi utilizado com o propósito de identificar as interfaces das camadas dessas estruturas e, como consequência disso, obter as espessuras dessas camadas, assim como verificar a variabilidade dos valores encontrados. Dois pavimentos rígidos também foram investigados com o mesmo propósito, após terem sido entregues ao tráfego: um pavimento rodoviário, o Lote 7 da BR-101/NE; e o pátio destinado a manobras e estacionamento de aeronaves do Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro.

No pavimento da PECV o GPR identificou os padrões de reflexão associados às camadas do pavimento e aos metais implantados durante a sua construção. Esses metais (vergalhões) tiveram o propósito de realçar as interfaces das camadas. Por terem sido instalados na direção transversal da pista e em toda sua extensão, a cada 10 metros, esses vergalhões produziram refletores hiperbólicos em todos os perfis de GPR, sem exceção. Isso facilitou a identificação das interfaces das camadas e, conseqüentemente, os dados inerentes à sua localização em profundidade. Esses dados foram importantes para a retroanálise e para análise probabilística do pavimento.

Os dados fornecidos pelo GPR permitiram perceber a variabilidade das espessuras das camadas, principalmente a camada de base, que foi construída com o propósito de destacar a aplicação do RCD nessa camada do pavimento. Com esses dados foi possível, também, excluir os primeiros 10 metros e os últimos 5 metros do pavimento que se destinaram ao cálculo dos valores das médias das camadas. Isso ocorreu porque se percebeu que nesses trechos houve prejuízo do controle da execução da camada de base por estarem próximos de obstáculos (uma viga de concreto no início da pista e o edifício do IFMT no fim da pista) que impediram o espalhamento e a compactação dos materiais. Os gráficos de iso-espessuras apresentados também tiveram importante revelação acerca das camadas do pavimento da PECV.

No pavimento da PAA, ao invés de vergalhões de aço, placas em formato triangular, com comprimento de aproximadamente 15 cm, foram instaladas nas interfaces das camadas de revestimento/base, base/sub-base e sub-base/reforço de subleito. Essas placas foram cadastradas pelo trabalho de topografia com o auxílio de uma estação total. Após a conclusão dos trabalhos de construção da camada de revestimento, a topografia voltou ao trecho pra recuperar esses dados. Entretanto, provavelmente em função da movimentação de máquinas pesadas como esteiras e compactadoras, as placas se deslocaram, o que dificultou o trabalho de visualização nos perfis GPR. A sua visualização só foi possível com a realização de uma campanha de aquisição de dados com o GPR em pequenas malhas de perfis constituídas de linhas de aquisição de 1,2 m, paralelas, distantes entre si de 0,1 m, em número de 12 linhas. Essas malhas foram adquiridas em todas as estacas e nas duas bordas da pista. Concluiu-se, portanto, que o uso de placas de pequenas dimensões utilizadas para marcar as interfaces das camadas nos perfis de GPR pode ser viável e exequível se o equipamento for dotado de sistema de múltiplas antenas, capazes de realizar uma varredura numa faixa de 1 metro de largura. Esse equipamento GPR é comumente usado e pode-se verificar isso em publicações recentes referidas ao uso do GPR para a pesquisa em camadas de pavimentos, porém, no Brasil, a sua aplicação ainda é escasso.

Os furos destinados a extrair os núcleos da camada de revestimento, em número de três, foram realizados em locais onde a topografia identificou, por recuperação dos dados, a existência de placas de aço instaladas em alguma interface de camadas. Entretanto, em apenas um desses furos, a placa foi encontrada na interface base/sub-base e os dados puderam contribuir para a conversão de tempo x profundidade na interpretação de dados GPR.

Com os perfis transversais adquiridos na pista em todas as estacas e com os perfis longitudinais realizados nas duas bordas, distantes dela de aproximadamente 1,2 m, foi

possível identificar as interfaces das camadas e construir o banco de dados de espessuras das camadas desse pavimento. Assim como no pavimento da PECV, as interfaces das camadas após terem sido picadas nos refletores horizontais indicados pelo vértice dos refletores hiperbólicos das placas de metal permitiram a geração de gráficos de iso-espessuras e de modelos da estrutura do pavimento.

O uso do Método GPR mostrou ser adequado para o trabalho de identificação das interfaces das camadas da estrutura de pavimentos flexíveis e, conseqüentemente, medir as espessuras das camadas. Os perfis mostraram claramente que a instalação de placas ou barras de aço nas interfaces das camadas serve para balizar o procedimento denominado picagem dessas linhas (interfaces). Isso se verificou, principalmente quando se tratou de identificar interfaces de camadas subjacentes à de revestimento, constituídas de materiais granulares oriundos de uma mesma jazida. Essas camadas diferiram apenas pela energia e pela umidade ótima de compactação e, portanto, com propriedades constitutivas bastantes semelhantes (os métodos geofísicos são mais eficientes quando se trata de identificar materiais com contraste nas suas propriedades elétricas).

A antena de 900 MHz atendeu perfeitamente os objetivos das campanhas de aquisição de dados com GPR, por permitir a investigação nas profundidades de até 1,5 m, com resolução aceitável. Antenas de maior frequência central, entretanto, poderão fornecer detalhes mais expressivos, porém a profundidades de investigação menores, sem prejudicar as análises da estrutura desses pavimentos, visto que a sua espessura total, na maioria das vezes, é menor que 1 m.

Os valores de velocidade da onda EM encontradas para as camadas de revestimento asfáltico, de 0,055 m/ns para os pavimentos das PECD e PAA, comparados aos observados em Gordon *et al.* (1998), de 0,07 a 0,21 m/ns, respectivamente para as condições saturado e seco; em Hugensmith e Mastrangelo (2006), de 0,117 e 0,143 m/ns, respectivamente para as condições saturado e seco; e em Lopes (2009), de 0,1 m/ns; podem estar associados a composição dos materiais constitutivos dessa misturas.

Concluiu-se para as investigações geofísicas realizadas com o GPR na pista de manobras do Aeroporto Santos Dumont – RJ que estas pesquisas possibilitaram o delineamento de anomalias geofísicas associadas a interfaces geotécnicas (espessura do pavimento de concreto e do macadame/pó de pedra) e geológicas (areia/aterro com entulho).

Os resultados confirmaram a eficiência das antenas de 250 MHz e 700 MHz na medida da espessura do revestimento de concreto e da base de CCR, no pátio de aeronaves do

Aeroporto Santos Dumont. A utilização de antenas de maior frequência pode aumentar a precisão da estimativa da espessura do pavimento.

As imagens de GPR do pavimento rígido da BR101/NE foram muito eficazes na identificação da posição espacial das barras de ligação, bem como a determinação da espessura da camada de revestimento.

Os resultados mostraram que as barras de ligação não atenderam as especificações exigidas em relação ao espaçamento e tamanhos. Na pista central apenas 5% das barras estiveram em conformidade com o projeto executivo; na faixa de segurança, menos de 1%. O mais importante foi que em torno de 36% dessas barras de aço não foram instaladas. Isso pode afetar seriamente o desempenho futuro das placas de concreto.

Os perfis GPR também mostraram significativas diferenças entre a espessura da camada observada e a exigida. A camada de base de CCR era mais espessa do que na maior parte projetada, o que favorece a segurança, mas as espessuras das placas de concreto, que são as mais críticas em relação à vida de fadiga do pavimento, foram subestimadas em 50% do comprimento de pista investigado.

A falta de homogeneidade na espessura das camadas e o espaçamento das barras de ligação implicam em áreas com alta concentração de tensão em relação ao que foi definido no projeto executivo e pode resultar em menor vida de fadiga para toda a estrutura. Isso deve ser investigado por meio de análises mecanicistas. Os resultados globais sugerem deficiências nas rotinas de controle de construção.

Houve também discreta distinção entre os valores de velocidade de propagação da onda EM nas camadas de concreto apresentadas pelos autores Hugensmith e Mastrangelo (2006), de 0,117 a 0,143 m/ns, respectivamente para as condições saturado e seco; e as verificadas na BR-10/NE, de 0,072 m/ns e no Aeroporto Santos Dumont, que variaram de 0,07 m/ns até 0,137 m/ns. Esses valores também devem estar associados a composição do material usado para construção dessas camadas, alterando, conseqüentemente, os valores de suas constantes dielétricas.

6.2 RETROANÁLISE DOS PAVIMENTOS DA PECV E DA PAA

O programa Kenlayer utilizado para retroanalisar os pavimentos da PECV e da PAA foi bastante interativo. Os dados de entrada podem ser inseridos com as suas unidades no Sistema Internacional e os resultados são fornecidos no mesmo SI. Como os resultados

esperados eram para serem comparados aos obtidos durante os ensaios com viga Benkelman, procurou-se obter apenas os valores dos deslocamentos verticais (deflexões) na superfície dos pavimentos na fase de retroanálise.

O ajuste das bacias medida e calculada para a PECV, Trecho 1, foi bastante satisfatório, com margem de erro entre 1,85% e 8,73%. Entretanto, para o Trecho 3, houve dificuldade para encontrar um ajuste satisfatório com valores divergentes mais baixos. As duas bacias se cruzaram próximo de D50. Entretanto, os pontos extremos D0 e D125, apesar das diversas tentativas de inserção dos MR das camadas de revestimento e de subleito, deslocavam a curva calculada ao invés de fazê-la girar no ponto de intersecção próximo de D50. Mesmo assim, com o propósito de passar para a etapa seguinte e realizar a análise probabilística com o uso do Método FOSM, resolveu-se adotar os valores dos módulos de resiliência encontrados para o melhor ajuste obtido nesse trecho.

Os pavimentos rígidos não tiveram os seus dados retroanalizados. Para o pavimento da BR-101, apesar de terem sido obtidos os resultados dos ensaios com o *Falling Weight Deflectometer* – FWD, estes não foram referenciados aos perfis de GPR em tempo de se realizar os processamentos. No caso do Aeroporto Santos Dumont, o objetivo das campanhas com o radar era de obter as localizações de possíveis dutos destinados à instalações hidro-sanitárias, elétricas e de comunicação de dados. Esse estudo tinha o propósito de oferecer condições seguras para os serviços de remoção da camada de revestimento de concreto Portland por ocasião da substituição dessa camada para a reforma da pista de manobras e estacionamento de aeronaves. Os ensaios para obtenção dos deslocamentos verticais desse pavimento, portanto, não foram realizados.

6.3 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DOS PAVIMENTOS DA PECV E DA PAA

Os resultados das campanhas com o GPR e os processamentos destinados à retroanálise dos pavimentos dessas duas pistas de pavimentos flexíveis permitiram a realização da análise probabilística desses pavimentos e a obtenção de informações relevantes sobre a influência dos parâmetros das camadas de sua estrutura para a determinação da variância das deformações de tração na base das camadas de revestimento e de compressão no topo das camadas de subleito, além da variância do número de passadas permitidas para essas duas camadas, respectivamente.

Da análise do pavimento da PECV, pode-se observar que as espessuras das camadas de revestimento e base pouco influenciaram para o cálculo da variância das deformações e dos números de passadas permitidas, tanto para a camada de revestimento, quanto para a camada de base. Isto se deveu à baixa variância individual das espessuras das camadas em relação à variância dos módulos de resiliência (MR).

O valor do módulo de resiliência da camada de base teve maior influência (em torno de 90%) na variância da deformação e do número de passadas do revestimento para o trecho analisado. Segue-se em ordem de importância o MR da camada de subleito

Para a deformação e para o número de passadas do subleito, o valor da espessura da camada de base foi a variável mais influente (cerca de 80%), seguido do módulo de resiliência da camada do subleito.

Os resultados das análises probabilísticas da pista da PAA corroboram para os observados na PECV, identificando a maior influência do módulo da base na deformação de tração na fibra inferior do revestimento e do módulo do subleito na deformação de compressão no topo desta camada. Na PAA destacam-se os MR das camadas de base e sub-base.

6.5 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

No que se refere às investigações geofísicas com o objetivo de determinar as espessuras das camadas de pavimentos sugerem-se:

1. Investigar as propriedades físicas dos materiais constituintes das camadas da estrutura dos pavimentos e, conseqüentemente, as velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas nesses meios;
2. Verificar a relação custo benefício da instalação de materiais que possam servir de referência para identificar as interfaces das camadas, como placas e vergalhões de aço;
3. Estudar a melhor maneira de medir a profundidade de instalação desses alvos metálicos com a menor interferência dos métodos de investigação direta (extração de núcleos; abertura de trincheiras; etc.) e estudar a melhor maneira de georeferenciá-los;

4. Pesquisar outros equipamentos geofísicos que possam contribuir para as pesquisas geotécnicas associadas a pavimentos, com o objetivo de obter as suas propriedades mecânicas.

Relativamente aos trabalhos ligados a retroanálise e à análise probabilística dos pavimentos, sugere-se:

1. Realizar essas pesquisas para o pavimento da BR-101/NE após obtenção do banco de dados das bacias deflectométricas obtidas pelos ensaios com FWD;
2. Verificar a possibilidade de desenvolver um algoritmo que permita obter o ajuste das bacias medida e calculada durante a retroanálise de pavimentos, com um processamento automático;
3. Desenvolver um banco de dados com os valores de MR de materiais utilizados nas camadas da estrutura de pavimentos;
4. Desenvolver pesquisas objetivando encontrar recursos para substituir a tradicional viga Benkelman, por equipamento que possa adquirir dados de deslocamentos verticais na superfície dos pavimentos com maior rapidez, eficiência e precisão e com custo mais acessível que o FWD.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7180/84. *Solo - determinação do limite de plasticidade*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7181/84. *Solo - análise granulométrica*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 7182/86. *Solo - ensaio de compactação*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 9895/87. *Solo - ensaio de compactação*. Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 6457/86. *Solo - Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 6459/84. *Solo - determinação do limite de liquidez*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR 9895/87. *Solo - Índice de suporte Califórnia*. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ADAMS, G.; ANDERSON, N.; BAKER, J.; SHOEMAKER, M.; SHAW, A.; HATHEWAY, A. Ground-Penetrating Radar and High-Resolution Reflection Seismic Surveys of Subsidence Features along Interstate 44 Springfield, Missouri. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 1998: pp. 875-881.

ADCOCK, A.D; DASS, W.C.; RICH III, J.W. Ground-Penetrating Radar for Airfield Pavement Evaluation. *Proc: Nondestructive Evaluation of Aging Airport Pavements*, v. 2455, 12p., 1995.

AL-QADI, I.L; LAHOUAR, S. Automatic Detection Of Multiple Pavement Layers From GPR Data. *Proc.: NDTeE International*, v. 41, pp. 69–81., 2008.

AMORIM, E. F. *Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos*. Estudo de Caso: Município de Campo Verde – MT. Tese (Doutorado em Geotecnia) Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2013, 151p.

ANNAN, A. P. GPR-History, Trends and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. v.3, n.4, 2002, pp. 253 -270.

ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors; Software, Inc. *Internal Report*, Canadá, 2001, 130p.

ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar. *Workshop Notes Sensors and Annual Meeting of SAGEEP*, Chicago, April 26-29, 1992.

ANNAN, A. P. Transmission Dispersion and GPR. Proc. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.2, pp.125–136, 1996.

ANNAN, J. D. In parameter estimation in Monte Carlo simulations, Annan, *Ecol. Modell.*, v.97, n.1-2, pp. 111-115, 1997.

BALLARD, G. S. Non-Destructive Assessment of Pavement Design and New Build Quality. Proc.: International Conference on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Vol. 1, *The British Institution of NDT*, Liverpool, pp. 391–404, 1993.

BARBOSAI, E. E. M ; PRADO, R.L. ; MENDES, R.M. ; MERINHO, F.A.M. Estimativas do teor de umidade empregando o método GPR: uma avaliação comparativa em experimentos de laboratório e campo. *Rev. Bras. Geof.* v.28, n.4 São Paulo, pp.691-701, 2010.

BEBEN, D.; MORDAK, A.; ANIGACZ, W. Identification of viaduct beam parameters using the ground penetrating radar (GPR) technique. *NDTeE International*, v. 49, pp. 18-26, 2012.

BENEDETTO, A.; PENZA S. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *J. Appl. Geophysics*, Elsevier, v. 62, pp. 107–123, 2007.

BENEDETTO, A.; BLASIIS, M.R. Applications of Ground Penetrating Radar to Road Pavement: State of the Art and Novelties. GeoShanghai 2010, *International Conference Paving Materials and Pavement Analysis*, pp. 412-419, 2010.

BENSON A.K. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination. *Journal of Applied Geophysics*, v. 33: pp.177-193, 1995.

BENSON, V.; GLACCUM, R.; NOEL, M. Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. Report for the U.S. *Environmental Protection Agency*. PB84-198449. EPA – 600/7-84-064, pp.233, 1984.

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. *Notas de aula*. Arquivos PPT, Geofísica Aplicada, IG/UnB. 2013.

BORGES, W.R. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente. *Estudo sobre Sítio Controlado do IAG/USP*, São Paulo-SP, 2007. 260p.

BREWSTER, M. L; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. *Geophysics*, v 59, p. 1211-1221, 1994.

BURMISTER, Donald M. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways. Proceedings, *Highway Research Board*, 1943.

- BURMISTER, D. M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. *Proceedings: Journal of Applied Physics*. v.16, p.126. Doi:10.1063/1.1707590, 1945.
- CAI, J. GA; McMECHAN Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, v.60 , p.87-96, 1995.
- CARTER, C.R., et al. An Automated Signal Processing System for the Signature Analysis of Radar Waveforms from Bridge Decks. *Proc. Canadian Electrical Engineering Journal*, v. 11, n.3, 1986.
- CHANG C.W.; LIN C.H.; LIEN H.S. Measurement Radius of Reinforcing Steel Bar in Concrete Using Digital Image GPR, *Construction and Building Materials*, v. 23, p.1057–1063, 2009.
- CHEN, D.H.; CHANG, G.; HONGYUAN, F.U. Limiting Base Moduli to Prevent Premature Pavement Failure. *American Society of Civil Engineers*, pp. 587-597, 2011.
- CHEN, D. H.; SCULLION, T.; HONG, F.; LEE, J. Pavement Swelling and Heaving at State Highway. *American Society of Civil Engineers*, v. 6, pp. 335-344, 2012.
- CHEN, C.S.M.; ZHANG, J.M.A Review on Flexible Pavement Performance Life Assessment. GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, *Modeling e Design (GSP 199) SCE*, pp. 2561-2569, 2010.
- CHEN, D.; Wimsatt, A. Inspection and Condition Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*. v. 136, Issue 1, pp. 207-214, 2010.
- CHEN, D. H.; SCULLION, T.; HONG, F.; LEE, J.; Pavement Swelling and Heaving at State Highway 6. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE/May/June 2012. pp. 335-344, 10p, 2012.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Serviço Social do Transporte (SEST); Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT) (2013). Pesquisa CNT de rodovias 2013. *Relatório gerencial*. Brasília, 2013, 389pp.
- CONYERS, L. B., GOODMAN, D. Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. *Walnut Creek, California: Altamira Press*,1997.
- CONYERS, L. B; Ground-Penetrating Radar for Archaeology. AltaMira, *Walnut Creek, California*; pp. 131-159, 2004.
- COOK, J.C.Exploração radar através da rocha, antes da mineração: Trans. Sociedade engenheiros de minas, *AIME*, v. 254, pp. 140-146, 1973.
- DANIELS J.J. ; ROBERTS, R.; VENDL, M. (). Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, v. 33, pp.195-207, 1995.

DANIELS, D.J. Ground Penetrating Radar – 2nd Edition. Radar, sonar, navigation and avionics series 15, *The Institute of Electrical Engineers- IEE*, London, UK, ISBN 0-86341-360-9, 726p., 2004.

DANIELS, D.J. Surface-Penetrating Radar, *Institute of Electrical Engineers - IEE*, London, 300 p. 1996.

DANIELS, D. J., GUNTON, D. J., SCOTT, H. R. Introduction to subsurface radar. IEE Proc.-F, Commun. *Radar Signal Process.*, 1988, v.135, pp. 278-320, 1988.

DAS, B.M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Trad. All Talks. Rev. Téc. Pécio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 562p.

DAVIS, J. L. e ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Proc.: Geophysical Prospecting*, v. 37, pp. 531-55, p.989, 1989.

DIAMANTI, J.D.; REDMAN, D. Field Observations and Numerical Models of GPR Response from Vertical Pavement Cracks. *Journal of Applied Geophysics*, v.81, pp.106-116, 2012.

DILIP, D.M.; RAVI, P.; BABU, G.L.S. System Reliability Analysis of Flexible Pavements, *J. Transp. Eng.*, 2013, v. 139: pp. 1001-1009, 2013.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *ME 043/(1995) - Misturas betuminosas a quente- ensaio Marshall*, 11p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *ME 024/(1994) – Pavimento-determinação das deflexões pela viga Benkelman*, 6p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *ME 117/(1994). Mistura betuminosa- determinação da densidade aparente*, 4p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *PRO 011/(1979) - Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis*, 16p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *PRO 175/(1994) – Aferição de viga Benkelman*, 11p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *ME 083/ – Agregados – Análise granulométrica. Norma rodoviária. Método de Ensaio*, 5p, 1998.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 005/2003-TER. *Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia*, Rio de Janeiro, 2003. 12p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003). Norma DNIT 006/2003-PRO. *Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento*, Rio de Janeiro, 2003. 10 p.

DNIT (). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003) Norma DNIT 008/2003-PRO. *Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos* - Procedimento, Rio de Janeiro, 2003. 11p.

DNIT. . Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003) Norma DNIT 009/2003-PRO. *Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos* – Procedimento, Rio de Janeiro, 2003. 6p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003). Norma DNIT 133/2010-ME Pavimentação asfáltica. *Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman* – Método de ensaio Rio de Janeiro, 2003. 8p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006). *Manual de Pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro. 2006. 274 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005). *Manual de Conservação Rodoviária*. 2. ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006). *Norma DNIT 031/2006-ES. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2006. 14p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Ministério dos Transportes (MT) / Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) (2010). *Resultados dos Levantamentos de Campo da Malha Rodoviária Federal*. Rio de Janeiro, 2010. 18 p.

DOLPHIN, L.T., BEATTY, W.B.; TUNZI, J.D. Radar Probing of Victorio Peak, New México: *Geophysics*, v. 43, n. 7, pp. 1441-1448, 1978.

DOMINGUES, F.A. *Manual para identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos*. São Paulo: s.n., 1993.

DOOLITTLE, J.A.; ASMUSSEN, L.E. Ten years of applications of ground penetrating radar by United States Department of Agriculture, Proceedings of the Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, *Geological Survey of Finland*, Special Paper, v. 16, p. 139-147, 1992.

FARIA, F.H. *O uso do georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis*. Dissertação (Mestrado). Viçosa, Minas Gerais, 2010. 125p.

FARIAS M. M.; ASSIS, A. Uma comparação entre Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes. *XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XI COBRAMSEG)*, Vol. II, pp.1305-1313, 1998.

FARIAS M. M. *Notas de Aula: PPT, Pavimentação Agetop1-8*. Geotecnia/UnB, 2013.

FAUCHARD, C.; DEROBERT, X.; COSTA, P. *GPR performances for thickness calibration on road test sites. NDT e e Internacional*, v. 36, pp.67-75, 2003.

FONSECA, L. F. S. *Análise das Soluções de Pavimentação do Programa CREMA 2ª ETAPA do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2013. 226p.

GARTIN R.S. An Introduction to wave propagation in pavements and soils – Theory and Practice. Proc., State of Alaska, Department of Transportation and Public Facilities, *Statewide Research MIS*, v. 2554, 191. 35 p.

GAZDAG, J.; SGUAZZERO, P. Migration of Seismic Data, *Proc.: IEEE*, v. 72, n. 10, pp. 1302-1315, 1984.

GEDAFA, D.S.; HOSSAIN, M.; MILLER, R.; VAN, T. Estimation of Remaining Service Life of Flexible Pavements from Surface Deflections. *Journal of Transportation Engineering*, pp. 342-352, 2010.

GERLITZ, K., KNOLL, M.D., CROSS, G.M., LUZITANO, R.D., KNIGHT, R. Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets, *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Boston, Massachusetts, pp.561-574, 1993.

GOMES, A.F.S.S. *Tecnologia Aplicada à Avaliação das Estruturas dos Pavimentos Aeroportuários*. Monografia (Especialização em Gestão da Aviação Civil) - Universidade de Brasília – UnB, Brasília – DF, 2008, 88p.

GONÇALVES, F.P.; CERATTI, J.A.P. Utilização do Ground Penetrating Radar na Avaliação de Pavimentos. *31ª Reunião Anual de Pavimentação São Paulo- SP*, 1998.15p.

GONÇALVES, F.P. Análise do Desempenho de uma Pista Experimental de Pavimento Flexível em Concreto Asfáltico. *33ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação*, Florianópolis-SC, 2013. 16p.

GOODMAN, D. *Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology*. *Geophysics*, v. 59, p. 224-232, 1994.

GORDON, M.O. The Assessment Of The Value Of GPR Imaging Of Fleivable Pavement. Broughton, K. S. A. MSA. Hardy Proc., *NDT International*, v.31, n. 6, pp.429-238, 1998.

GORDON. Utilização do Ground Penetrating Radar na Avaliação de Pavimentos. Proc. *31ª Reunião Anual de Pavimentação*, São Paulo – SP, 1998.

GRASMUECK, M. 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss. *Geophysics*, v. 6, n.4, p. 1050-1064, 1996.

GROTE, K.; HUBBARD, S.; HARVEY, J.; Y. Rubin, Y. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 57, 2005, p. 129-153.

- HAMMON III, W.S.; MCMECHAN, G.A.; ZENG, X. Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, v.45, 2000, pp.171–186.
- HARR, M.E. Reliability-Based Design in Civil Engineering. *McGraw-Hill*, New York, USA.
- HOLSER, W. T., R. J. BROWN, et al. Radar logging of a salt dome. *Geophysics*, v.37, 1972, pp. 889-906.
- HUANG, Y. H. Pavement Analysis and Design. 2.ed. *Pearson Prentice Hall*, Upper Saddle River, USA, 2004.
- HUGENSCHMIDT, J. Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*, v.16, n.3, 2002. pp.147-154.
- HUGENSCHMIDT J.; MASTRANGELO R. *GPR inspection of concrete bridges*, *Cement e Concrete Composites*, v. 28, 2006, pp.384-392.
- HVEEM, F. N. Pavement Deflection and Fatigue Failures, *Bulleti*, n. 114, HRB (TRB) Washington, D.C. 1955. p. 43-87.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) ISSN - IBGE. *Censo 2010*. Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/232DP>.
- JADOON, K. Z. ; LAMBOT, S. ; SLOB, E.C. ; VEREECKEN, H. Analysis of Horn Antenna Transfer Functions and Phase-Center Position for Modeling Off-Ground GPR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, pp. 1649- 1662.
- JASELSKIS, E. J.; GRIGAS, J.; BRILINGAS, A. Dielectric Properties of Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *American Society of Civil Engineers*, 2003, pp. 427-434.
- JOL, H. M. *Ground penetrating Radar: Theory and Applications*. Ed Elsevier Science. 1. ed. 2009. 524 p.
- JOL, H.M.; SMITH, D.G.; MEYERS, R.A. Digital ground penetrating radar (GPR): an improved and very effective geophysical tool for studying modern coastal barriers (*examples for the Atlantic, Gulf and Pacific coasts, U.S.A.*) *Coastal Research*, v.12, 1996, p. 960-968.
- JUNG, G; J. Jung; S. Cho; H. Kim. *Evaluation of Road Settlements on the Soft Ground from GPR Investigations*. Proc.: Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, June, 2004, Delft, The Netherlands, 5p.
- KELLER, G. V. Rock and mineral properties, physical laws, electromagnetic induction and rock properties. *Elettromag. Meth. Appl. Geophys. Theory* 1, 1987, pp.13-48.
- KHWEIR, K. A. United Kingdom Overlay Design of Flexible Pavement: Determination of the Important Parameters; *Journal of Transportation Engineering*, v.138, 2011, pp .324-331.

KRYSIŃSKI, L.; SUDYKA, J. *Identificação das fendas do pavimento com o uso da técnica de GPR*. 07/2012, 1.730-0.703, 2012, pp. 44-50

LAI, W.; L.; Kou, S.C.; TSANG, W.F.; POON, C.S. Characterization of Concrete Properties From Dielectric using Ground Penetrating Radar; *Cement and Concrete Research*, 39, 2009, pp.687-695.

LENG, Z.; AL-QUADI, I. Flexible Pavement Quality Assurance Using Ground Penetrating Radar. *Transportation and Development Institute Congress*, 2011, pp. 617-627.

LI, C.; MIAO, L.; YUE, J. Research on detection to Moisture Content of Flexible Pavement by GPR. *GeoShanghai International Conference*, 2010, pp.420-426.

LIU, H.; SATO, M. In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array. *NDTeE, International*, v. 64, 2014, pp.65-71.

LOIZOS, A.; PLATI, C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using diferente ground penetrating radar analysis approaches. *NDT e E International*, v. 40, n.2, 2007, p.147–157.

LOIZOS, A; PAPAVALIIOU, V. Evaluation of foamed asphalt cold in- place pavement recycling using nondestructive techniques. *Journal of Transportation engineering*, v. 132, n. 12, pp. 970-978, 2006.

LOPES, F.M. *Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico - avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2012. 339p.

LOPES, O.A. *Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em trechos de pavimentos da cidade universitária da UFRJ*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), 2009. 185p.

LOSA, M.; LEANDRI, P.; R. BACCI, R. Monitoring and Evaluating Performance Requirementsof Flexible Road Pavements. *Transportation and Development Innovative Best Practices*, 2008, pp.511-516.

LOULIZI, A.; AL-QADI, I.L.; LAHOUAR, S. Optimization of Ground- Penetrating Radar Data to Predict Layer Thicknesses in Flexible Pavements. *J. Transp. Eng.* 2003, pp. 93-99.

MAIJALA, P. Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data: San Diego, California. *Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 8-13,1992, Rovaniemi, Finland, 1992, 365p.

MASER, K. R. Condition Assessment of Transportation Infrastructure Using Ground-Penetrating Radar. Proc. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 2, n. 2, 1996, pp. 94–101.

MASER, K. R. Detection of Progressive Deterioration in Bridge Decks Using Ground-Penetrating Radar. Proc., *Experimental Assessment of the Performance of Bridges*. Engineering Mechanics Division, *ASCE Convention*, Oct., 1986.

MEDINA, J.; MOTTA L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro-RJ: UFRJ, 2005.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. Solos e Rochas, *ABMS*, v.3, n.1, p. 3-26. Rio de Janeiro, 1980.

MELLETT, J.S. Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. *Journal of Applied Geophysics*, v.33, pp. 157–166, 1995.

MESHER, D.E., C.B. DAWLEY, J.L. DAVIS, and J.R. ROSSITER. Evaluation of New Ground-Penetrating Radar Technology to Quantify Pavement Structures. In *Transportation Research Record 1505*, TRB, *National Research Council*, Washington, D.C., 1995, pp. 17–26, 1995.

MONISMITH, C.L. Flexible Pavement Analysis and Design-A Half-Century of Achievement. *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice*. pp. 187-220, 2012.

MONISMITH, C.L.; DEACON, J.A. Fatigue of asphalt paving mixture. Proc. Of the American Society of Civil Engineers, *Transportation Engineering Journal*, v. 95, n. Te 2, USA, 1969.

MORCOUS, G.; ERDOGMUS, E. Accuracy of Ground-Penetrating Radar for Concrete Pavement Thickness Measurement. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 24, Issue 6, Dec. 2010, pp. 610–621, 2010.

MINER, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. *J. Applied Mechanics*, 12, A159-A164, 1945.

NI, J. and CHENG, W. Quality Control for Grouting under Rigid Pavement. *Pavements and Materials: ASCE*, Doi: 10.1061/47623(402)22, pp. 183-191, 2011.

NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, v. 66, pp.261–330, 2004.

OLHOEFT, G.R. Electrical properties of rocks. In: Touloukian, Y.S., Judd, W.R., Roy, R.F. Eds. , *Physical Properties of Rocks and Minerals*. *McGraw-Hill*, New York, pp. 257–330, 1981.

ORLANDO, L.; PEZONE, A; COLUCCI, A. Modeling and testing of high frequency GPR data for evaluation of structural deformation, *NDTeE International*, v. 43, pp. 216–230, 2010.

OWEN, T.R. Cavity detection using VHF hole electromagnetic techniques, *Proceedings of the Second Tunnel Detection Symposium*, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, U.S.. Army MERADOM, Ft. Belvoir, Virginia, pp. 126-141, July 21-23, 1981.

PÉREZ-GRACIA, F.; GARCÍA, F.G; ABAD, I.R. GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study. *Original Research Article NDT e E International*, v.41, Issue 5, Jul. 2008, Pages 341-353, 2008.

PESSOA, F.H.C. Avaliações funcional e estrutural de trechos de rodovias no distrito federal construídos com diferentes materiais. 210p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2012.

PINTO, S; PREUSSLER, E. *Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte Copiadora e Artes Gráficas Ltda., 2002. 269p.

PLATI, C.; LOIZOS, A. 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, Oct. 2013, p. 3-10.

PORSANI J. L.; BORGES, W.R.; ELIS, V.R.; DIOGO, L.A.; HIODO, F.Y.; MARRANO, A. (2004). Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.22, n. 3, p. 245-258.

PORSANI, J. L. *Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de rio claro e descalvado – SP*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 1999. 145p.

PRADO, R. L. A. *Sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: Um Estudo na Cidade de São Paulo – SP, Brasil*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 2000. 174p.

PUENTE, I.; SOLLA, GONZÁLEZ-JORGE, M.H.; ARIAS, P. Validation of mobile LiDAR surveying for measuring pavement layer Thicknesses and volumes. *NDTeE International*, v.60, pp. 70–76, 2013.

REZENDE, L. R.; SILVEIRA, L.R.; ARAÚJO, W.L. ; LUZ, M.P. *Reuse of Fine Quarry Wastes in Pavement: Case Study in Brazil*, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000997, 2014, 9p.

RODRIGUES, S.I.; PORSANI, J.L.; SANTOS, V.R.N.; DEBLASIS, P.A.D.; GIANNINI, P.C.F. GPR and inductive electromagnetic surveys applied in three coastal sambaqui (shell mounds) archaeological sites in Santa Catarina state, South Brazil. *Journal of Archaeological Science*, v. 36 pp. 2081–2088, 2009.

SAARENKETO, T. NDT transportation. In: Jol, H.M. (Ed.), *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2009.

SAARENKETO.T; ROIMELA. P. Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control., *Proceeding of the Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar*, v. 2, Lawrence KS, 1998, pp. 461-466.

SAARENKETO, T.; SCULLION, T. Road evaluation with ground penetrating. *Radar Journal of Applied Geophysics*, v. 43, pp. 2000, 119-138.

- SANDMEIER, K. J. REFLEX Version 7.5, Windows 9x/2000/NT. Program for the Processing of Seismic, Accoustic or Eletromagnetic Reflection, Refraction and Transmission Data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 2014, 209p.
- SANDMEIER, K. J. REFLEX Version 6.0, Windows 9x/2000/NT. Program for the Processing of Seismic, Accoustic or Eletromagnetic Reflection, Refraction and Transmission Data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 2011, 209p.
- SANDMEIER, K.J. REFLEXW Version 7.2, Windows 9x/2000/NT/XP/VISTA/7. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 2010, 209p.
- SANDRONI, S.S.; SAYÃO, A.S.F.J. Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1., 1992. [SI]: COBRAE, 1992. v. 2, p. 523-536.
- SANTOS, C.R.G. *Investigando a Estrutura do Pavimento por Método Não-Destrutivo (GPR)*. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2011. 263p.
- SANTOS, J.D. et al. Caracterização Dinâmica de Solos Lateríticos de Rodovias do Estado de Mato Grosso. *29ª RAPV*, Cuiabá-MT, v.2, 1995, pp.124-144.
- SCHMIDT, R. A. Sublimation of wind transported snow- a model, U. S. forest department of agriculture, *Fort Collins*, May, 24, 1972. Service research paper no. RM-90, Rocky Mountain forest range experiment station, U. S.
- SCULLION, T.; CHEN, D.H. Forensic Studies: A Key Tool for Directing Future Research. *GeoHunan International Conference*, 2009, pp.87-95.
- SHANG, J. Q. ; UMANA, J.A.; BARTLETT, F.M.; ROSSITER, J.R. Measurement of Complex Permittivity of Asphalt Pavement Materials. *Journal of Transportation Engineering*; pp. 347-356, 1999.
- SILVA, L. A. *Aplicação Geofísica para a Caracterização do Perfil do Solo de uma Vertente Associada a Processo Erosivo Linear no Município de Sorriso- MT*. Dissertação (Mestrado), 2004, 175p.
- SOLLA, M.; GONZÁLEZ-JORGE, H.; VARELA, M.; LORENZO, H.; (2013). Ground-Penetrating Radar for Inspection of In-Road Structures and Data Interpretation by Numerical Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE; 2013, pp.749-753.
- SOLLA, M.; RIVEIRO B. LORENZO, H. Ancient stone sridge suveying by Ground-penetrating radae and numerical modeling methods. *Journal of bridge engineering*, v.19, n .1, 2014, p. 110-119.
- STRATTON, J.A. Electromagnetic Theory. *McGraw Hill Book Company*, Inc., USA, 1941, 609p.
- STRIEDER, A.J.; GONÇALVES, F.P.; SALVADORETTI, P.; CERATTI, J.A.P.; KLEIN, S.L.; HIRAKATA, A.M. Aplicação de Geo-Radar em Investigações de Pavimentos

Rodoviários: Estudo de Casos em Estruturação Estratigráfica e em Degradação.. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1999, São Pedro (SP). *Anais... 9º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*. São Paulo (SP) - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1999. v. CD-ROM. p. 1-13.

STRONGMAN, K.B. Forensic applications of ground penetrating radar. In: Pilon J, editor. *Ground Penetrating Radar*. Ottawa, Canada: Geological Survey of Canada Paper 90-4, 1992.

STRYK, S.; MATULA, R.; POSPISIL, K. Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Original Research Article Journal of Applied Geophysics*, v.97, 2013, p. 11-26.

TAREFDER, R. A., BATEMAN, D. Determining the optimal perpetual pavement structure. Ohio Research Institute for Transportation and the Environment. *Paper presented at the Proceedings for the International Conference on Perpetual Pavement*, Columbus, OH, 2009, pp. 255.

THIERBACH, R. Reflexões eletromagnéticas em depósitos de sal. *J. Geophys.* v. 40, 1973, p. 633-637.

TOSTI, F.; PATRIARCA, C.; SLOB, E.C.; BENEDETTO, A.; LAMBOT, S. Clay content evaluation in soils through GPR signal processing. *Journal of Applied Geophysics*, v.97, 2013, pp. 69-80.

ULRIKSEN, C.P.F. Application of impulse radar to civil engineering. *Pissertation. Lund University of Technology*, Lund, Sweden. 1982. 175 pp.

UNTERBERGER, R.R. Propagação Radar em sal-gema. *Geophys. Prosp.*, v. 26, 1978. pp. 312-328.

VAN DAM, R. L Iron oxides as a cause of GPR reflections, *Geophysics*, v. 67, 2001, pp. 536-545.

VIEIRA, R.; GONDOLFO, O.C.B. Investigando a Estrutura do Pavimento por Método Não Destrutivo (GPR). *42ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 16ª ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, Gramado-RS, 2013, 12p.

WAITE A.H.; SCHMIDT S.J. Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow, Institute of Radio Engineers, *International Convention Record*, Part 5, pp. 38-53, 1961.

WARD, O. S. H.; HOHMANN, G. W. *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications in Exploration Geophysicists*, Tulsa, OK, 1987, pp. 131-311.

WILLET, D.A.; MAHBOUB K.C.; RISTER, B. Accuracy of Ground-Penetrating Radar for Pavement-Layer Thickness Analysis. *Journal Of Transportation Engineering*, 2006, pp. 96-103.

XU, P.; F. M. ; WANG, X. L. Li , Y. C. CAI. Comparisons Between New and Traditional., NDT Devices and Control Methods fo Construction Quality of Highway Subgrade. *Geotechnical Special Publication*, n. 215, ASCE, 2011, pp. 83-91.

YEHIA, S.; ABUDAYYEH, O.; NABULSI, S.; ABDELQADER, I. GPR Imaging Evaluation of the Napier Avenue Interchange on I-94 Culvert. *Computing in Civil Engineering*, 2005, pp. 1-7.

YELF, R; YELF, D. *Where is True Time Zero? Electromagnetic Phenomena*, v.7, n.1, 18, 2006, pp.158-163.

ZENG, X., MCMECHAN, G.A., CAI, J., CHEN, H.W. (1995). Comparison of ray and Fourier methods for modeling monostatic ground-penetrating radar profiles: *Geophysics*, v 60, 1995, p.1727-1734.

ZHONG, Y.; ZHANG, B.; WANG, F.; LI, J.; FENG, J. (2011). Method for Identifying the Depth of Voids beneath Rigid Pavement Slabs Based on GPR. Contemporary Topics on Testing, Modeling, and Case Studies of Geomaterials, Pavements, and Tunnels, *Geotechnical Special Publication*, n. 215, 2011, pp. 32-40.