



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO

**ANÁLISE EMPÍRICO-MECANÍSTICA DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS
MÓDULOS RESILIENTES NOS PARÂMETROS DE
DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E
SUBLEITO**

Campina Grande – PB

2021

LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO

**ANÁLISE EMPÍRICO-MECANÍSTICA DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS
MÓDULOS RESILIENTES NOS PARÂMETROS DE
DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E
SUBLEITO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: D. Sc. John Kennedy Guedes Rodrigues

Coorientador: D. Sc. Fabiano Pereira Cavalcante

Campina Grande – PB

2021

S587a

Silvério, Letícia Carlos.

Análise empírico-mecânica de pavimento asfáltico para verificação da influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade das camadas do pavimento e subleito / Letícia Carlos Silvério. – Campina Grande, 2021.

130 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Prof. Dr. Fabiano Pereira Cavalcante".

Referências.

1. Pavimento. 2. Retroanálise. 3. Análise Probabilística. 4. Mecânica e Gerência de Pavimentos. 5. Geotecnia. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Cavalcante, Fabiano Pereira. III. Título.

CDU 625.8(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTOR: LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO

TÍTULO: ANÁLISE EMPÍRICO-MECANÍSTICA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MÓDULOS RESILIENTES NOS PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS DO PAVIMENTO E SUBLEITO.

Área de Concentração: Geotecnia

Dissertação defendida em: ___/___/___

Dissertação aprovada em: ___/___/___

Pela Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. D. Sc. (Coorientador) Fabiano Pereira Cavalcante
JBR Engenharia Ltda.

Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. D. Sc. Jonny Dantas Patrício
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. D. Sc. (Examinador Externo) Ricardo Almeida de Melo
Universidade Federal da Paraíba - UFPB



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. FABIANO PEREIRA CAVALCANTE - UFPB - COORIENTADOR, DR.ª LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFCG – EXAMINADORA INTERNA, DR. JONNY DANTAS PATRÍCIO - UFCG - EXAMINADOR EXTERNO, DR. RICARDO ALMEIDA DE MELO - UFPB - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 11/2021). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ANÁLISE PROBABILÍSTICA PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MÓDULOS RESILIENTES NOS PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 09:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O CANDIDATO FOI ARGUIDO ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS DA COMISSÃO, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, ESTE CONCEITO PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O CONCEITO “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 25 DE FEVEREIRO DE 2021**



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2021, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2021, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 25/02/2021, às 13:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Letícia Carlos Silverio, Usuário Externo**, em 27/02/2021, às 18:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1301743** e o código CRC **70B7CD6F**.

Aos meus pais João e Jucielma, irmãos
Leandro e Lívia, e avós João e Carmelita pelos
ensinamentos de honestidade, força, coragem
e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, por ter me dado forças para vencer cada obstáculo e nunca desistir dos meus sonhos, por todas as bênçãos concedidas durante a minha vida e por sempre me mostrar o melhor caminho em tempos difíceis.

Ao meu orientador, Professor Kennedy Guedes, primeiramente agradeço pela oportunidade concedida, pela paciência e compreensão. Agradeço também pela dedicação, disponibilidade, incentivos, conselhos, ensinamentos e críticas, que foram fundamentais não só para a realização deste trabalho, como também para o meu crescimento na vida pessoal e profissional.

Ao meu coorientador, Fabiano Cavalcante, por demonstrar tanta vontade em dividir o seu conhecimento e disponibilidade em me auxiliar com todas as minhas dúvidas, o que tornou possível a conclusão deste trabalho, além de ser um profissional admirável, exemplo de humildade, que nos inspira a continuar nessa jornada do conhecimento e de crescimento profissional.

Aos professores Jonny Dantas Patricio e Ricardo Almeida De Melo, pelo privilégio em tê-los como membros da banca examinadora e colaborar com o enriquecimento científico deste trabalho.

À Professora Lêda Lucena, a quem me espelho, por ir além das suas funções como profissional, pelo exemplo de humanidade e generosidade, por toda dedicação, apoio, incentivos, conselhos e ensinamentos para o decorrer da minha vida acadêmica e profissional. Pessoa por quem cultivo grande respeito e admiração, principalmente por todo apoio e carinho que me foram ofertados.

Aos meus pais João e Jucielma, agradeço imensamente pelos incentivos, suporte, cuidado e principalmente por, nas dificuldades que apareceram em meu caminho, se fazerem meus alicerces, me ajudando, motivando, encorajando e sobretudo, me amando incondicionalmente durante toda a minha vida, e não só acreditar em meus sonhos, mas também vivê-los comigo.

Aos meus avós e familiares que mesmo à distância, me deram forças e acreditaram em mim durante esta jornada. Em especial gostaria de agradecer aos meus irmãos Leandro e Livia, por toda cumplicidade, cuidado e amor incondicional.

Aos amigos, que foram como minha família desde o meu período de graduação até o mestrado, Ablenya, Conrado, Christian, Daniel, Paulo Roberto e Priscila, meu eterno obrigado por todo o apoio técnico e emocional que eu jamais saberia descrever, por todas as contribuições e momentos de descontração e lazer.

À todos os demais amigos que se fizeram presentes na minha jornada, e principalmente Amanda, por toda compreensão, amor, cumplicidade, amizade e incentivo, por todas as palavras de conforto que me reafirmaram como alguém capaz e importante todos os dias, por atravessar comigo tempos difíceis e sobretudo, ser meu ponto de equilíbrio, externo minha infinita gratidão.

À JBR ENGENHARIA, pelo fornecimento de informações e por todo o suporte técnico necessário para o desenvolvimento desta pesquisa.

À equipe do laboratório de engenharia de pavimentos, em especial Jadilson e Joseildo, pela manutenção das atividades, auxílio com ensaios e também pelos bons momentos de descontração.

À todos os discentes e docentes do curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em especial Cacildo Cavalcante, Paulo Marinho, Danilo Brito e Carina Silvani, pela atenção e colaboração, ao indicar e dividir livros, por todas as aulas esclarecedoras e aprendizados durante o programa de mestrado.

À Liege Mirtes e Socorro Farias, que me auxiliaram no enfrentamento das dificuldades envolvidas na pesquisa.

Por fim, meu agradecimento e reconhecimento a todos os que diretamente ou indiretamente me auxiliaram para a realização deste projeto.

RESUMO

O modal rodoviário é predominante no Brasil, as rodovias demandam infraestrutura com bom desempenho de modo que não ocorra sua ruptura prematuramente e apresente a durabilidade estimada em projeto. As camadas de um pavimento devem trabalhar em conjunto para que haja compatibilidade de rigidez entre seus materiais, evitando-se gradientes elevados de módulos de resiliência (MR) entre camadas. Sendo assim, a estrutura, as características dos materiais e a rigidez de cada camada são parâmetros importantes e diretamente relacionados com a avaliação da compatibilidade de deformações e tensões em um pavimento, que devem minimizar o acúmulo de deformações permanentes, e evitar que a repetição de cargas não cause o trincamento excessivo do revestimento por fadiga prematuramente, considerando o desempenho do pavimento a curto médio e longo prazo. O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência dos módulos resilientes de todas as camadas no comportamento mecânico de um subtrecho homogêneo da rodovia federal BR-230, por meio da análise probabilística, procurou-se identificar as camadas críticas que afetaram o dimensionamento de reforço das estruturas. Este estudo se desenvolveu por meio da avaliação estrutural do pavimento, em que foram utilizados dados de levantamentos deflectométricos realizados com o equipamento Falling Weight Deflectometer (FWD), que tornaram possível realizar a retroanálise do pavimento pelo programa BAKFAA e a análise de deslocamentos, tensões e deformações com o programa ELSYM5, necessários para a análise de compatibilidade da estrutura e para a análise probabilística do pavimento realizada com o Método FOSM (First Order Second Moment). Este estudo identificou que os programas BAKFAA e ELSYM5 apresentaram uma correlação de mais de 99% entre as bacias teóricas calculadas, o que indicou compatibilidade na análise de múltiplas camadas elásticas implementada nestes programas, com valores de respostas estruturais similares. A análise probabilística com o método FOSM permitiu inferir a camada de base como a mais crítica, e os módulos de resiliência da camada de revestimento e base como o módulo mais influente para a variância da diferença de tensões e da deformação de tração no revestimento, e conseqüentemente na vida de fadiga desta camada. Este estudo identificou o módulo resiliente do subleito como o módulo mais influente para as deformações de compressão e tensões verticais no topo do subleito, seguida do módulo de resiliência da sub-base e revestimento. Esses dados indicam a necessidade de um melhor dimensionamento de reforço

de base, maior controle execução e compactação de modo a obter os módulos de rigidez adequados ao projeto e garantir a homogeneidade da camada, diminuindo assim as áreas com alta concentração de tensão em relação ao que foi definido no projeto executivo.

Palavras-chaves: Pavimento; Retroanálise; Análise probabilística.

ABSTRACT

Brazilian cargo operates predominantly with road transportation, roads demand infrastructure with good performance so that it does not rupture prematurely and presents projects estimated durability. Pavement layers must work together so that there is stiffness compatibility between its materials, avoiding high gradients of resilience modules (MR) between layers. Thus, structure, characteristics of the materials and the stiffness of each layer are important parameters and directly relate to the evaluation compatibility of deformations and stresses in the pavement. Which should minimize the accumulation of rutting deformation, and prevent that repetition of loads does not cause excessive cracking of the surface by premature fatigue, considering the performance of the pavement in the short, medium and long term. The main objective of this research was to evaluate the influence of resilience modules of all layers on the mechanical properties of a homogeneous segment of federal highway BR-230, through probabilistic analysis with the FOSM Method, sought to identify the critical layers that affected the design of the structures reinforcement. This study was performed through structural evaluation of the pavement, using data from deflectometric surveys carried out with the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment, which made it possible to do retroanalysis of the pavement by the BAKFAA program and the analysis of displacements, stresses and deformations with the ELSYM5 program. Which is necessary for compatibility analysis of the structure and for probabilistic analysis of the pavement carried out with the FOSM Method (First Order Second Moment). This study identified that programs BAKFAA and ELSYM5 programs showed a good correlation between the theoretical calculated basins, which indicated compatibility in the multiple elastic layer analysis implemented in these programs, with similar structural discovered values. The probabilistic analysis with the FOSM method allowed to infer the base layer as the most critical. Resilience modules of the surface and base layers as the most main module for the variance of the stress difference and tensile strain in the surface, and consequently in the fatigue lifespan of this layer. This study identified the natural subgrades resilience module as the most main module for compression strain and vertical stresses at the top of the subgrade, followed by the resilience module of subbase and surface courses. These data indicate the need for a better dimensioning of base reinforcement, greater control of execution and compaction in order to obtain suitable stiffness modules for the project and

guarantee the layer homogeneity, decreasing thus the areas with high concentration of tension in relation to what was defined in the executive project.

Keywords: Pavement; Retroanalysis; Probabilistic analysis.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivos	25
1.1.1 Objetivo Geral	25
1.1.2 Objetivos Específicos	25
1.2 Estrutura do trabalho	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Pavimentos	27
2.2 Avaliação de Pavimentos	34
2.3 Avaliação estrutural de pavimentos	36
2.4 Deflexão elástica reversível	38
2.5 Ensaio não destrutivos	41
2.5.1 Equipamentos de carregamento quase estático	41
2.5.2 Equipamentos de carregamento vibratório	46
2.5.3 Equipamentos de carregamento por impulso	47
2.6 Ensaio destrutivos	51
2.6.1 Ensaio triaxiais dinâmicos	51
2.6.2 Módulo de resiliência dos solos	54
2.6.3 Módulo de resiliência de misturas asfálticas	55
2.6.4 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral	56
2.7 Análise de tensões e deformações em solos	59
2.7.1 Definições básicas e sinais de convenção	61
2.8 Retroanálise de módulos de resiliência	62
2.8.1 Programas computacionais	65
2.8.2 Critério de parada	67
2.9 Análise probabilística do pavimento	68

3 MATERIAIS E MÉTODOS	71
3.1 Pavimento: caracterização do trecho analisado	72
3.2 Estudo de tráfego	74
3.3 Ensaios não destrutivos	76
3.4 Retroanálise da Bacia de Deflexão	79
3.5 Análise de consistência e compatibilidade na retroanálise	84
3.5.1 Avaliação da evolução das deflexões	85
3.5.2 Contribuição individual das camadas para a deflexão	87
3.5.3 Hierarquia das camadas do pavimento	90
3.5.4 Refinamento da retroanálise	90
3.5.5 Compatibilidade na retroanálise entre os programas	92
3.6 Análise probabilística do pavimento	93
3.6.1 Análise de danos do pavimento	93
3.6.2 Estudo de sensibilidade do pavimento	95
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	97
4.1 Introdução	97
4.2 Retroanálise da bacia de deflexão	97
4.3 Análise de consistência e compatibilidade na retroanálise	103
4.4 Análise probabilística do pavimento	105
4.4.1 Análise de danos do pavimento	105
4.4.2 Estudo de sensibilidade do pavimento	107
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
5.1 Sugestões para pesquisas futuras	125
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimento: (a) Pavimento rígido; (b) Pavimento rígido; (c) Pavimento flexível	28
Figura 2 - Estrutura do pavimento	29
Figura 3 - Deformação em pavimentos flexíveis	31
Figura 4 - Defeitos por trincamento e afundamento a partir de repetição de cargas	31
Figura 5 - Diferentes bacias deflectométricas para uma mesma deflexão máxima	39
Figura 6 - Ilustração da hipótese adotada pelo DNIT	39
Figura 7 - Esquema do ensaio de placa	42
Figura 8 - Esquema ilustrativo da Viga Benkelman	43
Figura 9 - Esquema ilustrativo da Viga Benkelman	43
Figura 10 - Ensaio Viga Benkelman	45
Figura 11 - Pontos de avaliação da viga Benkelman	45
Figura 12 - Esquema de aplicação de força do Dynaflect	47
Figura 13 - Falling Weight Deflectometer	48
Figura 14 - Princípio fundamental do FWD	48
Figura 15 - Disposição dos geofones no FWD	50
Figura 16 - Configuração de carga do FWD	50
Figura 17 - Exemplo de Equipamento Triaxial	52
Figura 18 - Equipamento Triaxial dinâmico de compressão axial	53
Figura 19 - Tensões provocadas por uma carga de roda num pavimento	54
Figura 20 - Esquema do ensaio de compressão diametral	56
Figura 21 - Compressão diametral – distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametrais: (a) – horizontal); (b) – vertical	58
Figura 22 - (a) ensaio de tração e (b) diagrama tensão vs. Deformação típico	60
Figura 23 - todas as tensões apresentadas são adotadas como sendo de sinal positivo	61
Figura 24 - Variabilidade dos parâmetros de cálculo na Análise Probabilística do comportamento de pavimento	69
Figura 25 - Mapa de localização do trecho estudado	72
Figura 26 - Segmentos homogêneos da BR-230/PB	73
Figura 27 - Seção transversal da pista duplicada	74
Figura 28 - Bacias deflectométricas do subtrecho homogêneo	78
Figura 29 - Página de iniciação do software BAKFAA	80

Figura 30 - Estrutura de quatro camadas utilizada como dados de entrada no BAKFAA	81
Figura 31 - Exemplo de dados de entrada inseridos no BAKFAA	83
Figura 32 - Exemplo de retroanálise realizada	84
Figura 33 - Arquivos necessários para a execução do programa ELSYM5	85
Figura 34 - Exemplo de dados de caracterização inserido no arquivo “DADOS”	86
Figura 35 - Exemplo de tela do arquivo “OUT” com dados de saída	87
Figura 36 - Interface superior de cada camada	88
Figura 37 - Bacia de deflexão ponto a estudo de cada estaca	102
Figura 38 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da deflexão máxima reversível no topo da camada de revestimento	112
Figura 39 - Variação da deflexão máxima reversível no topo do revestimento, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória	113
Figura 40 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da diferença de tensões no revestimento	114
Figura 41 - Variação da diferença de tensões na base do revestimento, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória	115
Figura 42 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da deformação de tração na base do revestimento	116
Figura 43 - Variação da deformação de tração na base do revestimento, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória	118
Figura 44 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da deformação de compressão no topo do subleito	119
Figura 45 - Variação da deformação de compressão no topo do subleito, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória	120
Figura 46 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da tensão vertical no topo do subleito	121
Figura 47 - Variação da tensão vertical no topo do subleito, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória	122

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Número de repetições do eixo padrão	75
Tabela 2 - Classificação das vias	76
Tabela 3 - Bacias de deflexões do subtrecho homogêneo SH-04	77
Tabela 4 - Estrutura do pavimento no subtrecho homogêneo SH-04	81
Tabela 5 - Módulos de resiliência utilizados para análise probabilística	94
Tabela 6 - Localização dos parâmetros de deformabilidade	94
Tabela 7 - Retroanálise do subtrecho homogêneo SH 04 da BR-230/PB Lote III	98
Tabela 8 - Valores usuais de Módulo de Resiliência	99
Tabela 9 - Faixa aceitável de CV's utilizada em projetos de pavimentos	100
Tabela 10 - RMSE das deflexões retroanalizadas em ordem decrescente	101
Tabela 11 - RMSE dos módulos resilientes utilizando o método de diminuição do módulo	103
Tabela 12 - RMSE dos módulos resilientes utilizando o método de acréscimo do módulo	103
Tabela 13 - Comparação entre bacias deflectométricas do BAKFAA versus ELSYM5	104
Tabela 14 - Dados relacionados aos parâmetros de deformabilidade usadas na análise probabilística do pavimento	106
Tabela 15 - Dados necessários para a análise probabilística do pavimento	108
Tabela 16 - Valores das derivadas das variáveis aleatórias do pavimento	109
Tabela 17 - Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	110
Tabela 18 - Valores das influências das variáveis aleatórias do pavimento	111

Lista de Símbolos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
C_r	Contribuição de revestimento para a deflexão total do pavimento
C_b	Contribuição da base para a deflexão total do pavimento
C_{sb}	Contribuição da sub-base para a deflexão total do pavimento
C_{sl}	Contribuição do subleito para a deflexão total do pavimento
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
cm	Centímetro
cmm	Centésimo de milímetro
cm ²	Centímetros Quadrados
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
CV	Coefficiente de variação
D	Diâmetro do corpo-de-prova
D0	Deflexão máxima reversível, que ocorre no centro da área carregada (rx = 0cm)
D1	Deflexão a 20 cm do ponto de aplicação de carga
D2	Deflexão a 30 cm do ponto de aplicação de carga
D3	Deflexão a 45 cm do ponto de aplicação de carga
D4	Deflexão a 60 cm do ponto de aplicação de carga
D5	Deflexão a 90 cm do ponto de aplicação de carga
D6	Deflexão a 150 cm do ponto de aplicação de carga

D25	Deflexão a 25 cm do ponto de prova
D60	Deflexão a 60 cm do ponto de aplicação de carga
Da	Deflexão à distância a
D _{adm}	Deflexão admissível
Dc	Deflexão característica
dci	Deflexão calculada para o ponto de ensaio i
dmi	Deflexão medida no ponto de ensaio i
Dr	Deflexão no ponto referente à distância radial r
D _{Z_r}	Deflexão no topo da camada de revestimento
D _{Z_b}	Deflexão no topo da camada de base
D _{Z_{sb}}	Deflexão no topo da camada de sub-base
D _{Z_{sl}}	Deflexão no topo da camada de subleito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESRD	Eixo simples e com roda dupla
F	Carga de ruptura
F	Função
f ₀	Fator campo-laboratório
FAA	Federal Aviation Administration
FF	Interface com plena aderência
FHWA	Federal Highway Administration
FOSM	First Order, Second Moment
FWD	Falling Weight Deflectometer
g	Aceleração da gravidade
h	Altura de queda
H	Altura do corpo-de-prova
HEF	Espessura efetiva, em cm
HEQ	Espessura do pavimento equivalente (cm)
Hz	Hertz
I[Y]	Influência da variável independente
IGG	Índice de Gravidade Global
ISC	Índice de Suporte California

IP	Instrução de Projetos
k	Constante de mola do sistema de amortecedores
Kgf	Quilograma-Força
kgf/cm ²	Quilograma-força por centímetro quadrado
ki	Parâmetros obtidos experimentalmente
Km	Quilômetro
KN	Quilo Newton
KPa	Quilo Pascal
l ₀	Comprimento característico
lb/pol ²	Libre por polegada ao quadrado
Lf	Leitura final
Li	Leitura inicial
LTPP	Long-Term Pavement Performance
LWD	Light Weight Deflectometer
m	Metro
M	Massa do peso que cai
Mb	Módulo resiliente da base
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de resiliência
MR _f	Módulo de resiliência final
MR _i	Módulo de resiliência inicial
Mr	Módulo resiliente do revestimento
Msb	Módulo resiliente da sub-base
Msl	Módulo resiliente do subleito
n	Número de sensores do FWD
N	Número de solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2tf
NBR	Norma brasileira
NF	Interface sem aderência
Nf	Número de repetições de carga à fadiga

Np	Número cumulativo de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf para o período de projeto
P	Carga aplicada (kgf)
p	Pressão de contato
PNV	Plano Nacional Viário
PMQ	Pré-mistura à quente
PPA	Plano Plurianual
PRO	Procedimento
Q	Carga aplicada
R	Raio de curvatura
r	Distância radial
RMS	Raiz Quadrática Média
RMSE	Raiz Quadrática Média dos Erros Percentuais
$RMSE_{MR_f}$	Raiz Quadrática Média dos Erros Percentuais final
$RMSE_{MR_i}$	Raiz Quadrática Média dos Erros Percentuais inicial
RT	Resistência a Tração por Compressão Diametral
s	Segundo
SEST	Serviço Social do Transporte e Serviço Nacional de Aprendizagem
SENAT	do Transporte
SH	Subtrecho homogêneo
tf	Tonelada-força
USACE	United States Army Corps of Engineers
V	Variância
V[xi]	Variância da variável aleatória i
WSDT	Washington State Department of Transportation
x	Coordenada x
x_i	Variável aleatória não correlacionada i
\bar{x}_i	Valor médio da variável aleatória i
y	Coordenada y
Y	Variável independente (parâmetro)
z	Coordenada z
Z	Profundidade

\bar{Y}	Valor médio da variável independente Y
%	Percentual;
°C	Graus Celsius
E*	Módulo Dinâmico
μm	Milésimo de milímetro (micrômetro)
ν	Coefficiente de Poisson
∂	Derivada parcial
σ	Tensão
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Pressão confinante
σ_d	Tensão desvio aplicada repetidamente ($\sigma_d = \sigma_d - \sigma_3$)
σ_t	Tensão de tração
σ_v	Tensão vertical no topo do subleito
σ_c	Tensão de compressão no topo do subleito
σ_x	Tensão no eixo x
σ_y	Tensão no eixo y
σ_z	Tensão no eixo z
ϵ_c	Deformação específica de compressão
ϵ_r	Deformação específica axial resiliente
ϵ_t	Deformação específica de tração
$\Delta\sigma$	Diferença entre as tensões horizontal e vertical no ponto
τ_{ij}	Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo i na direção j
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo x na direção y
τ_{xz}	Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo x na direção z
τ_{yx}	Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo y na direção x
τ_{yz}	Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo y na direção z

τ_{zy} Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo z na direção y

τ_{zx} Tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo z na direção x

1. INTRODUÇÃO

O Relatório Gerencial de 2019 da Confederação Nacional de Transportes (CNT) aponta que o modal rodoviário é responsável por 61% do transporte de mercadorias e de 95% do transporte de passageiros no território nacional, no entanto, apesar dela estar crescendo nos últimos anos, verifica-se que ainda é uma porção muito pequena. Visto que, de acordo com CNT (2019), as rodovias brasileiras totalizam 1.720.700 km, sendo apenas 12,4% desse total, ou seja, 213.453 km, pavimentadas.

De acordo com o Ministério do planejamento, Orçamento e Gestão, em seu Plano Plurianual (PPA, 2016-2019) as novas concessões rodoviárias terão forte impacto na melhoria do transporte do país, visto que, foi previsto somente para o ano de 2016 a concessão de 4.371 km de rodovias que, além de terem os serviços ampliados aos usuários, terão melhoramentos importantes como duplicação de trechos, acréscimo de terceiras faixas, implantação de serviços de atendimento e socorro ao usuário, melhoria da sinalização, entre outras medidas. Além de investimentos e melhorias em rodovias já concedidas, nos próximos da ordem de R\$ 15,3 bilhões.

Do ponto de vista físico o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, implantadas após a terraplenagem, que estão sobrepostas horizontalmente ao semiespaço infinito, ou seja, construídas sobre o terreno de fundação da estrutura, conhecido como subleito (BERNUCCI ET AL.; 2010).

Sua função é manter-se íntegro às solicitações advindas dos esforços atuantes do tráfego, ou seja, da passagem de cargas cíclicas provenientes dos eixos dos veículos com rodas flexíveis (pneus) que se apoiam diretamente sobre a fundação, pelo tempo de vida útil para o qual foi projetado, proporcionando aos usuários uma superfície adequadamente resistente ao desgaste, com textura e declividade capazes de oferecer boas condições de rolamento, conforto e segurança (BERNUCCI ET AL.; 2010; CAVALCANTE, 2005).

Ainda existe imprecisão nos métodos tradicionais de dimensionamento das estruturas dos pavimentos apesar da grande variedade de programas que utilizam a retroanálise dos módulos das camadas, pois são utilizados métodos empíricos com baixa confiabilidade das previsões de desempenho em seus cálculos (LOPES, R. A, 2019).

Assim, a engenharia rodoviária tem objetivado estabelecer o aprimoramento dos métodos de dimensionamentos e dos modelos de previsão de desempenho, por meio de métodos mecanístico-empíricos, que possuem uma abordagem elástico-linear e elástico não linear, por meio de programas computacionais e trechos experimentais que buscam modelos de previsão de desempenho dos pavimentos, de maneira que se possam prognosticar os mecanismos de deterioração relevantes que atuam no declínio dos índices de serventia dos pavimentos ao longo de sua vida útil (SANTOS ET AL.; 2015).

Estes modelos são funções que associam as condições estruturais, funcionais e de deterioração superficial do pavimento, às suas peculiaridades, sob condições climáticas e de tráfego, à evolução dos defeitos de superfície e ao decréscimo dos índices de serventia (LOPES, R. A, 2019).

Segundo Santos et al (2015) os principais tipos de degradação de pavimentos flexíveis são o trincamento e o afundamento e o afundamento de trilha de roda das camadas asfálticas, estando relacionados com a estrutura que o pavimento possui e o tráfego atuante na via. Por serem apresentados no revestimento, fazem com que seja possível identificar duas formas diferentes de sollicitação mecânica: flexão repetida que causa fissuras de fadiga e compressão simples que produz acúmulo de deformação permanente. Dessa forma, os danos estruturais em pavimentos acontecem principalmente por aplicações de cargas elevadas na estrutura ou devido ao grande número de repetições de passagem das rodas dos veículos.

O afundamento de trilha de roda é o defeito predominante nas rodovias brasileiras, visto que o método do DNER (atual DNIT) baseia-se primordialmente na limitação quanto às deformações permanentes e tensões que possam ocasionar a ruptura por cisalhamento dos solos de base, sub-base e subleito. Entretanto, não há consideração quanto à limitação das deformações recuperáveis ou resilientes, cuja repetição sob o efeito do tráfego resulta na ruptura por fadiga dos revestimentos asfálticos (CAVALCANTE, 2005).

A avaliação estrutural de pavimentos por ensaios destrutivos e não-destrutivos tomou grande impulso. No primeiro caso, são coletadas amostras das camadas do pavimento para obtenção das informações desejadas através da inspeção visual das camadas e caracterização de ensaios de laboratório. No segundo caso, são realizados levantamentos de dados que não danificam o pavimento para obtenção das informações desejadas, como a deformabilidade

resiliente dos materiais na condição “in situ”, que só pode ser determinada a partir da interpretação das bacias deflectométricas obtidas com o FWD ou Viga Benkelman (RODRIGUES, 1995).

Neste cenário, Cavalcante (2010) afirma que a retroanálise dos módulos resilientes das camadas do pavimento tem sido uma importante ferramenta, utilizada há mais de quatro décadas, para avaliar e gerenciar pavimentos, como também, para dimensionar pavimentos novos, tendo o critério fundamental a determinação dos módulos resilientes que levam ao melhor ajuste entre a bacia de deflexão medida em campo e a bacia calculada, por meio de um sistema iterativo onde, tendo-se os dados da estrutura, como espessuras das camadas e aos respectivos coeficientes de Poisson. Dentre os programas para retroanálise de bacias deflectométricas que têm sido mais utilizados, estão: BACKMEDINA, ELMOD, EVERCALC, BAKFAA, RETROANA, RETRAN2C e REPAV.

A Teoria da elasticidade das múltiplas camadas e as equações numéricas desenvolvidas por Boussinesq, Burmister e por outros pesquisadores, juntamente ao avanço acelerado da tecnologia dos computadores e dos ensaios de laboratório, colaborou para o desenvolvimento de programas de multicamadas elásticas e viscoelásticas. O aperfeiçoamento desses programas de cálculo de tensões e deformações viabilizou a concepção de métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento, que permitem a análise das estruturas escolhidas para o pavimento. São programas de cálculo de tensões e deformações o BISAR, ELSYM5, KENLAYER, JULEA e FEPAVE (LOPES, R. A, 2019).

O presente estudo objetiva a avaliação das condições estruturais do pavimento, por meio da retroanálise de módulos de resiliência a partir de bancos de dados de bacias deflectométricas medidas com deflectômetro de impacto do tipo FWD, procurando identificar, utilizando um estudo probabilístico sobre os principais parâmetros da estrutura dos pavimentos, o quanto os parâmetros de deformabilidade da estrutura examinada poderão ser influenciados pelos módulos de resiliência, bem como, verificar os parâmetros de deformabilidade que se adequam aos admissíveis para diferentes tipos de tráfego e vida útil, e, com isso, identificar os fatores críticos e que requerem maior controle durante a sua construção.

A escolha da Rodovia BR-230/PB para a realização desta pesquisa foi motivada devido a constatação de trincamentos prematuros generalizados nas trilhas de roda interna e

externa, de defeitos do tipo “couro de jacaré” (classes 2 e 3) e de bombeamento de finos. Tais informações foram obtidas a partir de Cavalcante (2005).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por fundamento verificar a influência dos módulos resilientes das camadas do pavimento nos parâmetros de deformabilidade, no número de passadas permitidas e no dano do pavimento com base em métodos probabilísticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- estimar os módulos de resiliência do pavimento por meio da retroanálise das bacias deflectométricas do pavimento a partir de dados obtidos com ensaio não destrutivo de Falling Weight Deflectometer (FWD);
- realizar uma análise de consistência e compatibilidade dos resultados das bacias deflectométricas obtidas a partir do BAKFAA com os adquiridos pelo ELSYM5;
- calcular os valores da deflexão máxima reversível, diferença de tensões na camada do revestimento, deformação de tração na base do revestimento, deformação de compressão no topo do subleito e tensão vertical no topo do subleito, a fim de se avaliar as características estruturais pela análise de danos dos pavimentos;
- realizar estudo probabilístico das variáveis associadas à estrutura (módulos resilientes das camadas do pavimento), e verificar a influência destas variáveis nos parâmetros de deformabilidade (deslocamento, tensão e deformação), no número de passadas permitidas e no dano dos pavimentos.

1.2 Estrutura do trabalho

Para uma melhor compreensão, o presente trabalho foi organizado em 7 capítulos, a saber:

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se o tema do trabalho, um panorama geral sobre o assunto, o objetivo geral e os objetivos específicos, bem como sua estrutura e organização.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

A partir de pesquisa em bibliografia específica sobre o tema, apresentam-se neste capítulo os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento e compreensão do trabalho.

Capítulo 3 – Materiais e métodos

Neste capítulo são fornecidas as informações sobre o segmento analisado na BR-230/PB, sua localização, a espessura final das camadas e os materiais utilizados. Neste capítulo também se apresenta o método de trabalho, os equipamentos e os softwares utilizados no levantamento dos dados para posterior análise.

Capítulo 5 – Apresentação e análise dos resultados

Os resultados obtidos são analisados e apresentados ao leitor neste capítulo.

Capítulo 6 – Conclusões

Aqui são apresentadas as principais conclusões feitas a partir da elaboração do trabalho, bem como feitas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7 – Referência bibliográficas

Por fim, são aqui apresentadas as conclusões feitas a partir da elaboração do trabalho, bem como feitas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais sobre os pavimentos, seus mecanismos de degradação bem como a análise do seu desempenho por meio da avaliação funcional e estrutural.

2.1 Pavimentos

Os Pavimentos possuem estruturas bastante complexas, que envolvem muitas variáveis no seu desempenho, além de sofrerem um processo progressivo de degradação, promovendo por vez a redução da sua funcionalidade, tais como: agentes de intemperismo, cargas de tráfego, solicitações ambientais, tráfego, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, e das modificações físicas e químicas inatas dos materiais componentes do pavimento, além do tipo e qualidade destes materiais, etc. (MACHADO ET AL, 2020).

Segundo Oda (2003) os pavimentos compõem grande parcela da infraestrutura de transportes e, portanto, um aprimoramento considerável nos seus componentes pode resultar em grandes economias em termos absolutos.

As principais funções do pavimento são:

- resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego;
- apresentar uma superfície mais regular e aderente, onde haja melhores condições de rolamento quanto ao conforto para passagem do veículo, e mais segurança para pista úmida ou molhada;
- resistir aos esforços horizontais (desgaste) que atuam no pavimento, tornando mais durável a superfície de rolamento;
- resistir às ações do intemperismo, mantendo as características acima de limites admissíveis em quaisquer condições climáticas.

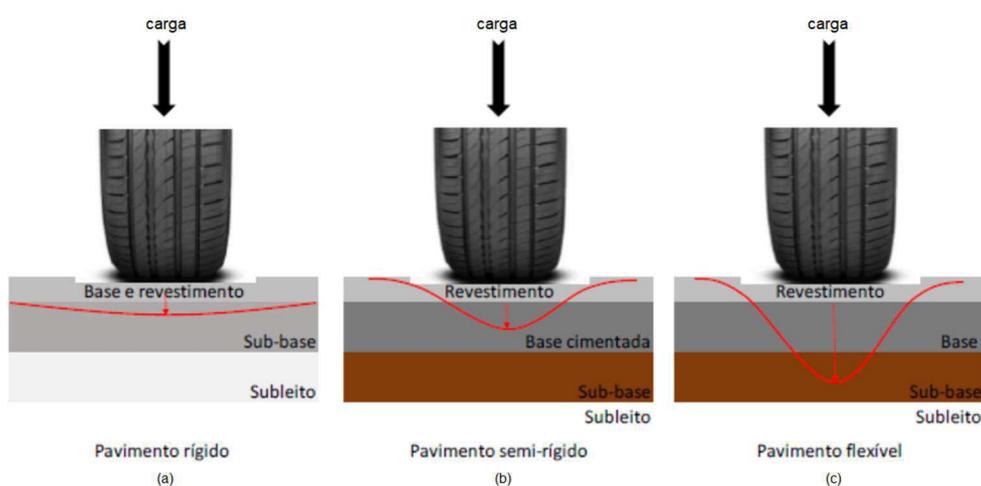
Segundo Lopes L. A (2019) as camadas do pavimento são construídas conforme sua finalidade viária, em função da maior ou menor rigidez da estrutura, devendo seus materiais constituintes interagir apropriadamente sob as solicitações das cargas advindas do tráfego de veículos. Esta interação é, de fato, uma tarefa complexa, considerando a necessidade de se compatibilizar materiais com parâmetros de elasticidade tão distintos. Para cada tipo e

magnitude dos esforços, existem diferentes tipos de estruturas de pavimentos, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) define os tipos de pavimento existentes como:

- a) Pavimentos rígidos: aquele no qual o revestimento, geralmente constituído por placas de concreto de cimento, por possuir uma rigidez muito superior às camadas subjacentes, absorve grande parte dos esforços e transmite as tensões de maneira dispersa ao subleito.
- b) Pavimentos semirrígidos: possuem uma base cimentada, ou seja, que contém algum material aglutinante que forneça propriedades cimentícias à camada, e revestimento flexível, tendo uma deformabilidade maior que os pavimentos rígidos e menor que os pavimentos flexíveis;
- c) Pavimentos flexíveis: geralmente constituído de revestimento asfáltico sob base granular, apresentam deformação elástica significativa em todas as camadas quando submetidas ao carregamento aplicado, fazendo com que a carga aplicada se distribua de forma aproximadamente equivalente entre elas.

Pode-se observar na Figura 1 os diferentes comportamentos dos pavimentos descritos anteriormente, quando submetidos às tensões provenientes do tráfego.

Figura 1 - Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimento: (a) Pavimento rígido; (b) Pavimento rígido; (c) Pavimento flexível.

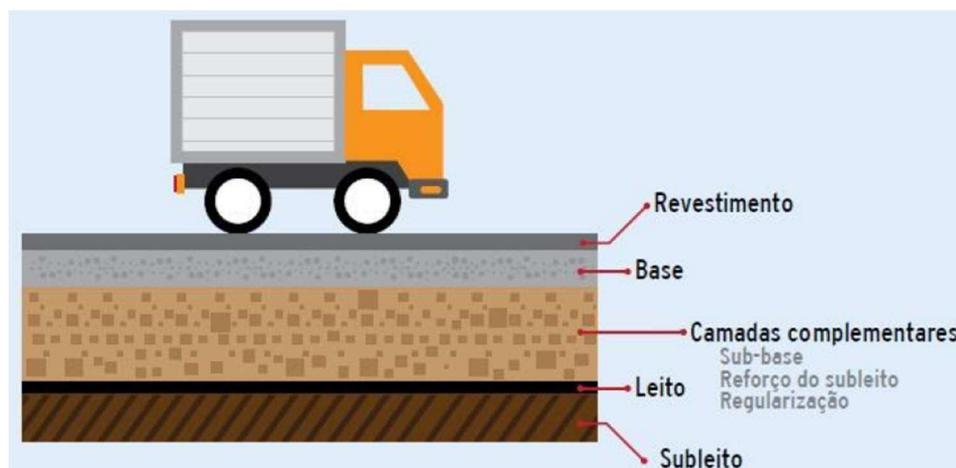


Fonte: Neto (2019).

Como o propósito deste trabalho é fazer a avaliação de um segmento de pavimento flexível, apenas essa classificação será abordada daqui em diante.

As camadas de espessuras finitas dos pavimentos, ditas na citação acima, possuem uma nomenclatura de acordo com o seu posicionamento e função (ver figura 2).

Figura 2 - Estrutura do pavimento.



Fonte: Cruz (2016).

O revestimento é a camada responsável por resistir às solicitações do tráfego. Deve ser prioritariamente impermeável, a fim de impedir que as águas pluviais penetrem nas demais camadas, além de ser seguro e confortável para os usuários. A base deve resistir às ações do tráfego de forma a aliviar e distribuir as tensões no revestimento para as demais camadas. A sub-base tem por função reforçar o subleito ou ser complementar a base quando o leito obtido com a terraplenagem não é adequado para a construção direta do pavimento. O reforço do subleito tem como finalidade reduzir espessuras elevadas na camada de sub-base, decorrentes da baixa capacidade de suporte do subleito em eventuais falhas da camada final de terraplenagem (CRUZ, 2016).

O pavimento, quando comparado com outras estruturas características da engenharia civil, tem uma vida útil curta. Este é na verdade, projetado para ser solicitado pelo tráfego ao longo de 10, 20 ou no máximo 50 anos. Por essa razão a compreensão dos processos de deterioração e destruição do pavimento é de vital importância (ODA, 2003).

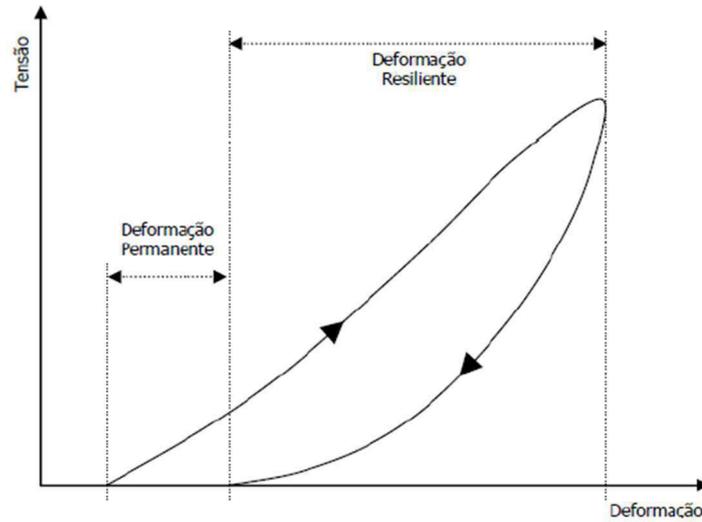
Segundo Machado et al. (2020), é imprescindível a um sistema de gerenciamento o acompanhamento rotineiro do desempenho funcional e estrutural de um pavimento, o que

influencia não só nos custos diretos de conservação e manutenção, mas igualmente em todas as outras frações do custo total do transporte. Para a manutenção de um pavimento que se degrada pela ação do tráfego e dos fatores climáticos ou ambientais é preciso que se conheça todas as operações que o modificam, sua condição atual de serventia e/ou seu futuro desempenho. A finalidade da manutenção pode ser a de devolver certas propriedades funcionais ao pavimento ou a de prevenir danos aos seus componentes estruturais, garantindo, assim, uma extensão de sua vida útil.

Os pavimentos geralmente se deterioram de forma progressiva, tanto para as suas características funcionais quanto para as suas características estruturais. A parcela funcional é percebida na maioria das vezes pelos próprios usuários, pois estes defeitos estão localizados na superfície do pavimento e influenciam na sua segurança e seu conforto ao rolamento que conseqüentemente afeta o veículo gerando mais custos. A parcela estrutural está associada aos danos ligados à capacidade de carga do pavimento e os defeitos estruturais são resultado dos efeitos ambientais e da repetição das cargas, associados tanto às deformações plásticas/permanentes quanto às elásticas/resilientes (FABRÍCIO, 2018; VARGAS, 2019).

Deformações permanentes (Figura 3) são aquelas que continuam mesmo após o efeito do carregamento imposto ao pavimento ser retirado, ou seja, têm caráter residual. Estas crescem com o número de aplicações de carga e dependem do estado de tensões, e resultam no afundamento de trilha de roda e rupturas de natureza plástica nas camadas do pavimento devido à ação do tráfego. O valor com que cada material um contribui para o surgimento deste defeito pode ser estimado por ensaios de deformação permanente, como o ensaio triaxial de carga repetida (FABRÍCIO, 2018; VARGAS, 2019).

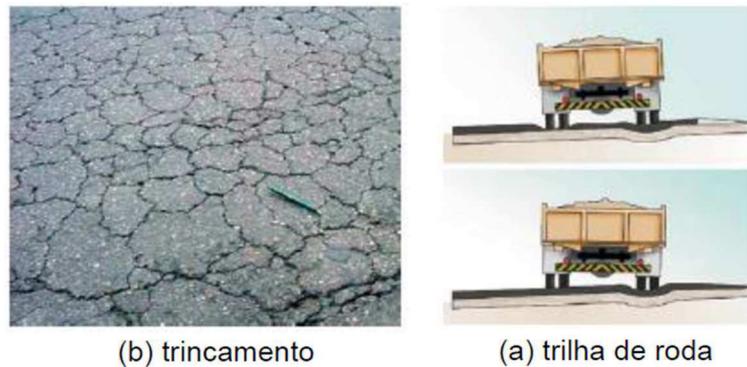
Figura 3 - Deformação em pavimentos flexíveis.



Fonte: Neto (2019).

Por outro lado, as deformações recuperáveis são os deslocamentos que surgem verticalmente no pavimento, tanto na superfície quanto na estrutura, desaparecendo uma vez cessada a atuação da carga. As deformações recuperáveis representam um indicativo do comportamento estrutural elástico dos pavimentos sujeitos a cargas repetidas. Estas são responsáveis pelo arqueamento das camadas do pavimento, pelo aparecimento da maior parte dos trincamentos dos pavimentos, e pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas. Estes defeitos são demonstrados na Figura 4, podendo interferir notoriamente na condição de conforto e segurança do usuário (FABRÍCIO, 2018; VARGAS, 2019).

Figura 4 - Defeitos por trincamento e afundamento a partir de repetição de cargas.



Fonte: Vargas (2019).

Os principais mecanismos de deterioração que ocasionam a perda da serventia dos pavimentos flexíveis ao longo do tempo são: formação e crescimento de trincas nas camadas asfálticas do revestimento, provenientes da fadiga ocasionada pela repetição das cargas do tráfego; formação de afundamentos de trilha de roda devido a ocorrência do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas, sob a repetição das cargas do tráfego. No Brasil, a maioria dos pavimentos possui revestimento asfáltico e camada de base granular, nestes, as etapas de dimensionamento e manutenção são influenciadas pelo tipo e/ou condição do revestimento. Destaca-se de maneira predominante a ocorrência de trincamento das camadas asfálticas sob a repetição de cargas do tráfego (GONÇALVES, 2002).

Quando um pavimento apresenta as primeiras trincas na superfície, é correto dizer que grande parcela da sua vida útil já se passou, e que o pavimento estará completamente deteriorado se não for feita nenhum tipo de intervenção o quanto antes, sendo necessário sua reconstrução, exigindo um montante significativo para repor as condições de conforto e segurança almejadas pelo usuário (TONIAL, 2001).

Os mais modernos métodos para projetos de dimensionamento de pavimentos novos, manutenção e avaliação estrutural de pavimentos são baseadas no conceito de Mecânica dos Pavimentos, que consiste na aplicação da Mecânica da Fratura, Mecânica dos Solos e Mecânica do Contínuo ao comportamento de sistemas de camadas sobrepostas e sujeitas às cargas dos veículos (CAVALCANTE, 2005).

Adquirindo-se embasamentos mais racionais para o desenvolvimento de tais métodos, conhecidos os parâmetros de deformabilidade, por meio de ensaios específicos, bem como as informações do meio físico e das cargas impostas pelo tráfego, é possível estimar as tensões, deformações e deslocamentos que atuam na estrutura do pavimento, utilizando-se programas próprios para esta finalidade. Estes programas ponderam o número de repetições de cargas que provocarão a fadiga do revestimento asfáltico, bem como as suas deformações plásticas, indicando os parâmetros de deformabilidade admissíveis de acordo com a vida útil do projeto e condição de serventia, bem como a consideração das variações sazonais diárias de temperatura, umidade do subleito, das camadas do pavimento e do tráfego (CAVALCANTE, 2005; LOPES R. A., 2019).

Segundo Vargas (2019) os Estados Unidos, em 1917, já regulamentavam suas leis para atender a demanda da construção de rodovias. No Brasil, foi utilizada uma tecnologia

importada, sem qualquer adequação para o solo e ação das intempéries brasileira, provocando assim certas distorções no quesito como qualidade e durabilidade desses pavimentos implantados.

O Brasil demorou um longo período para aderir a implantação de políticas de desenvolvimento. Somente no ano de 1960 é que foi publicado o Manual de Pavimentação do DNER. Essa carência de regimento para a execução de serviços de pavimentação não terminou, pois, algumas soluções ainda eram reformuladas no decorrer das obras, com determinados prejuízos técnicos para a pavimentação e altos gastos não programados (VARGAS, 2019).

Segundo Balbo (2007), a partir de 1960 nos países da Europa, ocorreu uma maior preocupação acerca da duração das estradas, escoamento apropriado das chuvas e adesão entre pneu-pavimento. Para isso, adotou-se o uso de misturas asfálticas que fornecessem a devida garantia de segurança e conforto para os usuários. Essa camada de revestimento com o uso de misturas asfálticas deve, portanto, ser bastante resistente e impermeável.

Dessa forma, fica evidenciado que a adoção de modelos de previsão de desempenho baseados em parâmetros de materiais obtidos em estudos desenvolvidos nos Estados Unidos, Europa e outros países, pode acarretar em resultados absurdos, sendo necessário recalibrar os modelos para o cenário brasileiro (PINTO e PREUSSLER, 2002).

De acordo com Lira (2019), avaliações em rodovias de gestão pública e privada que, mostraram que do total pavimentado no Brasil, enquanto 66% das públicas apresentavam classificação Regular, Ruim ou Péssima, somente 18% das de gestão privada apresentaram essa classificação. Essa distorção pode ser justificada pela falta de investimento por parte da administração pública, que autorizou o uso de apenas R\$ 6,92 bilhões dos cerca de R\$ 48,08 bilhões necessários para realizar todas as operações de reconstrução, restauração e readequação necessárias para a infraestrutura rodoviária nacional.

Tal justificativa corrobora com a 23ª edição da Pesquisa divulgada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) e pelo Serviço Social do Transporte e Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SEST SENAT) de Rodovias EM 2019, em que fica notório que a qualidade das rodovias brasileiras piorou no último ano quanto as condições das características observadas. O estado geral relata que 59% da malha rodoviária dos trechos

avaliados apresentam algum tipo de problema, sendo, portanto, classificados como deficiente, ruim ou péssimo. Em 2018, o percentual foi 57%. Também está pior a situação do pavimento (52,4% com problema), da sinalização (48,1%) e da geometria da via (76,3%). No ano passado, a avaliação foi 50,9%, 44,7% e 75,7% com problemas respectivamente.

Um pavimento em condição deteriorada ou insuficiente para o tráfego atuante, acelerará a geração dos defeitos de superfície, bem como a perda da serventia. Dadas as suas características, a avaliação do pavimento deve ser efetuada, mediante procedimentos padronizados de medidas e observações, que permitem inferir condições funcionais e estruturais dos pavimentos, como forma a subsidiar o processo de tomada de decisão quanto às estratégias de manutenção e reabilitação (SCARANTO, 2007).

Segundo Marcon (1996), as metodologias para executar levantamentos para a execução de pavimentos são baseadas nas medições e/ou verificações de presença de defeitos, que aparecem na superfície dos pavimentos. As causas desses defeitos são oriundas de uma série de fatores como tráfego, clima, processos construtivos e características físicas dos materiais, que podem atuar separados ou de maneira conjunta.

2.2 Avaliação de pavimentos

A avaliação de pavimentos fornece informações sobre as condições funcionais e estruturais do pavimento, por meio de inspeções de campo, como: os defeitos de superfície, as deformações permanentes, a irregularidade longitudinal, a deflexão recuperável, a capacidade estrutural do pavimento, a solicitação do tráfego, a aderência entre pneu-pavimento e os agentes do intemperismo. Estas informações são utilizadas no planejamento e projeto de serviços de gerência de pavimentos, bem como na execução acertada de intervenções corretivas que venham a restabelecer as características funcionais e estruturais do pavimento avaliado quando se fizer necessário (NÓBREGA, 2003; CAVALCANTE, 2005).

A avaliação de pavimentos pode ser dividida em dois tipos:

- a) A avaliação funcional busca caracterizar o estado do pavimento sob o ponto de vista do usuário quanto à satisfação, prezando principalmente pelo seu conforto e segurança, é referente ao conforto ao rolamento, à segurança, custo do usuário das vias, entre outros, em que são feitas medições de irregularidades e contagem de

defeitos na superfície e da aderência do pneu-pavimento. É composta pela quantificação e qualificação das características de degradação superficial e as de deformação permanente, que resultam na perda da serventia quanto ao rolamento, segurança e conforto. O desempenho funcional é entendido também como a capacidade do pavimento de realizar seu principal objetivo, que é fornecer uma superfície com serventia adequada quanto à qualidade de rolamento. (MEDINA ET AL, 1994; CAVALCANTE, 2005).

- b) A avaliação estrutural abrange a caracterização completa dos elementos e variáveis estruturais do pavimento, as características de resistência e deformabilidade sob forma de tensão, deformação e deflexão em determinados pontos das camadas do pavimento, de forma a possibilitar uma descrição objetiva de seu comportamento frente às cargas do tráfego e ambientais. A condição estrutural está ligada às características dos materiais utilizados, as espessuras das camadas que compõem o pavimento, base, sub-base e subleito, e as respostas de cada camada que compõe o pavimento, quando sujeita às cargas de tráfego (RODRIGUES, 1995; FABRÍCIO, 2019).

Segundo Cavalcante (2005), a avaliação de pavimentos tem como objetivos:

- verificar se a função pretendida ou o desempenho esperado está sendo alcançado;
- fornecer informações para o planejamento da restauração de pavimentos existentes;
- fornecer informações para melhorar a tecnologia de projeto, construção e manutenção;
- avaliar a capacidade estrutural;
- quantificar ou qualificar a deterioração física (trincamento, deformação e desgaste);
- efeitos relacionados ao usuário (irregularidade longitudinal ou serventia, segurança e aparência);
- custos de operação do usuário e n benefícios associados à variação de serventia e segurança.

2.3 Avaliação estrutural de pavimentos

A avaliação estrutural de pavimentos é o processo no qual se deseja obter a caracterização completa de elementos e variáveis estruturais dos pavimentos que possibilite uma descrição objetiva de seu modo de comportamento mecânico durante a vida útil, estando os mesmos sujeitos às solicitações do tráfego e os efeitos do clima, de modo a possibilitar a análise adequada sobre a capacidade de um pavimento existente resistir aos esforços das futuras demandas do tráfego (MACHADO, 2020).

Segundo Cavalcante (2005) um quadro completo da condição estrutural de um pavimento deve ser composto pelos seguintes elementos:

- parâmetros que descrevam a deformabilidade elástica ou viscoelástica dos materiais das camadas, sob as condições de solicitações impostas pelas cargas transientes dos veículos. São utilizadas para se calcular as tensões e deformações induzidas pelas cargas do tráfego na estrutura do pavimento;
- parâmetros que descrevam a resistência dos materiais ao acúmulo de deformações plásticas e à geração de trincas por fadiga sob cargas repetidas, os quais são função da natureza do material, de sua condição (densidade, umidade) e do histórico de solicitações;
- integridade das camadas asfálticas e cimentadas, expressa pelo grau de fissuramento.

A avaliação da condição atual (o estado) da estrutura do pavimento, de forma abalizada, é de indispensável na gerência de pavimentos, pois torna viável a identificação dos defeitos com origem ligada a determinado problema estrutural. Desta forma, a análise dos parâmetros elásticos obtidos na caracterização estrutural contribui para determinar a real condição em que se encontra o pavimento, e assim, dimensionar o reforço objetivando compatibilizar as diversas variáveis resistentes dos materiais que compõem o pavimento reforçado em face às solicitações das cargas futuras e efeitos do clima. (CAVALCANTE, 2005).

Segundo Cardoso (1995) a avaliação estrutural de pavimentos é função de dois fatores: dos métodos a serem utilizados e da experiência do avaliador que aumenta cada trabalho realizado, sendo fruto da vivência.

Os métodos de avaliação estrutural são classificados em destrutivos e não destrutivos:

- a) Os métodos destrutivos, conhecido também como prospecção, são aqueles em que para a avaliação da estrutura são removidas amostras de cada camada do pavimento por meio de furos de sondagem, desde o revestimento até o subleito, para a determinação, em laboratório, das suas características *in situ*; e devido a sua natureza destrutiva, apenas pode ser empregado em alguns pontos observados como representativos de cada segmento a ser avaliado (NÓBREGA, 2003; FABRÍCIO, 2019).
- b) Os métodos não destrutivos possibilitam a avaliação do pavimento sem danificá-lo, são os mais indicados para avaliar grandes extensões de pistas, consiste na realização de provas-de-carga para medida de parâmetros de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento, utilizando para isto equipamentos que realizam a medição das bacias deflectométricas. Estes métodos avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento por meio de equipamentos dinâmicos de impacto como o FWB, equipamentos dinâmicos de vibração e vigas de deflexão como a Viga Benkelman. Estes oferecem uma maior rapidez na realização do ensaio e maior segurança e acurácia na obtenção dos resultados (NÓBREGA, 2003; FABRÍCIO, 2019).

Segundo Cavalcante (2005), tais métodos de avaliação (destrutiva e não-destrutiva) são complementares, de forma que uma parte das informações só pode ser obtida por meio da inspeção visual das camadas e de ensaios de laboratório, enquanto que a deformabilidade elástica dos materiais, na sua condição “*in situ*”, só pode ser determinada a partir da análise das bacias de deflexão do pavimento.

Cabe ao projetista ter o bom senso e discernimento necessário para as simplificações e limitações de cada um dos métodos de avaliação, utilizando sua experiência e sensibilidade para análises que melhor represente o comportamento estrutural do trecho em estudo, destacando-se dentre elas a previsão de desempenho das estruturas de pavimentos (SALES, 2008).

A avaliação estrutural por retroanálise tem como critério fundamental a determinação dos módulos resilientes do pavimento e subleito, determinados a partir dos valores de deflexão elástica reversível, que proporcionam o melhor ajuste entre a bacia de deflexão de campo e a bacia calculada. O cálculo envolvido na retroanálise é realizado por meio de um sistema iterativo que, em conjunto com as espessuras de cada camada e seus respectivos coeficientes de Poisson, geram uma base de dados que, corretamente interpretados, traduzem o nível de deterioração estrutural do pavimento e auxiliam na tomada de decisão para o restauração das condições ideais de rolamento, ou seja, se será necessária uma camada de reforço no pavimento existente e suas características (NÓBREGA, 2003).

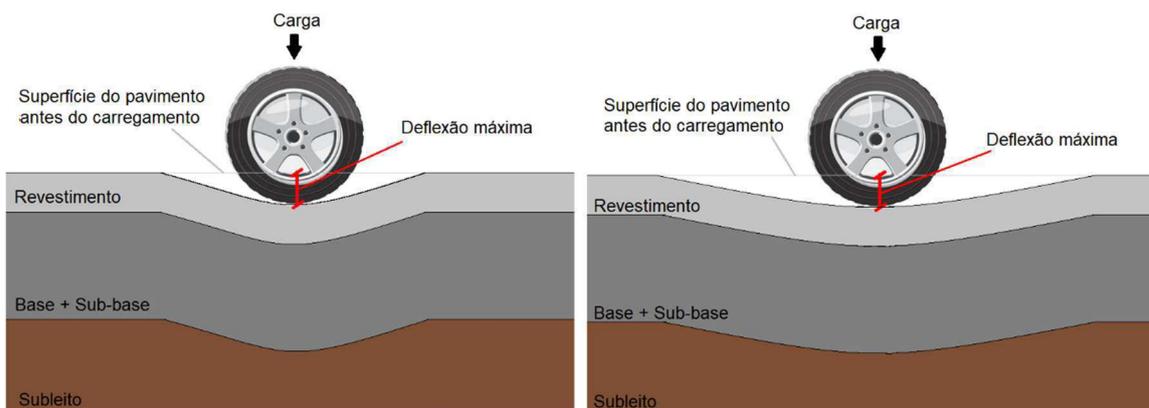
2.4 Deflexão elástica reversível

A deflexão elástica reversível pode ser definida como os deslocamentos verticais reversíveis na superfície ou no interior do pavimento, gerados pela ação de carregamento intermitente ou transitório, de forma que cessado o esforço, a estrutura retorne à posição inicial, sendo as deflexões máximas um indicativo do comportamento futuro do pavimento (SILVA, 1999).

O deslocamento recuperável máximo é um parâmetro importante para a caracterização do comportamento estrutural do pavimento, pois o seu valor está relacionado com a deformabilidade elástica de todas as camadas que constituem o pavimento. Quanto maior o valor da deformabilidade, mais resiliente, ou seja, deformável, é o pavimento e, conseqüentemente, maior será o seu comprometimento estrutural (CAVALCANTE, 2005).

Porém, segundo Gontijo (1995) um mesmo valor de deflexão reversível máxima pode representar diversas combinações estruturais e de carregamento, conforme ilustra a Figura 5, dessa forma, é necessário se obter medidas de deflexão a outras distâncias do ponto de aplicação da carga, para saber o comportamento da estrutura como um todo.

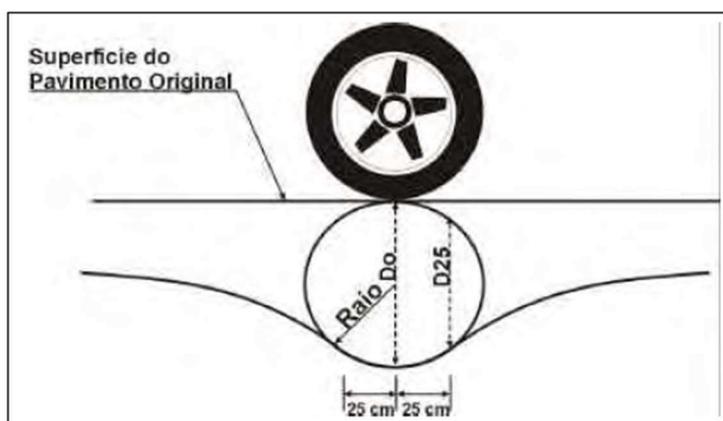
Figura 5 - Diferentes bacias deflectométricas para uma mesma deflexão máxima.



Fonte: O AUTOR (2020).

Por este fato, buscou-se estudar outros parâmetros relacionados com a forma das deformadas que pudessem auxiliar na avaliação estrutural. Dentre estas tentativas, surgiu o raio de curvatura, parâmetro indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica (Figura 6), que geralmente é considerado a 25 cm do centro da carga (PINTO E PREUSSLER, 2002).

Figura 6 - Ilustração da hipótese adotada pelo DNIT.



Fonte: Salini (1999).

As fórmulas padronizadas pelo método DNER – ME 024/94 (DNER,1994d) para a determinação da deflexão máxima e o raio de curvatura são:

$$D_0 = (L_0 - L_f) \frac{a}{b} \quad (1)$$

Sendo:

D_0 = deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetros;

L_0 = leitura inicial, em centésimos de milímetros;

L_f = leitura final, em centésimos de milímetros;

a / b = relação entre dimensões da Viga Benkelman.

E ,

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (2)$$

Sendo:

R = raio de curvatura, em metros;

D_0 = deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetros;

D_{25} = deflexão a 25 cm do ponto de prova, em centésimos de milímetros;

Dessa forma, a deflexão recuperável máxima sob a ação de cargas repetidas é um parâmetro de fundamental para a avaliação da deformabilidade elástica das camadas do pavimento e do subleito. No entanto, sua medida isoladamente não é o bastante para analisar o mecanismo de distribuição de cargas no interior do pavimento e subleito. Dessa forma, faz-se necessário obter as medidas a diferentes distâncias no sentido de se obter a linha de influência da bacia de deformação elástica, e assim, obter uma caracterização mais sofisticada do pavimento, obtendo-se por processos de retroanálise os módulos de resiliência das camadas da estrutura, bem como analisar a contribuição de cada camada na deflexão máxima (CAVALCANTE, 2005).

As bacias deflectométricas, obtidas por meio de ensaios não destrutivos, são compostas pelo perfil de deflexões a vários pontos, que consiste no conjunto de deslocamentos produzidos pelo efeito de um carregamento aplicado à estrutura do pavimento e indicam o comportamento elástico das camadas que o constituem. (SILVA, 1999)

Segundo Nóbrega (2003), tendo em vista que analisar um valor de deflexão isolado não faz sentido, devem ser escolhidos trechos com características semelhantes para se realizar as medições de deflexões, além de realizar uma análise estatística com os valores

medidos, para assim determinar um valor máximo, denominado de deflexão característica do trecho.

2.5 Ensaaios não destrutivos

São vários os instrumentos que podem ser utilizados na avaliação estrutural não destrutiva de pavimentos, os quais devem ser cuidadosamente escolhidos, assim como as informações requeridas e o método de análise (HAAS ET AL, 1994).

Segundo Medina et al (1994) os equipamentos utilizados na avaliação estrutural não destrutiva do pavimento podem ser divididos, quanto à forma de aplicação da carga, em três classes:

1. Equipamentos de carregamento quase estático: Ensaio de Placa, Viga Benkelman, Viga Benkelman Automatizada; entre outros;
2. Equipamentos de carregamento vibratório: Dynaflect, Road Rater, etc.
3. Equipamentos de carregamento por impulso: Falling Weight Deflectometer (FWD).

2.5.1 Equipamentos de carregamento quase estático

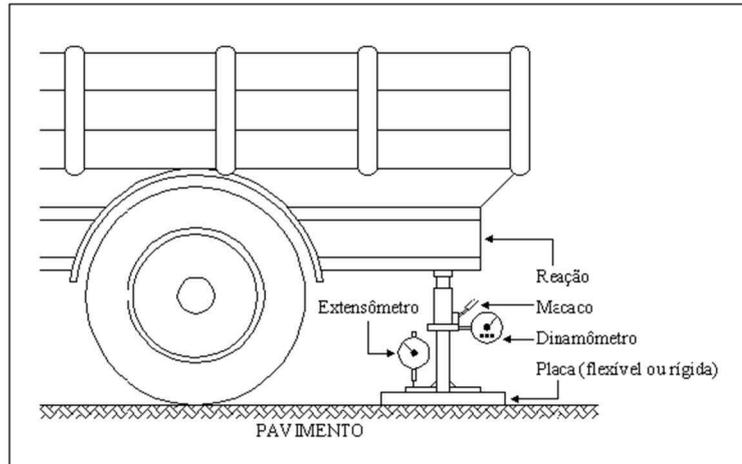
Estes equipamentos medem a deflexão provocada pelo carregamento de rodas duplas de um veículo, que se desloca à baixa velocidade. Esta prática tem como finalidade evitar que ocorra a influência de forças inerciais (MEDINA ET AL, 1994).

São exemplos de equipamentos de carregamento quase estático:

- a) Ensaio de placa

As medidas de deflexão não são tomadas sob o carregamento das rodas do veículo, pois o carregamento é aplicado direto numa placa rígida, de raio conhecido, sobre a superfície do pavimento, como mostra a Figura 7 (ALBERNAZ, 1997).

Figura 7 - Esquema do ensaio de placa.



Fonte: Albernaz (1997).

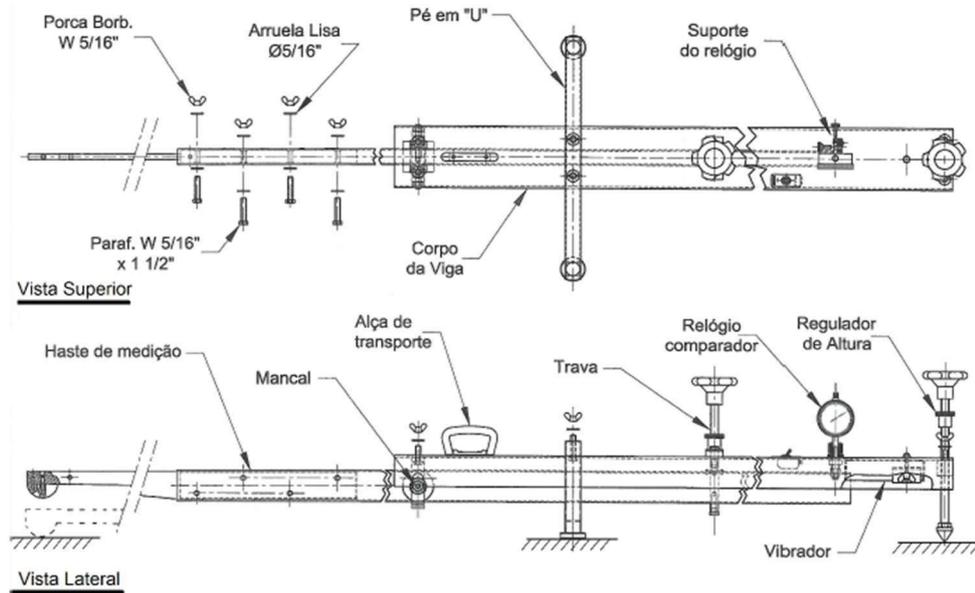
b) Viga Benkelman

Segundo Vellasco (2018) a viga Benkelman faz referência ao engenheiro Avin Carlton Benkelman, do U. S. Bureau of Public Roads dos Estados Unidos, que inventou o equipamento no ano de 1953, durante testes efetuados na pista experimental da WASHO, em Idaho nos EUA. Cujo procedimento foi difundido pelo mundo todo no ano de 1965, após ser aprimorado pelos engenheiros do Canadian Good Roads Association (CGRA).

O equipamento é o mais simples e de baixo custo extensivamente utilizado para o levantamento das deflexões no pavimento quando submetido ao carregamento estático das rodas do veículo de teste, por órgãos rodoviários, para trabalhos de pesquisa, avaliações estruturais e projetos de restauração de rodovias (VARGAS, 2019).

A Viga Benkelman é formada por um conjunto de sustentação em que se articula uma haste metálica interfixa, dividindo a barra em duas partes proporcionais, cujos comprimentos a e b seguem as seguintes relações de $2/1$, $3/1$ ou $4/1$, como indicado na Figura 8 (MEDINA; MOTTA, 2015). A extremidade do braço maior contém uma ponta de prova. Um extensômetro com precisão de centésimos de milímetro é fixado na extremidade do braço menor.

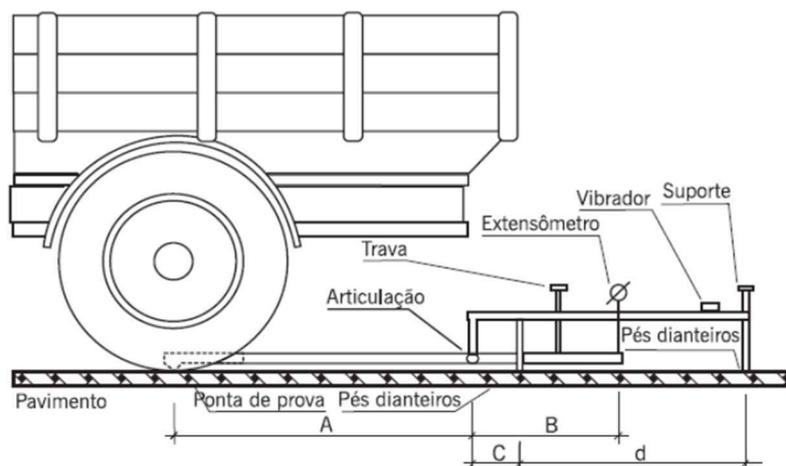
Figura 8 - Esquema ilustrativo da Viga Benkelman.



Fonte: Carvalho (2019).

Seu princípio de funcionamento é regido pela norma rodoviária DNER-ME 024/94 – “Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman” para determinação das deflexões, onde necessita de uma aparelhagem constituída de um conjunto de sustentação em que se articula uma alavanca interfixa, formando dois braços cujos comprimentos a e b obedecem às relações $2/1$, $3/1$ ou de $4/1$, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema ilustrativo da Viga Benkelman



Fonte: Vargas (2019).

As medições são feitas inserindo a ponta de prova entre o par de rodas do lado direito do eixo traseiro de um caminhão com 8,2 tf de carga no eixo traseiro, sendo ele padronizado simples e com roda dupla (ESRD), os pneus calibrados à pressão de 0,56 MPa (5,6 kgf/cm² ou 80 lb/pol²), para que a carga seja simetricamente distribuída em relação as rodas. Em uma extremidade da haste, no braço maior, há uma ponta de prova e, na extremidade oposta da viga, no braço menor, há um extensômetro, este acusa qualquer movimento vertical da ponta de prova. Posicionado o caminhão e ajustada a viga, são feitas as leituras nos pontos pré-estabelecidos (VARGAS, 2019).

Com o objetivo de eliminar a inércia inicial da articulação da viga móvel quando não em uso e estimular a livre movimentação e eventuais inibições do ponteiro do extensômetro é colocado um vibrador pequeno na outra extremidade da haste, onde se encontra os pés traseiros, que estão em contato com a superfície que se deseja medir a deflexão no pavimento (VELLASCO, 2018).

O ensaio completo da viga Benkelman segundo Zanetti (2008) consiste em:

- I. primeiro seleciona-se e marca-se o ponto onde será realizada a medida do deslocamento vertical recuperável;
- II. em seguida deve-se colocar a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus da roda geminada traseira do caminhão, colocando-a exatamente sob o seu eixo;
- III. solta-se a trava da viga, e os pés da parte fixa são ajustados de modo que a haste do extensômetro fique em contato com a parte móvel da viga;
- IV. ajusta-se o pé traseiro, de forma que o extensômetro fique aproximadamente na metade do seu curso;
- V. liga-se o vibrador e a leitura inicial do extensômetro é feita quando a velocidade de deformação do pavimento for igual ou inferior a 0,01 mm/minuto, ou decorridos 3 minutos da ligação do vibrador - Leitura L_i ;
- VI. realizada a leitura inicial, desloca-se o caminhão lentamente para frente, parando-o quando o eixo traseiro estiver à distância de 10,00 metros da ponta de prova conforme a Figura 10.

- VII. quando a velocidade de recuperação do pavimento for igual ou inferior a 0,01 mm/minuto, ou decorridos 3 minutos após o caminhão sair da posição original, fazendo-se a leitura final pelo extensômetro – Leitura Lf.

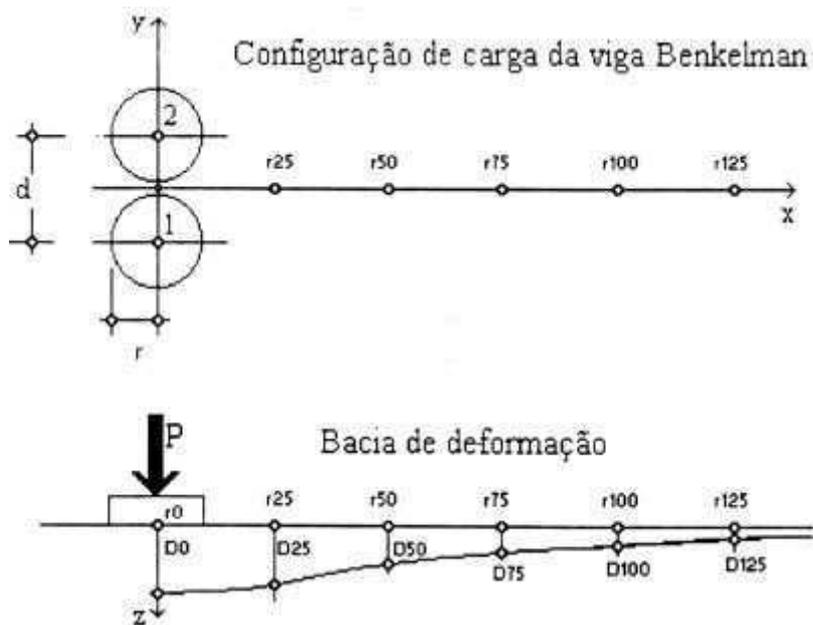
Figura 10 - Ensaio Viga Benkelman.



Fonte: Vargas (2019).

A leitura final corresponde ao descarregamento do pavimento e todo o deslocamento recuperado é associado à deformação elástica do pavimento (BERNUCCI et al., 2008). Os pontos de avaliação na viga Benkelman são mostrados na Figura 11.

Figura 11 - Pontos de avaliação da viga Benkelman.



Fonte: Borges (2001).

A norma DNER-ME 024/94 trata da determinação das deflexões, ou seja, do deslocamento vertical recuperável (D_0), em pavimento rodoviário através do uso da viga Benkelman. O cálculo das deflexões, apresentado nesta norma, é feito a partir da Equação 2.2, em que a é a parte maior do braço de prova e b é a parte menor (FABRÍCIO, 2018).

$$D_0 = (L_i - L_f)x \frac{a}{b} \quad (3)$$

Onde:

D_0 = deflexão máxima do pavimento (0,01 mm);

L_i = leitura inicial (0,01 mm);

L_f = leitura final (0,01 mm);

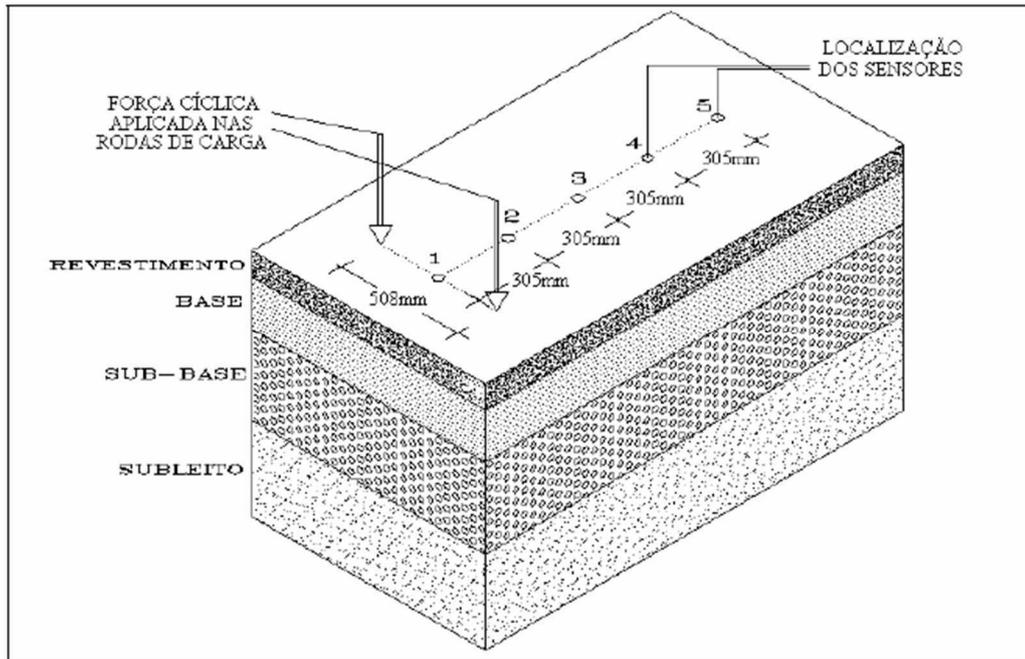
$\frac{a}{b}$ = relação entre a maior e a menor porção do braço de alavanca.

2.5.2 Equipamentos de carregamento vibratório

Os equipamentos de carregamento vibratório geram uma força senoidal (dinâmica) superposta em um carregamento estático (HAAS et. al., 1994). São exemplos de equipamentos de carregamento vibratório:

- a) Dynaflect: consiste num gerador de cargas cíclicas acoplado a um pequeno reboque de rodas duplas, unidade de controle, sensores e um módulo de calibração de sensores. Este equipamento permite que sejam realizadas medições rápidas e precisas de deflexões na superfície do pavimento em cinco pontos, usando uma força cíclica de magnitude e frequência conhecidas, que são aplicadas ao pavimento por intermédio de duas rodas de aço, conforme ilustra a Figura 12 (DNER, 1983).

Figura 12 - Esquema de aplicação de força do Dynaflect.



Fonte: DNER (1983).

- b) Road Rater: é um equipamento vibratório capaz de variar tanto a magnitude do carregamento quanto a sua frequência. A magnitude do carregamento estático é variada por meio da transferência de carga do reboque para uma placa de carga. Quatro transdutores são utilizados para medição de deflexão no pavimento: um no centro da placa de carga e três localizados ao longo do sentido longitudinal da rodovia, distando cerca de 30cm um do outro (HAAS et. al., 1994).

2.5.3 Equipamentos de carregamento por impulso

Os equipamentos de carregamento por impulso geralmente transmitem o esforço ao pavimento por meio de um conjunto de pesos que caem sobre uma placa de carga. Um exemplo de equipamento de carregamento por impulso é o:

- a) Falling Weight Deflectometer (FWD)

Figura 13 - Falling Weight Deflectometer.

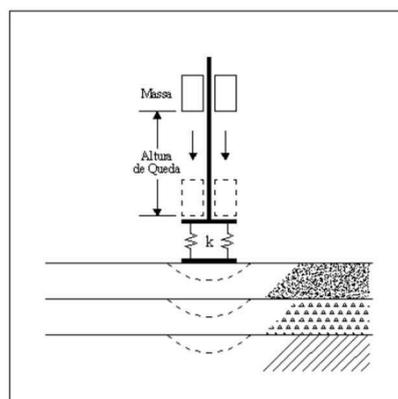


Fonte: Strata Engenharia.

Segundo Bernucci et al. (2010) os equipamentos mais atuais de medida de deslocamentos recuperáveis dos pavimentos são os de impacto por queda de um peso suspenso de uma altura pré-determinada sobre amortecedores que transmitem o choque a uma placa metálica apoiada na superfície do pavimento no ponto de leitura da deflexão máxima.

O FWD simula de maneira muito similar o efeito da passagem de uma roda em movimento sobre o pavimento, em termos de magnitude e frequência da carga, o que não acontece no ensaio estático com a viga Benkelman (Figura 14).

Figura 14 - Princípio fundamental do FWD.



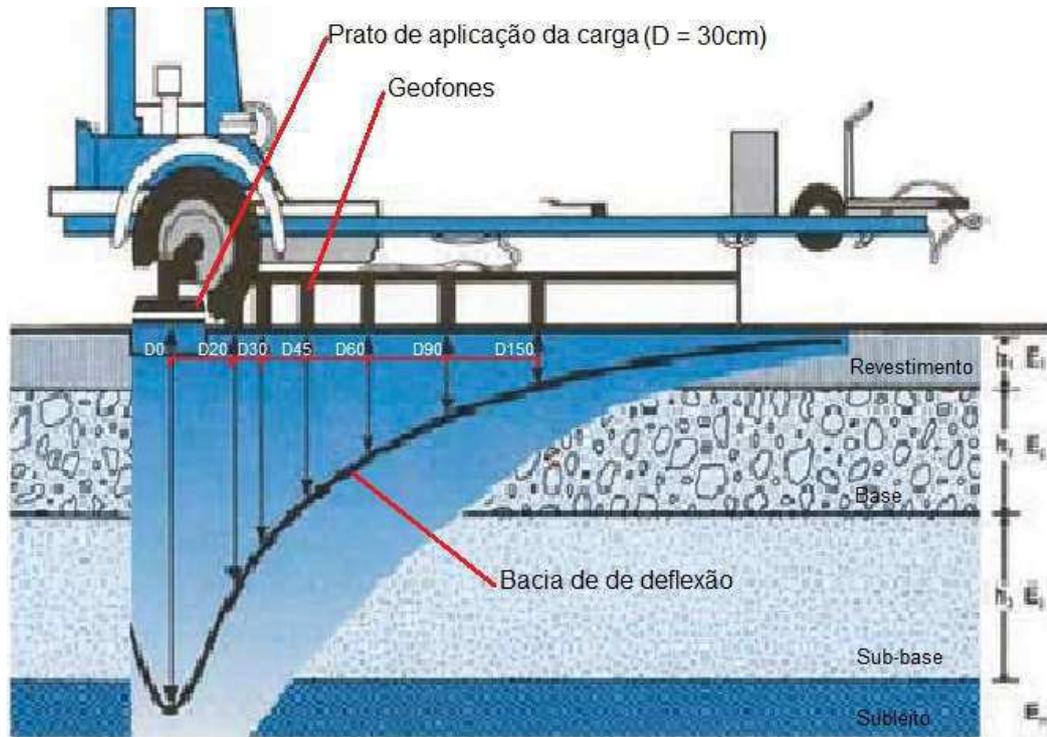
Fonte: Haas et. al. (1994).

Como está ilustrado na figura 12, tal simulação é feita por meio da queda de um conjunto de massas, geralmente um peso calibrado com uma carga de aproximadamente 4000kgf, de uma determinada altura, sobre um sistema de amortecedores causando a propagação de uma energia de deslocamento nas camadas do pavimento, um pulso de carga com formato aproximadamente igual a uma senoide, que se propaga no interior da estrutura a velocidades finitas e são registradas em diferentes instantes pelos sensores, denominados geofones, dispostos ao longo de uma barra metálica com os seguintes espaçamentos: 0; 20; 30; 45; 60; 90 e 150 (centímetros) como mostra a Figura 13. Com esta energia é possível obter as bacias de deflexões (deslocamentos recuperáveis) do pavimento medidos pelos geofones no momento do ensaio. (NÓBREGA, 2003).

O espaçamento dos geofones em relação ao centro de aplicação da carga tem o objetivo de aumentar a acurácia em função da estrutura ensaiada, de modo que as deflexões medidas por estes indiquem a contribuição individual de cada camada constituinte do sistema pavimento-subleito, cujo somatório destas compõe a deflexão total da estrutura provocada pela carga aplicada (CAVALCANTE, 2005).

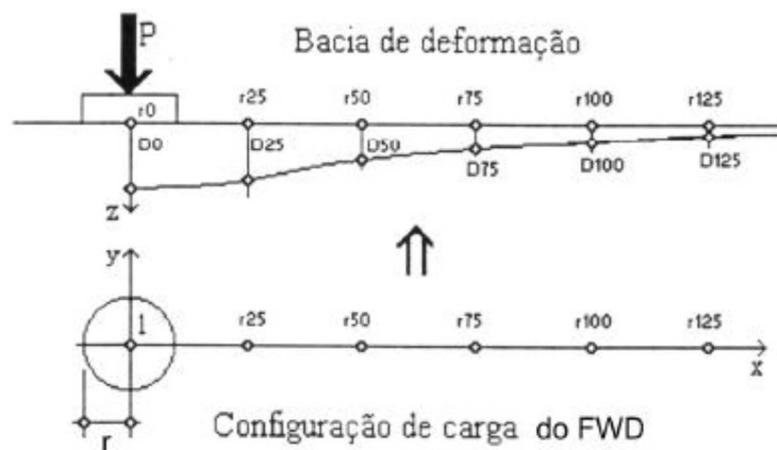
Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento ao se gerar a carga de impacto em um ponto no centro de uma placa, ou prato de aplicação e carga, sobre a superfície do pavimento, ou seja, a bacia deflectométrica do pavimento, medidos por meio dos sete geofones instalados ao longo de uma barra metálica: um no centro da placa e os outros em distâncias pré-estabelecidas, ao longo da barra metálica de até 4,5m de comprimento. São em seguida armazenadas em um computador ligado ao FWD. São registrados também os valores de temperatura da superfície de revestimento e do ar, a força aplicada ao pavimento e a distância percorrida. Além disso, O FWD permite que se aplique diferentes níveis de carregamento em uma mesma estação de ensaio, através da combinação entre os seguintes componentes: altura de queda, massa do peso que cai e sistema de amortecedores selecionado, a Figura 16 mostra a configuração de carga no FWD (NÓBREGA, 2003; BORGES, 2001).

Figura 15 - Disposição dos geofones no FWD.



Fonte: Borges (2001).

Figura 16 - Configuração de carga do FWD.



Fonte: Borges (2001).

2.6 Ensaios destrutivos

O método destrutivo identifica as camadas do pavimento de um modo mais agressivo com a retirada de partes do pavimento para verificação das condições “in situ” e obtenção de amostras, deformadas ou indeformadas, para ensaios de laboratório, podendo ser de maneira manual ou mecânica. O intuito do método é chegar a definição dos materiais e de suas devidas espessuras, caracterizando por completo a estrutura física do pavimento com a retirada de amostras para a realização de ensaios posteriores (VARGAS, 2019).

Os processos mais conhecidos para essa caracterização são: abertura de cavas à pá ou picareta, abertura de furos a trado, concha ou helicoidal, abertura de trincheiras transversais à pista e extração de amostras de revestimentos e bases com sondagens rotativas. As desvantagens desse tipo de avaliação são, dificuldades de demonstrar o estado de tensão, condições ambientais e o desempenho existentes em campo que não são alcançadas em sua totalidade mesmo com amostras indeformadas (VARGAS, 2019).

As propriedades medidas em ensaios destrutivos não formam a caracterização completa do estado de tensão e condições ambientais ao longo do tempo, por de não representar as condições dos materiais em campo (estado de tensões, índice de vazios, etc.) sob a ação combinada de cargas e do clima de maneira realística. No entanto, sua utilização é comumente utilizada para a determinação de parâmetros elásticos e de resistência, destaca-se o fato de que uma amostra pode ser condicionada inúmeras vezes sob condições de contorno controladas (CAVALCANTE, 2005).

2.6.1 Ensaios triaxiais dinâmicos

A deformação elástica recuperável das camadas de pavimentos submetidos a carregamentos repetidos é chamada de deformação resiliente. O primeiro a relacionar as deformações elásticas recuperáveis das camadas subjacentes dos pavimentos com o trincamento progressivo dos revestimentos foi o Eng.º Francis Hveem, em 1951, ao estudar sistematicamente a ocorrência de defeitos nos pavimentos asfálticos constituídos no estado da Califórnia (EUA), para determinar a deformabilidade do pavimento, estabelecendo valores máximos admissíveis para a vida de fadiga satisfatória de diferentes tipos de pavimentos, e observando que, muitos desses defeitos tinham origem no processo de fadiga. O termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada em um corpo

deformado elasticamente, a qual é devolvida após cessadas as tensões causadoras das deformações, ou seja; é a energia potencial de deformação (NETO, 2004; VARGAS, 2019).

O Módulo Resiliente é a relação entre as tensões verticais repetidas (σ) que atuam no pavimento e a deformação específica axial resultante (ϵ), essa relação repercute no pavimento, e se torna responsável pela fadiga dos revestimentos asfálticos, ruptura pelas incontáveis solicitações que são menores que a resistência do material à tração (VARGAS, 2019).

Para se efetuar a análise de deformabilidade do pavimento, é necessário conhecer a relação tensão-deformação ou o módulo de resiliência que, segundo a NORMA DNIT 134/2018-ME, pode ser definido como sendo a relação entre a tensão de desvio aplicada axial e ciclicamente em um corpo de prova e a correspondente deformação resiliente axial (vertical).

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (4)$$

Sendo

M_r = módulo de resiliência;

σ_d = tensão de desvio aplicada repetidamente;

ϵ_r = deformação específica axial resiliente.

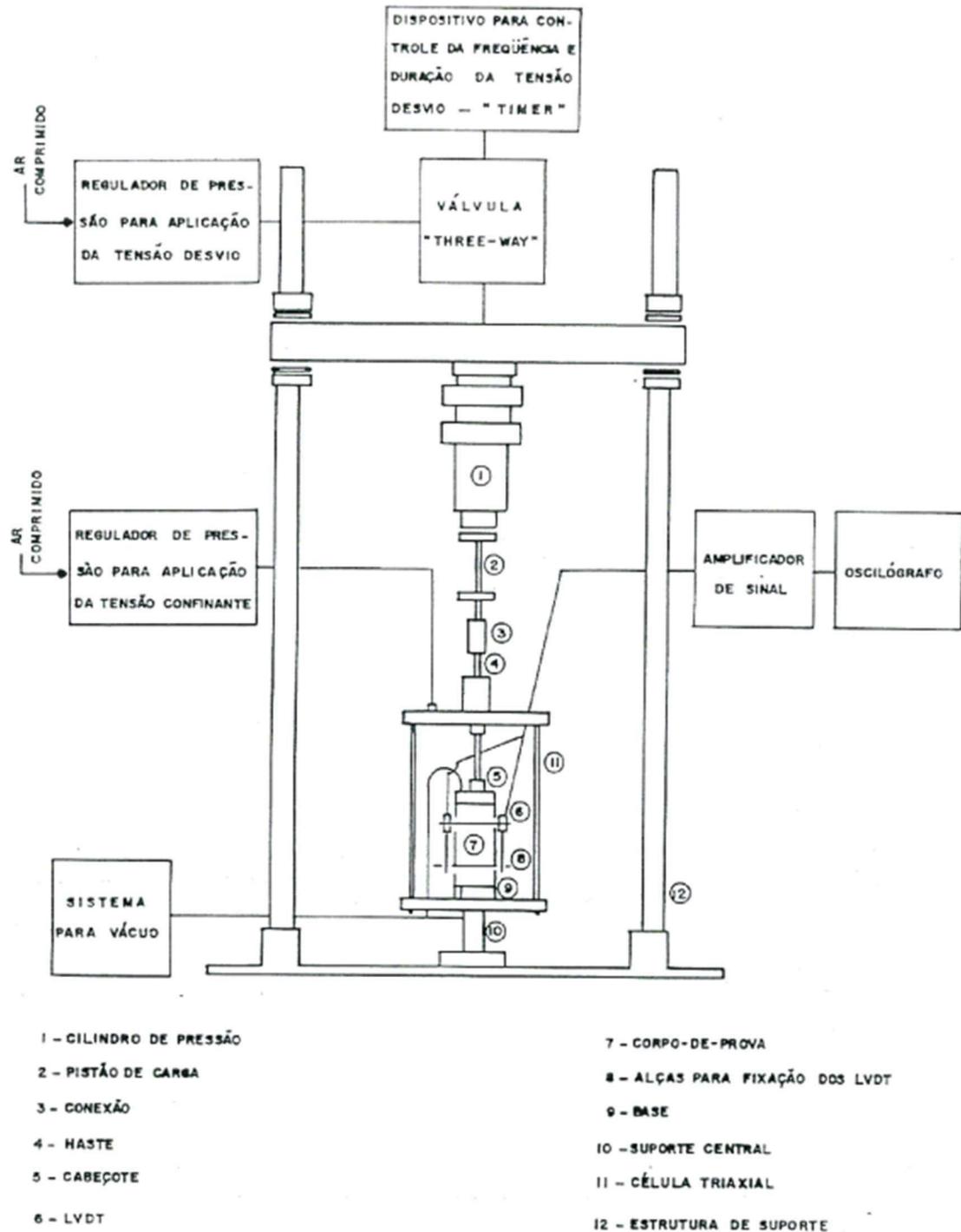
O módulo de resiliência pode ser determinado utilizando um equipamento Triaxial dinâmico, conforme na Figura 17 e desenho esquemático apresentado na Figura 18.

Figura 17 - Exemplo de Equipamento Triaxial.



Fonte: O autor.

Figura 18 - equipamento Triaxial dinâmico de compressão axial



Fonte: DNER (1994e).

Os ensaios triaxiais objetivam determinar a relação experimental que representa o comportamento dos módulos resilientes em função da tensão confinante e da tensão desviadora (MEDINA, 1997).

Onde,

M_r = módulo de resiliência;

σ_3 = pressão confinante;

σ_d = tensão desvio;

k_i = parâmetros obtidos experimentalmente.

Segundo o Cavalcante (2005), os fatores que afetam o módulo resiliente dos solos são:

- número de repetições da tensão-desvio;
- histórico de tensões;
- duração e frequência de aplicação das cargas;
- nível de tensão aplicada;
- umidade e massa específica de moldagem dos solos finos coesivos;
- tixotropia dos solos argilosos.

2.6.3 Módulo de resiliência de misturas asfálticas

O ensaio de tração indireta por compressão diametral de cargas repetidas é utilizado para a obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas, pois representa o comportamento mecânico dos revestimentos nos pontos onde ocorrem deformações de tração responsáveis pela fadiga da camada e, por sua vez, pela vida útil do pavimento (PINTO, 1991).

Segundo Pinto e Preussler (2002), o módulo de resiliência de misturas asfálticas (MR) é a relação entre a tensão de tração (σ_d) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_r) correspondente, numa temperatura T(°C), para uma certa frequência de 60 solicitações por minuto e duração de carga de 0,1s.

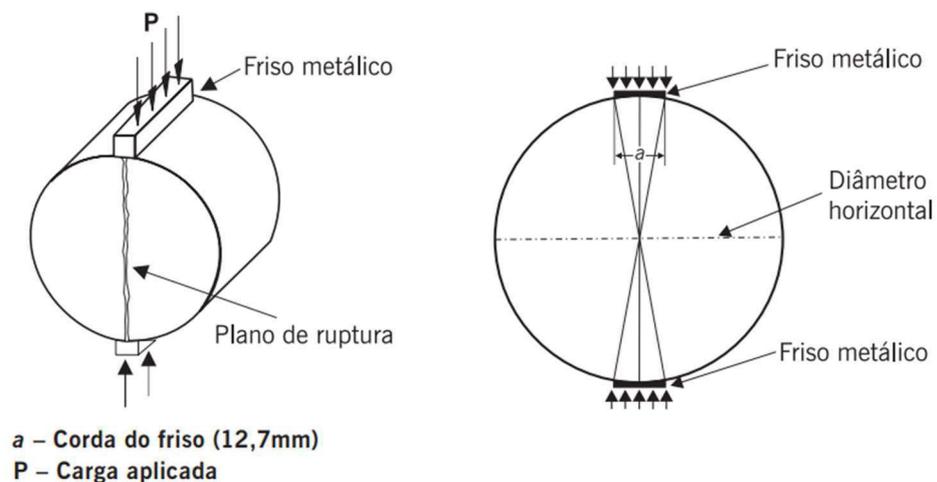
2.6.4 Ensaios de resistência a tração por compressão diametral

A resistência à tração (RT) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização das misturas asfálticas. O ensaio brasileiro de Compressão Diametral para

determinação indireta da Resistência a Tração foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro (BERNUCCI ET AL, 2008).

Segundo Bernucci (2008) o ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema do ensaio de compressão diametral.



Fonte: Bernucci et al (2008).

O ensaio é normatizado pela ABNT 15087/2004, que define os passos e equipamento utilizado na determinação da resistência à tração indireta, de maneira simples, para materiais coesivos, como mistura asfáltica, concreto de cimento Portland e solos estabilizados, utilizando normalmente uma:

- prensa mecânica calibrada com sensibilidade inferior ou igual a 20N, com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, (prensa Marshall);
- sistema de refrigeração (estufa) capaz de manter, de forma controlada, a temperatura de ensaio em $25^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ em compartimento, câmara ou ambiente laboratorial que comporte a prensa Marshall e possa abrigar vários corpos-de-prova conjuntamente;

- dispositivo de posicionamento e centralização de corpo-de-prova – Figura 6.20(b);
- paquímetro e termômetro.

O corpo-de-prova pode ser obtido diretamente do campo por extração através de sonda rotativa ou fabricado em laboratório, com altura entre 35mm a 70mm e diâmetro de $100\pm 2\text{mm}$, seguindo basicamente o seguinte procedimento para o ensaio:

- medir a altura (H) e diâmetro (D) do corpo de prova com paquímetro;
- colocar o corpo de prova na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura especificada para o ensaio;
- posicionar o corpo-de-prova no dispositivo centralizador e levar à prensa;
- ajustar o corpo de prova na prensa e aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo de-prova, segundo o plano diametral vertical;
- com o valor da carga de ruptura (F) obtido, calcula-se a resistência à tração do corpo de prova segundo a expressão:

$$\sigma_r = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (6)$$

Sendo:

σ_r = resistência a tração, kgf/cm²;

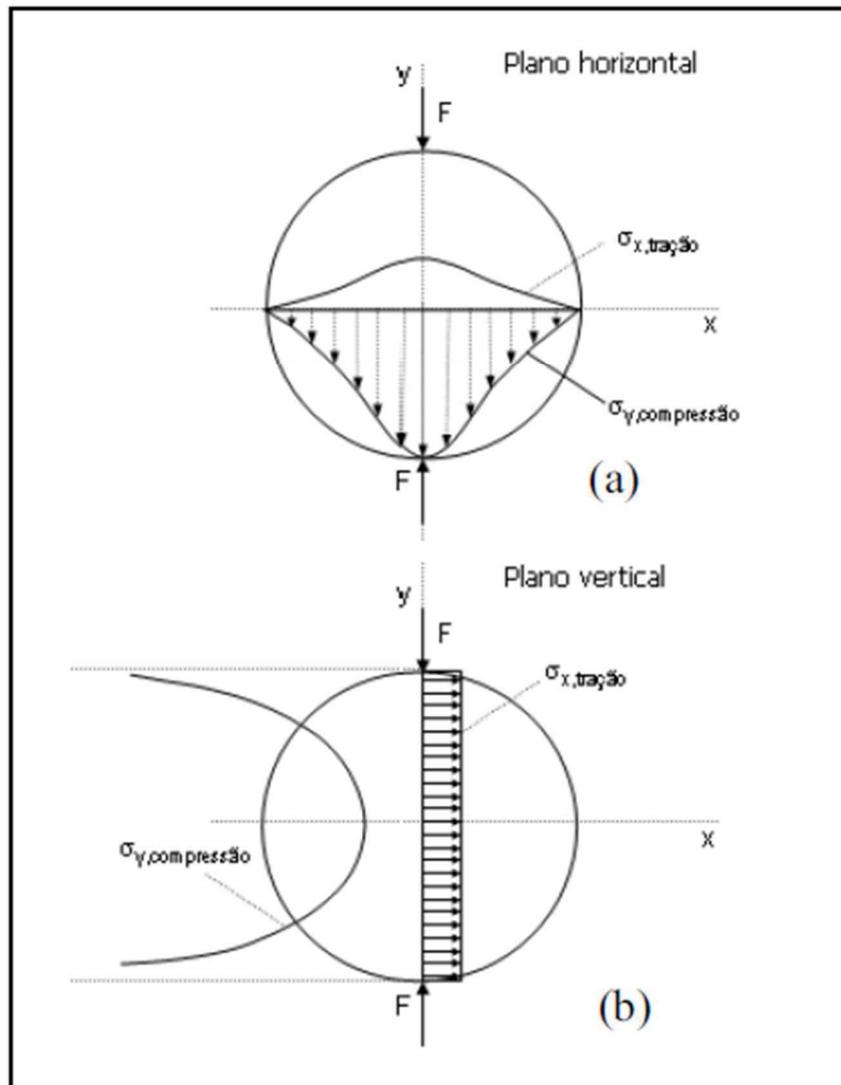
F = carga de ruptura, kgf;

D = diâmetro do corpo de prova, cm;

H = altura do corpo de prova, cm.

Na figura 21, está apresentada de maneira ilustrativa a distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametrais: horizontal e vertical do corpo de prova cilíndrico.

Figura 21 - Compressão diametral – distribuição das tensões de tração e compressão nos planos diametraes: (a) – horizontal); (b) – vertical.



Fonte: Medina et al (1997).

Segundo Pinto (1991), os principais fatores que afetam o módulo de resiliência das misturas betuminosas são:

- Fatores de carga: magnitude, forma e tipo de carregamento, frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento, histórico de tensões;
- Fatores de mistura: tipo de agregado, forma, textura e granulometria; penetração do asfalto, teor de asfalto, índice de vazios e relação filler-betume;
- Fatores ambientais: temperatura.

2.7 Análise de tensões e deformações em solos

Para analisar as tensões, deformações e deslocamentos de um sistema de camadas de solo deve-se considerar um meio totalmente elástico, compreender as hipóteses básicas envolvidas, além das inúmeras restrições impostas pelas equações, tais como: as condições de contorno, o comportamento dos materiais, e os limites de tensão e de deformação que devem ser aplicados ao corpo em estudo (AZEVEDO, 2007).

Segundo Lopes, R. A. (2019) a Teoria da Elasticidade analisa as tensões, deformações e deslocamentos admitindo as hipóteses da teoria clássica, que são:

- Homogeneidade do material (propriedades constantes na massa);
- Que o material seja isotrópico (em qualquer ponto as propriedades são as mesmas independente da direção considerada);
- Que o material seja linear-elástico (tensão e deformação são proporcionais).

Os materiais podem apresentar deformações plásticas ou elásticas. Denomina-se deformação plástica quando um material deformado pela solicitação de uma força, após a retirada da mesma, não retorna à sua configuração inicial, permanecendo total ou parcialmente em seu estado deslocado ou deformado. Entretanto, quando é retirada a força que atua nesse material, e o mesmo retorna a sua configuração original, sem manter as deformações residuais ou qualquer mudança em sua forma, denomina-se deformação elástica (AZEVEDO, 2007).

Elasticidade é a propriedade pela qual um material deformado retorna a sua configuração inicial após cessada a ação de forças externas. A teoria da elasticidade diz respeito ao estudo sistemático das tensões, deformações e deslocamentos de um material no estado elástico (AZEVEDO, 2007).

Um material elástico pode ser linear ou não-linear. Um caso especial de comportamento elástico e linear é a Lei de Hooke, que é o exemplo mais simples para corpos tridimensionais pode ser expressa como:

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (7)$$

Em que:

σ : representa as tensões do material;

E : representa a constante de proporcionalidade, conhecida como módulo de elasticidade. É o coeficiente angular da parte linear do diagrama $\sigma \times \epsilon$, e é diferente para cada material;

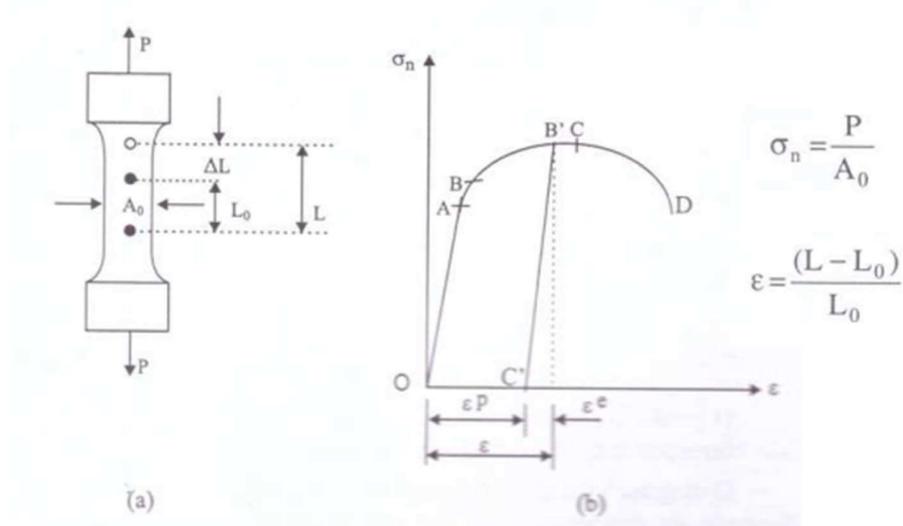
ϵ : representa as deformações sofridas pelo material devido ao carregamento.

Para materiais elásticos não-linear esta lei pode ser expressa como uma relação entre os estados de tensão e deformação, em que f_{ij} são funções.

$$\sigma_{ij} = f_{ij} \times \epsilon_{kl} \quad (8)$$

A relação entre tensões e deformações, para determinado material, fica definida por meio de um ensaio de tração, exemplificado na Figura 22.

Figura 22 - (a) ensaio de tração e (b) diagrama tensão vs. Deformação típico.



Fonte: Azevedo (2007).

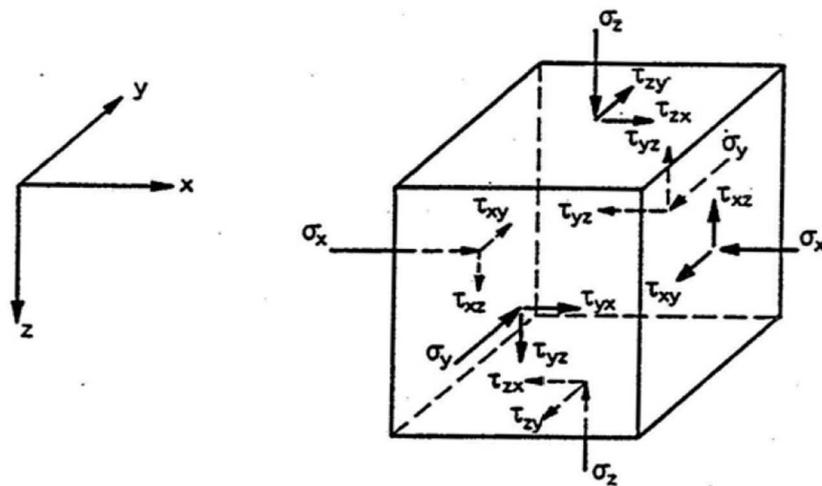
Como pode ser observado na figura, a relação $\sigma \times \epsilon$ é inicialmente linear. A teoria da elasticidade é válida até o ponto A , conhecido como limite de proporcionalidade, em que a Lei de Hooke pode ser empregada. Após o ponto A o material deforma de maneira elástica não-linear até o ponto B , conhecido como limite elástico ou limite de escoamento, que corresponde a tensão de escoamento. Na maioria dos materiais, por apresentarem uma pequena diferença de valores, pode-se considerar que os pontos A e B coincidem. Quando

este valor for indefinido, pode-se assumir que corresponda a uma deformação permanente de 0,2%, ou seja, tomando-se no eixo das abscissas a deformação específica $\epsilon=0,002$, e por esse ponto, traçando uma reta paralela ao trecho linear inicial do diagrama até sua interseção com o diagrama (AZEVEDO, 2007).

2.7.1 Definições básicas e sinais de convenção

Como muitas vezes é conveniente na mecânica dos solos considerar as tensões compressivas como positivas, essa convenção será adotada aqui. As tensões normais e de cisalhamento que atuam sobre um elemento são mostradas na Figura 23, todas as tensões apresentadas são adotadas como sendo de sinal positivo (POULOS, H, G; DAVIS, E, H, 1991).

Figura 23 - todas as tensões apresentadas são adotadas como sendo de sinal positivo.



Fonte: Poulos, H, G; Davis, E, H, (1991).

As tensões normais σ_x , σ_y , σ_z , são positivas quando direcionadas para a superfície.

A notação para a tensão de cisalhamento τ_{ij} é a seguinte:

τ_{ij} é a tensão de cisalhamento atuando em um plano normal ao eixo i na direção j;

A convenção de sinais para tensão de cisalhamento é a seguinte:

A tensão de cisalhamento é positiva quando dirigida em uma direção cartesiana negativa enquanto estiver atuando em um plano cujos pontos normais externos apontam em uma direção positiva ou, quando dirigida em uma direção cartesiana positiva enquanto

estiver atuando em um plano cujos pontos normais externos apontam em uma direção cartesiana negativa (POULOS, H, G; DAVIS, E, H, 1991).

Equilíbrio requer que:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (9)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (10)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (11)$$

2.8 Retroanálise dos módulos de resiliência

Para que um pavimento possa ser dimensionado de maneira adequada, é necessário que se conheça os valores de rigidez, ou seja, o módulo de resiliência, que governa a característica elástica dos materiais, de todas as camadas constituintes, de modo que seja possível o cálculo das tensões e deformações presentes na estrutura. No entanto, a maioria dos pavimentos em uso foi dimensionada apenas a partir do valor do Índice de Suporte Califórnia (CBR), como norteiam as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), e os valores de rigidez das diferentes camadas do pavimento são desconhecidos, o que exigiu a criação de um método para estimar tais valores: a retroanálise (FABRÍCIO, 2018).

A norma D5858 (ASTM, 2015), afirma que retroanálise é a técnica analítica utilizada para a determinação do módulo resiliente equivalente das camadas de um pavimento correspondente a uma carga aplicada e às deflexões medidas, sendo empregada em avaliações de pavimentos e projetos de reforço.

A retroanálise pode ser definida como o processo pelo qual procura-se simular o comportamento da estrutura analisada, conhecendo-se as respostas em termos de deformações ou tensões, medidas por meio de algum instrumento. É também um processo que permite a obtenção dos módulos de resiliência das camadas do pavimento pela interpretação das bacias de deformação. Esta determinação é feita a partir das bacias deflectométricas que o pavimento apresenta quando submetido ao carregamento externo, que é simulado por meio de ensaios não destrutivos como o de Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer (VILLELA E MARCON, 2001; BALBO, 2007).

Segundo Nóbrega (2003) a retroanálise tem os seguintes objetivos:

- c) A obtenção dos módulos de resiliência dos materiais na condição em que se encontram em campo;
- d) Minimizar o número de sondagens para a determinação das espessuras e coletas de amostras para a determinação dos parâmetros desejados.

Segundo Nóbrega (2003) módulo de resiliência, que define a relação entre as tensões e as deformações nas camadas do pavimento, pode ser determinado de duas formas:

1. Em laboratório, por meio do ensaio triaxial dinâmico (solos) e de compressão diametral (misturas asfálticas, materiais cimentados);
2. Analiticamente, por meio da retroanálise dos módulos resilientes a partir das bacias deflectométricas obtidas sob a superfície do pavimento.

Segundo Fabrício et. al. (1994) a maioria dos métodos de retroanálise de bacias deflectométricas, em seu procedimento, converte a estrutura do pavimento em um sistema de três camadas: subleito, camada granular única e camada betuminosa única, porém, procedimentos mais avançados podem converter em até cinco camadas: como subleito, sub-base, base, e duas camadas betuminosas, ou outras configurações. Estes métodos podem ser classificados em dois grupos:

Métodos iterativos: aqueles em que a determinação das características elásticas e geométricas das camadas do pavimento são realizadas por meio da comparação entre a bacia deflectométrica obtida em campo e a teórica de uma série de estruturas, até que as deflexões de campo sejam as mesmas que as obtidas para a bacia teórica ou apresente um resíduo admissível definido no início do processo, sendo baseados na teoria das multicamadas elásticas e o método dos elementos finitos, de formulação matemática complexa, fornecem boa acurácia (FRANCO, 2004).

Métodos simplificados: consistem na conversão do pavimento real em estruturas equivalentes mais simples, de duas ou três camadas incluindo a camada de subleito, em que a obtenção das características da estrutura do pavimento é feita por meio da utilização de equações, tabelas e gráficos.

Admite-se, como hipótese, que existe um conjunto representativo de módulos para as condições específicas de carregamento e de temperatura que faz coincidir a bacia teórica calculada com aquela obtida em campo. Essa última pode ser determinada por meio de ensaios não destrutivos, fazendo-se uso de equipamentos como a viga Benkelman ou do tipo FWD (MACHADO ET AL, 2020).

No entanto, existem limitações como possíveis interferências no ajuste da bacia deflectométrica e, por conseguinte, os módulos obtidos por retroanálise depende da profundidade da camada rígida, e também da presença de lençol d'água a pequenas profundidades (SILVA, 2008).

Podem ser utilizados no cálculo dos módulos de elasticidade os seguintes programas computacionais: EVERCALC, FEPAVE, ELSYM5, KENLAYER, REPAV e BAKFAA. Nesta pesquisa, para execução da retroanálise das bacias deflectométricas, obtidas pelo levantamento com equipamento FWD, com o intuito de se inferir o módulo de resiliência efetivo “*in situ*” das camadas do pavimento, será empregado o software BAKFAA, desenvolvido pela Federal Aviation Administration (FAA), entidade do governo estadunidense responsável pelas normas e regulamentações relacionadas à aviação civil nos Estados Unidos que, apesar de ter sido inicialmente desenvolvido para pavimentos de aeródromos, também é utilizado no segmento rodoviário. A retroanálise feita pelo software BAKFAA se baseia na análise elástica das camadas do pavimento, em que o processo de determinação dos erros utiliza a Raiz Quadrada Média (RMS – Root Mean Square) das diferenças entre os valores de deflexão do FWD e os valores de deflexão calculados (FABRÍCIO, 2018).

2.8.1 Programas computacionais

- ELSYM5

O Programa Computacional ELSYM5 (Elastic Layered System) foi desenvolvido em linguagem científica FORTRAN na década de 1970 no Instituto de Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade da Califórnia em Berkeley, inicialmente para computadores de grande porte, a versão para microcomputadores foi desenvolvida por KOOPERMANN et al (1985) e foi patrocinada pelo Federal Highway Administration (FHWA) (COUTINHO NETO et al, 2003). É um procedimento baseado na teoria da elasticidade linear de meios

estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas, (MEDINA, 1997), permite o carregamento de até 10 (dez) cargas, obtendo-se tensões e deformações em vários pontos e também a bacia de deformação (FRANCO, 2004) e método das diferenças finitas.

Segundo com Negrello (2014), o pavimento é idealizado como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, em um espaço semi-infinito no plano horizontal. Segundo Villela (1999) se admite que o material se comporta de acordo com a lei de Hooke, além disso o programa é baseado na solução de Burmister, ampliada para cinco camadas, e considera que as camadas obedecem às seguintes hipóteses: materiais isotrópicos e homogêneos; camadas horizontais e finitas, sendo o subleito um meio semi-infinito; e comportamento elástico-linear.

Para realizar os cálculos através do ELSYM5, primeiramente é necessário caracterizar o pavimento. Dados necessários para alimentação do programa: carregamento ocasionado pelo tráfego, número e localização das cargas, coeficientes de Poisson das camadas constituintes do pavimento, espessuras das camadas constituintes do pavimento, pontos em que serão analisadas as tensões, as deformações e as deslocamentos.

O programa ELSYM5, conforme já mencionado, gera tensões, deformações e deslocamentos, em vários pontos do pavimento, quando da aplicação de cargas similares às oriundas do tráfego. A retroanálise, com a utilização deste programa computacional, consiste em arbitrar valores para módulos de resiliência de um determinado pavimento, até que os resultados da bacia de deformação gerada enquadrem-se dentro de um intervalo de aceitação em relação à bacia de deformação levantada em campo, determinando assim os módulos das camadas do pavimento, os limites e médias dos módulos de resiliência podem ser vistos na Tabela 2.1, formulada nos estudos de CARDOSO (1995). (FRANCO,2004)

- BAKFAA

O BAKFAA foi desenvolvido pela Federal Aviation Administration (FAA), órgão de aviação dos Estados Unidos da América, com objetivo realizar retroanálise em pavimentos aeroportuários norte-americanos, mas que tem sua aplicação com mesma precisão em pavimentos rodoviários flexíveis, e pode também ser utilizado para pavimentos rodoviários semirrígidos com comportamento elástico. O programa tem como base a teoria

de sistemas de camadas elásticas e foi empregado para estimar os módulos de resiliência (MR) para cada camada do pavimento (NEGRELLO, 2014; FABRÍCIO, 2018).

Os parâmetros de entrada no programa são os dados de campo, sendo estes a magnitude das bacias, a carga utilizada no momento do levantamento e o raio da roda, além das espessuras das camadas da estrutura, do coeficiente de Poisson (obtido na literatura) e de uma estimativa dos módulos de resiliência iniciais. Através disto, seleciona-se as camadas que terão seus módulos calculados iterativamente e o programa busca a deflexão calculada mais próxima daquela medida em campo (NEGRELLO, 2014).

O erro é avaliado através do valor quadrático médio (RMS), o qual deve convergir a zero. Quanto menor, maior a aproximação entre a bacia calculada e a bacia medida. O erro também pode ser visualmente avaliado através de um gráfico comparativo entre deflexão calculada e deflexão medida na interface do programa (NEGRELLO, 2014).

- EVERCALC – Pavement Backcalculation

O EVERCALC baseia-se no programa Chevron n-layer e utiliza um procedimento iterativo de ajuste entre as deflexões medidas na superfície e as deflexões teoricamente calculadas na mesma para estimar os módulos resilientes das camadas do pavimento. O programa encontra uma solução quando a soma dos valores absolutos das diferenças entre as deflexões medidas e teóricas da superfície atingem uma tolerância pré-estabelecida, geralmente 10% (PEREIRA, 2007).

Para a determinação dos módulos de resiliência são necessários os seguintes elementos: espessuras e natureza das camadas, bacias de deformação medidas, temperaturas do pavimento, coeficientes de Poisson, carga aplicada no pavimento e o raio de aplicação, módulos inicial, módulos máximos e mínimos limites, número máximo de iterações permitidas e tolerância de erro aceitável para ao cálculo do módulo. De posse dos dados citados acima, o programa, calcula os módulos, atendendo a todas as restrições impostas, ou até chegar ao limite máximo de iterações permitidas no processo, cabendo lembrar, que nem sempre é possível chegar a resultados dentro dos limites requeridos (FRANCO, 2004).

Regressões internas são utilizadas no EVERCALC para se estimar os módulos iniciais, estas regressões são algoritmos desenvolvidos utilizando o módulo do pavimento, carga e vários tipos de parâmetros de bacias de deflexão (PEREIRA, 2007).

2.8.2 Critério de parada

- Raiz Quadrada Média dos Erros Percentuais

Segundo a ASTM, o critério que melhor define a acurácia da retroanálise é a Raiz Média dos Erros Percentuais (RMSE – Root Mean Square Error), que quantifica os erros acumulados entre as diferenças da bacia de deformação retroanalizada e a obtida em campo, por meio de levantamentos deflectométricos, ou seja, o grau de aproximação entre estas. A Raiz Quadrada Média é a raiz quadrada dos valores médios da soma dos quadrados das diferenças entre as deflexões calculadas e medidas dividida pelas deflexões medidas (FRANCISCO, 2012), expressa por:

$$\text{RMSE (\%)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{100 \times (dc - dm)}{dm} \right)^2} \quad (12)$$

Onde:

dc_i = deflexão calculada para o ponto de ensaio i (10^{-2} mm);

dm_i = deflexão medida no ponto de ensaio i (10^{-2} mm);

n = número de sensores do FWD.

Cada etapa de iteração dá origem a um conjunto de deslocamentos que definem a deflexão calculada, e respectivamente a um erro (RMSE – Root Mean Square Error) entre a deformada calculada e a deformada medida obtida pelos deflectômetros.

Após várias iterações, foi verificada a aproximação entre a deformada calculada e a deformada medida obtida pelos Deflectômetros, e respectiva minimização do valor do RMSE, adotando-se como critério de parada do processo de iteração e refinamento, o aumento do valor do RMSE.

Segundo Francisco (2012) se o erro for inferior a 15% (RMSE <15%), é considerado que existe uma boa relação entre os módulos de deformabilidade encontrados com o comportamento estrutural do pavimento. Machado (2012) considera uma boa correlação quando o erro é inferior a 10% (RMSE <10%). De acordo com Correia, J. (2014), um RMSE entre 4 e 5% corresponde a uma aproximação razoável na estimativa dos módulos de deformabilidade das camadas que constituem o pavimento. Já segundo a ASTM – D5858/15

(Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory) e o Washington State Department of Transportation (WSDT, 2005), o grau de aproximação aceitável situa-se entre 1 a 2% (DUARTE, 2016).

- Raiz Quadrada Média da Diferenças

Pela raiz do valor quadrático médio das diferenças, a proximidade entre as bacias de deformação retroanalísada e a obtida em campo é medida ponto a ponto. A Raiz Quadrada Média das Diferenças é a raiz quadrada dos valores médios da soma dos quadrados das diferenças entre as deflexões calculadas e medidas, expressa por:

$$\text{RMS } (\mu\text{m}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (dc - dm)^2} \quad (13)$$

Onde:

dc_i = deflexão calculada para o ponto de ensaio i (μm);

dm_i = deflexão medida no ponto de ensaio i (μm);

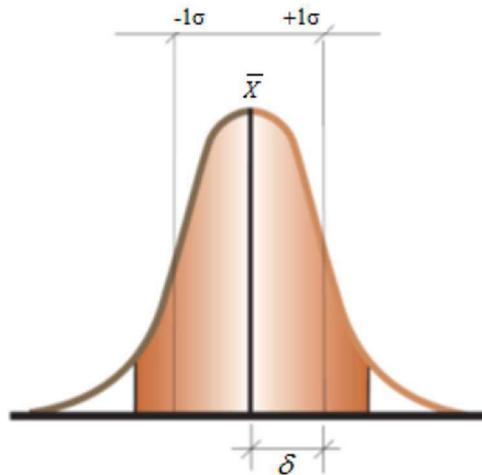
n = número de sensores do FWD.

Segundo Camarini. (2019), um RMS inferior a 5 μm corresponde a uma boa aproximação na estimativa dos módulos de deformabilidade das camadas que constituem o pavimento.

2.9 Análise Probabilística do Pavimento

A análise probabilística do pavimento considera como variáveis aleatórias os parâmetros utilizados como dados de entrada no cálculo realizado numa análise do comportamento mecânico de um pavimento, tendo em vista que para cada parâmetro existe uma distribuição de valores (Figura 24), pois a maioria dos dados de entrada como módulos de resiliência, espessura das camadas, etc., não é conhecida com precisão, seja devido à dispersão dos resultados de ensaios ou à variabilidade natural encontrada de um ponto a outro do pavimento (SILVA, L. A., 2014).

Figura 24 – Variabilidade dos parâmetros de cálculo na Análise Probabilística do comportamento de pavimento.



Fonte: Silva, L. A., (2014).

Diversos métodos probabilísticos têm sido desenvolvidos para gerar medidas de distribuição de funções de variáveis dependentes, neste trabalho, o Método F.O.S.M. (First Order, Second Moment) será usado para a análise probabilística do comportamento mecânico do pavimento proveniente da variação dos módulos resilientes.

Os parâmetros de deformabilidade do pavimento (deslocamento, tensão, deformação, entre outros) são funções de diversas variáveis consideradas aleatórias nesta análise probabilística (módulos resiliente, coeficientes, espessuras de camadas da estrutura, etc.):

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (14)$$

Segundo Silva L. A. (2014) o método FOSM foi desenvolvido para determinar a distribuição de probabilidade de uma função, com um número de variáveis aleatórias não correlacionadas, com distribuição normal, dessa forma, 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 variância. Neste caso, assume-se uma variável independente (Y) em função de (n) variáveis aleatórias não correlacionadas (x_1, x_2, \dots, x_n), cujos valores médios esperados são conhecidos (\bar{x}_i), bem como suas variâncias $V[x_i]$. Dessa forma, a própria função (Y) passa a ter uma distribuição normal com valor médio esperado \bar{Y} , e variância $[Y]$ dados por:

$$\bar{Y} = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (15)$$

$$V[Y] = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 \times V[x_i] \quad (16)$$

Devido a impossibilidade de se calcular a derivada de forma analítica neste trabalho, ela foi determinada de maneira numérica, em que se variou em $\pm 10\%$ cada parâmetro considerado como uma variável aleatória, seguindo as recomendações de Sandroni e Sayão (1992). A derivada parcial do parâmetro Y, 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:

$$\frac{\partial Y}{\partial x_i} = \frac{Y[\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i] - \bar{Y}}{0,01\bar{x}_i} \quad (17)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_i} = \frac{Y[\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i] - Y[\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i]}{0,02\bar{x}_i} \quad (18)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_i} = \frac{\bar{Y} - Y[\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i]}{0,01\bar{x}_i} \quad (19)$$

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:

$$V[Y] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y[\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i] - \bar{Y}}{0,01\bar{x}_i} \right)^2 \times V[x_i] \quad (20)$$

$$V[Y] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y[\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i] - Y[\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i]}{0,02\bar{x}_i} \right)^2 \times V[x_i] \quad (21)$$

$$V[Y] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{Y} - Y[\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i]}{0,01\bar{x}_i} \right)^2 \times V[x_i] \quad (22)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal desta pesquisa é a verificação da influência dos módulos resilientes de cada camada na compatibilidade de tensões e deformações do pavimento. Para isto, foram considerados estudos prévios disponíveis na literatura, dados de levantamentos deflectométricos, de levantamentos funcionais e de tráfego, para compor um roteiro de análise que representasse o comportamento real da estrutura, quanto aos parâmetros de deformabilidade, diante das variações de rigidez de cada camada.

Os ensaios apresentados seguiram as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), American Association of State Highway and Transportation Officials (ASSHTO), American Standard Test Method (ASTM) e metodologias disponíveis na literatura.

Esta pesquisa avaliou a condição estrutural do pavimento, por meio de ensaios não destrutivos de FWD, além de ter realizado e verificado a consistência das retroanálises de pavimentos, verificado a compatibilidade entre o BAKFAA e ELSYM5, analisado os parâmetros de deformabilidade do pavimento, e por meio de um estudo probabilístico sobre os principais parâmetros da estrutura dos pavimentos, verificou-se a influência dos módulos resilientes no comportamento mecânico do.

Para a realização deste estudo foi escolhido subtrecho homogêneo SH-04 da BR-230/PB avaliada por Cavalcante, no ano de 2005, por ser um estudo de caso interessante de se analisar, pois a rodovia começou a fissurar prematuramente com 3 anos de serviço, mesmo com uma estrutura robusta para o tráfego previsto em projeto.

Cavalcante (2005) avaliou as características funcionais e estruturais do lote III da rodovia federal BR-230, pista duplicada, entre o km 17,3 – km 147,9, com extensão de 30,6 km, do lado direito, no sentido do tráfego, iniciando na Campina Grande até Ingá, na Paraíba, devido a sua deterioração prematura. A avaliação estrutural se caracterizou pela divisão do trecho em 20 segmentos homogêneos, onde foram realizados levantamentos deflectométricos com Viga Benkelman e FWD para a obtenção das bacias deflectométricas utilizadas para o processo de retroanálise na caracterização do comportamento resiliente “in situ” do pavimento, além de ensaios laboratoriais para a obtenção dos parâmetros de

deformabilidade para as camadas de revestimento em CBUQ, camada de base constituída de brita graduada simples, sub-base de saibro, reforço e subleito.

3.1 Pavimento: caracterização do trecho analisado

O Pavimento estudado foi o trecho duplicado da rodovia BR-230, no Estado da Paraíba, situado entre o acesso a cidade de Ingá – Campina Grande, com 30,6 km de extensão, lote III, Segmento: km 117,3 – km 147,9.

Figura 25 - Mapa de localização do trecho estudado.

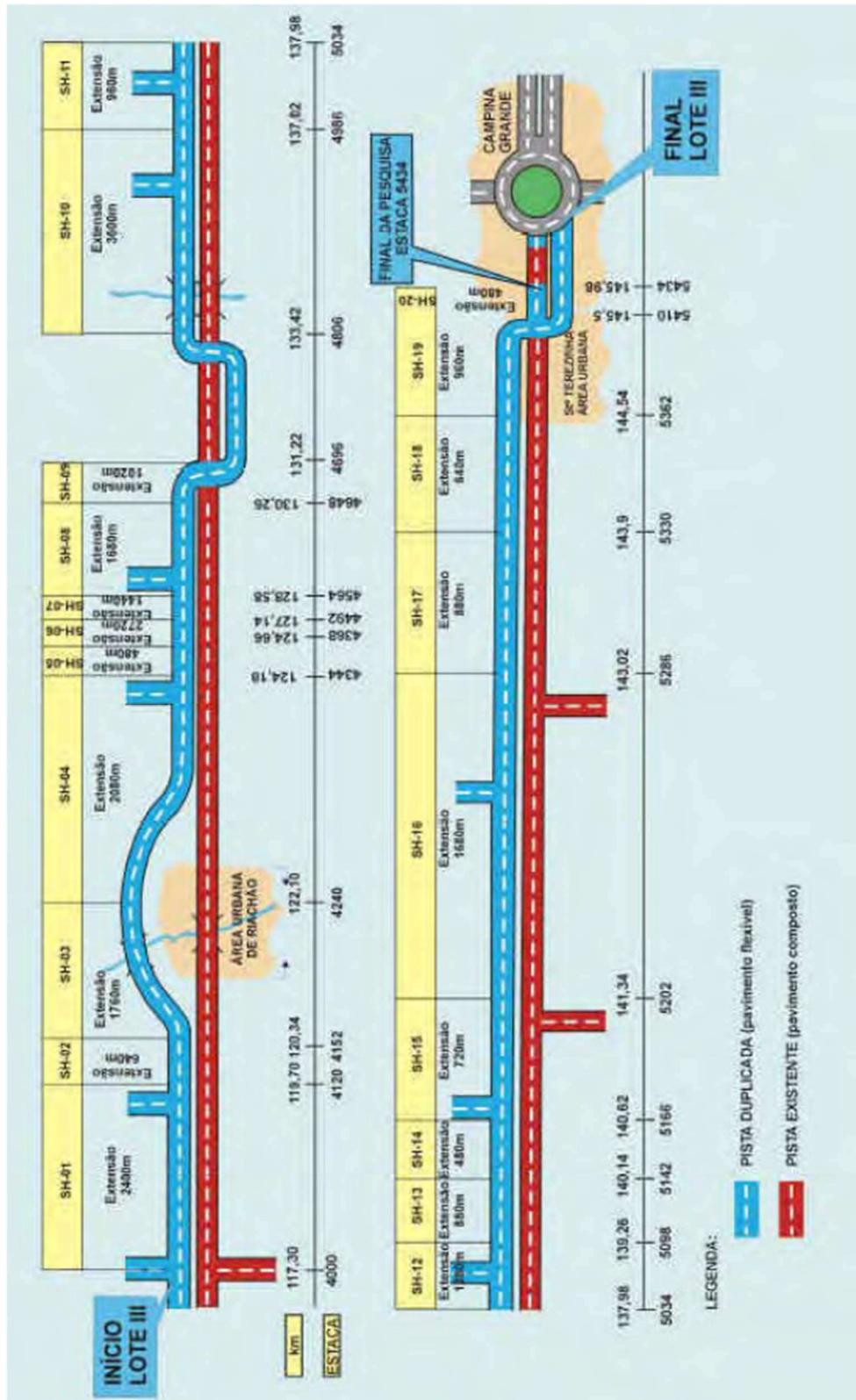


Fonte: Cavalcante (2005).

No lado esquerdo, no sentido Ingá – Campina Grande, da estaca 4000 a 5434, onde a maior parte da pista duplicada se desenvolve, existe dois segmentos constituídos de pavimento composto (camada de concreto asfáltico sobre placas de concreto), entre as estacas 4699-4799 e 5440-5535, com extensão de 3,9 km, que como não pertence ao escopo da pesquisa não foram realizados ensaios.

A segmentação homogênea foi realizada por Cavalcante (2005), em que o trecho foi dividido, por suas condições funcionais e estruturais, segundo o “Método das Diferenças Acumuladas” da AASHTO, em 20 segmentos homogêneos (Figura 26), que são segmentos que apresentam características semelhantes, destes, selecionaram-se 10 bacias de deflexão do subtrecho “SH 04” para uso nesta dissertação.

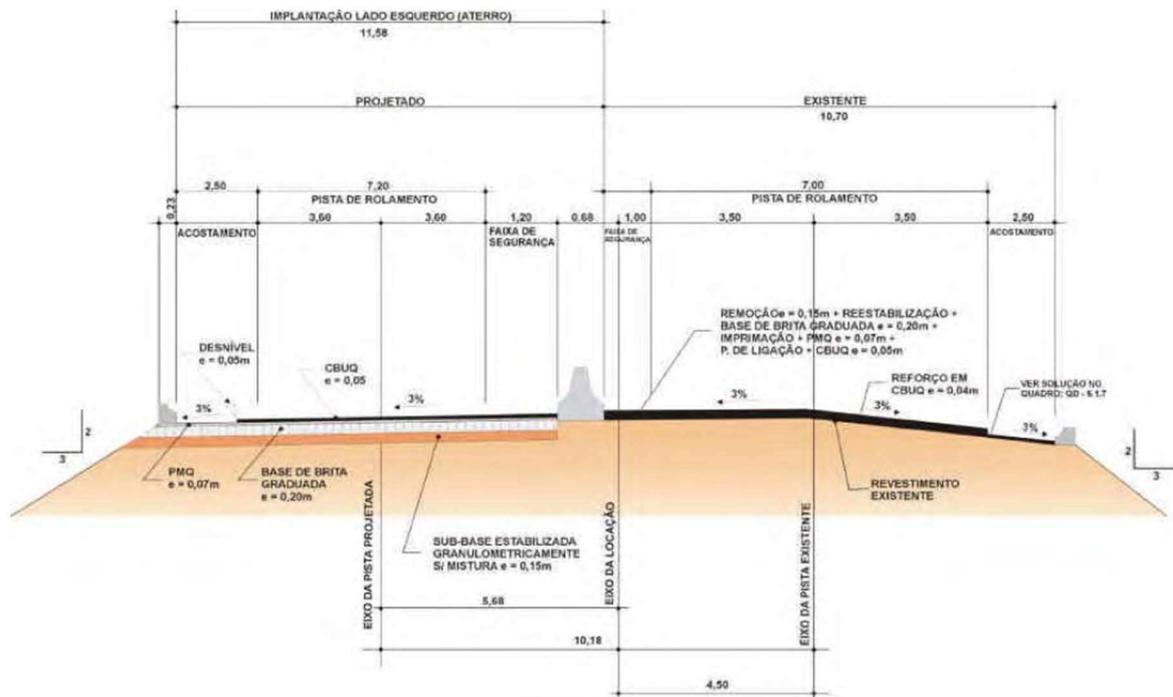
Figura 26 - Segmentos homogêneos da BR-230/PB.



Fonte: Cavalcante (2005).

O dimensionamento das camadas do pavimento foi realizado considerando valor único de CBR para o subleito igual a 7%. Desse modo, o trecho apresenta um pavimento flexível com estrutura única de espessuras das camadas de sub-base, base e revestimento. O revestimento é composto por uma camada de base com 7 cm de Pré-mistura à quente (PMQ) da faixa B e 5 cm de camada de rolamento de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) da faixa C. A base é composta de brita graduada simples e sub-base de saibro estabilizada granulometricamente sem mistura, como mostra a Figura 27 (CAVALCANTE, 2005).

Figura 27 - Seção transversal da pista duplicada.



Fonte: Cavalcante (2005).

3.2 Estudo de tráfego

O Estudo de Tráfego teve como objetivo obter dados referentes ao comportamento deste tráfego ao longo da vida útil das vias no que se refere ao pedestre, o veículo, a via e finalmente o meio ambiente, com o propósito de se determinar a capacidade das vias e, em consequência, o estabelecimento dos meios construtivos necessários à melhoria da circulação ou das características de seu projeto.

Com o intuito de determinar os Volumes Médios Diários do tráfego e fluxos atuais, suas composições por tipo de veículo, as projeções para o período de vida útil do projeto e os parâmetros necessários ao dimensionamento do pavimento, Cavalcante (2005) realizou o estudo de tráfego na rodovia BR-230/PB, segmento Ingá-Campina Grande (km 117,3 – km 147,9), por meio dos seguintes procedimentos: contagem volumétrica e classificatória de veículos; coleta dos dados históricos dos levantamentos de tráfego; consideração da sazonalidade; determinação do volume médio diário de tráfego; projeção do tráfego e cálculo do Número “N”.

Os “Números de Repetições do Eixo Simples Padrão N”, para um período de 15 anos de vida útil, presentes na Tabela 1, foi calculado tanto na metodologia do “USACE”, conhecida como o método do Eng. Murilo Lopes de Souza, quanto pelo método das deflexões recuperáveis da “AASHTO”.

Tabela 1 - Número de repetições do eixo padrão.

Método	Metodologia	Série	Série	Série
		1987-1998	1999-2008	2009-2013
Pista dupla	AASHTO	$7,8 \times 10^6$	$8,5 \times 10^6$	$1,3 \times 10^7$
	USACE	$1,4 \times 10^7$	$2,8 \times 10^7$	$4,5 \times 10^7$

Fonte: Cavalcante (2005).

Porém, esses números certamente estariam defasados caso fosse realizado um novo estudo de tráfego para esta rodovia, por isso, e como o pavimento encontra-se em estado de deterioração e esta pesquisa tem por finalidade avaliar a condição estrutural da rodovia BR-230/PB, será utilizado para fins classificatórios o número N que consta no IP-02/2004 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS, do Estado de São Paulo, largamente difundido para estudos devido à sua confiabilidade no projeto e dimensionamento de pavimentos para Ruas e Avenidas locais, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das vias.

Tráfego previsto	Vida de projeto	N característico
Leve	10	10^5
Médio	10	5×10^5
Meio Pesado	10	2×10^6
Pesado	12	2×10^7
Muito Pesado	12	5×10^7

Fonte: IP-02/2004.

3.3 Ensaaios não destrutivos

O levantamento deflectométrico utilizando o FWD utilizado nesta pesquisa foi realizado por Cavalcante (2005), em julho de 2004, seguindo a metodologia de ensaio do DNIT PRO-273/96. Durante o ensaio, os deslocamentos recuperáveis (deflexões) D0, D1, D2, D3, D4, D5 e D6, foram registrados por geofones instalados ao longo de uma barra metálica, posicionados respectivamente a 0, 200 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 900 mm e 1500 mm do ponto de aplicação da carga na superfície do pavimento. Foram registrados, também, alguns dados relevantes: temperatura do ar em 26°C e do pavimento em 34°C, diâmetro do prato com 15cm e intensidade da carga aplicada com carga equivalente ao eixo padrão rodoviário de 8,2 tf.

Como esta pesquisa irá desenvolver a reformulação da metodologia de retroanálise tão somente a partir da avaliação estrutural do subtrecho homogêneo SH-04 da rodovia BR-230/PB - lote III, foram coletados apenas as leituras deflectométricas desse subtrecho, apresentados na Tabela 3.

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

Tabela 3 - Bacias de deflexões do subtrecho homogêneo SH-04.

Bacias de Deflexões (cmm)							
Estaca	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	0 cm	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	150 cm
4306	55,51	39,89	30,28	17,71	11,61	4,36	1,56
4310	49,21	35,91	27,24	15,97	10,38	3,73	1,46
4314	52,38	38,06	28,57	16,79	10,96	3,88	1,38
4318	66,57	45,86	34,36	20,39	14,02	6,66	3,59
4322	68,76	46,73	34,94	20,46	13,96	6,54	3,58
4326	66,70	50,29	39,77	25,66	18,18	8,10	3,46
4330	68,56	51,54	40,51	25,82	18,12	7,83	3,14
4334	41,20	28,70	21,50	12,40	8,30	3,30	1,20
4338	43,30	30,30	22,70	13,00	8,60	3,30	1,10
4342	49,90	37,20	29,20	18,40	13,00	6,20	2,80
Média	56,21	40,45	30,91	18,66	12,71	5,39	2,33
Característica	66,87	48,38	37,38	23,25	16,19	7,27	3,40
Mínimo	41,20	28,70	21,50	12,40	8,30	3,30	1,10
Máximo	68,76	51,54	40,51	25,82	18,18	8,10	3,59
Desvio padrão	10,66	7,94	6,47	4,59	3,47	1,88	1,07
Variância	1,14E+02	6,30E+01	4,19E+01	2,10E+01	1,21E+01	3,52E+00	1,15E+00
Coef. Variação	18,97%	19,62%	20,94%	24,59%	27,32%	34,83%	46,08%
z	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Limite mínimo	29,55	20,61	14,73	7,19	4,03	0,70	0
Limite máximo	82,87	60,29	47,09	30,13	21,40	10,08	5,01

Nota: Temperatura do pavimento 34°C e temperatura do ar 26°C, no momento do ensaio.

Fonte: Cavalcante (2005).

Os valores de deflexão máxima (D0) representam a condição estrutural do pavimento como um todo, 40% das leituras de deflexões máximas medem entre 40 cmm e 55 cmm e 60% estão entre 55 cmm e 70 cmm.

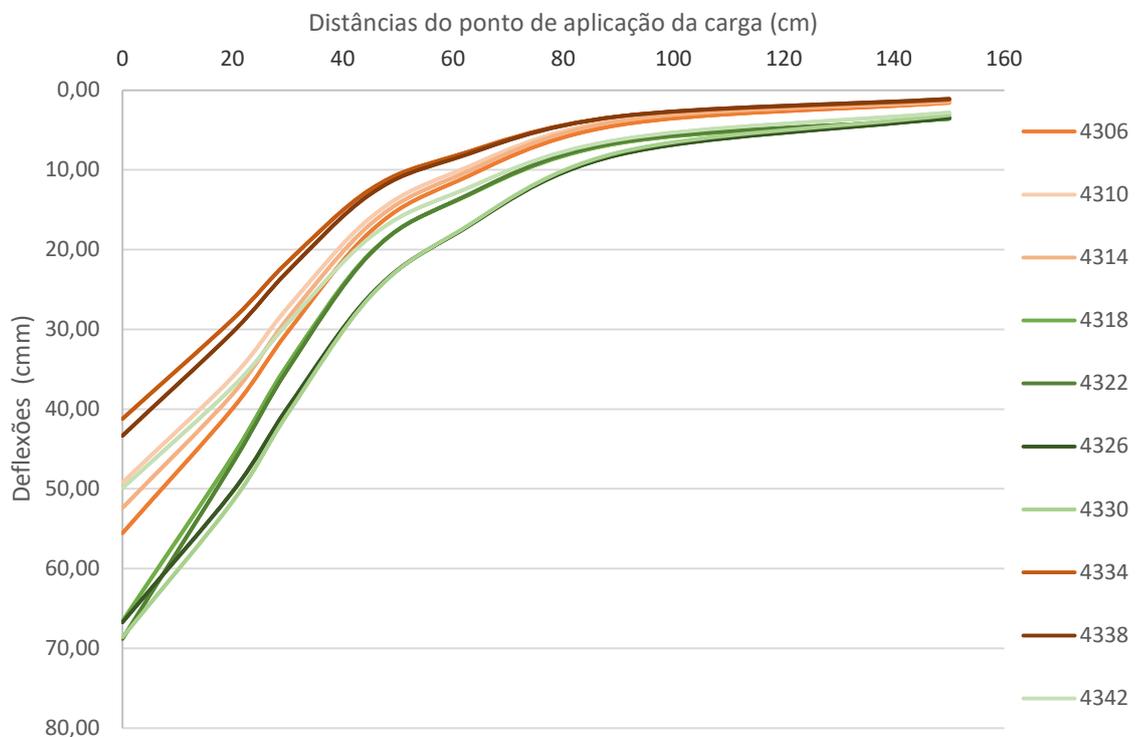
Informações acerca das condições de deformabilidade das camadas finais de terraplenagem ou subleito podem ser obtidas por meio dos valores D6. O subtrecho da rodovia em estudo apresenta em sua totalidade valores superiores 1cmm e inferiores a 8 cmm. Estes resultados indicam módulos de resiliência do subleito superiores a 1500 kgf/cm² em grande parte do trecho, por experiências citadas por Lopes (2019).

Observa-se que o coeficiente de variação aumenta conforme aumenta a distância do ponto de aplicação da carga. E apesar de serem tratados como segmentos homogêneos, as

deflexões nos 7 pontos da bacia apresentara alta variabilidade, atingindo valores de coeficientes de variação (CV) da ordem de 40%, dessa forma, não é recomendado utilizar valores médios, nem deflexões características.

Com os dados deste ensaio foi possível representar as bacias de deflexões em um gráfico de deslocamentos verticais (cmm) versus deslocamentos horizontais (cm) dos pontos D0 a D6, obtidas para cada estaca (Figura 28), que apresentaram comportamento das deflexões nas camadas semelhante em cada estaca, com distorções menores à medida que se afasta do ponto de aplicação da carga.

Figura 28 - Bacias deflectométricas do subtrecho homogêneo.



O ensaio de FWD fornece as deflexões com as unidades em cmm, no entanto, para se realizar a retroanálise no BAKFAA é necessário que as unidades das deflexões estejam em μc . Dessa forma, foi realizada a transformação das unidades da seguinte forma:

$$d_{\mu\text{c}} = d_{\text{cmm}} \times 10 \quad (23)$$

Onde:

cmm = 10^{-2} mm – lê-se centésimo de milímetro;

$\mu\text{c} = 10^{-3} \text{ mm}$ – lê-se micrômetro ou milésimo de milímetro.

A temperatura do ar varia de uma região geográfica para outra, conseqüentemente a temperatura do pavimento também varia. A rigidez da mistura asfáltica é diretamente proporcional à temperatura do pavimento, e ao variar a rigidez da mistura, modifica-se a distribuição de tensões, a vida de fadiga, e a resistência à deformação plástica (PINTO, 2016).

O ensaio de módulo de resiliência é realizado a uma temperatura de 25°C, que representa a média anual da temperatura do ar. No entanto, como a camada de revestimento está diretamente exposta à radiação solar, sua temperatura média pode variar de 30 a 35 °C (PINTO, 2016).

Dessa forma, as deflexões obtidas com FWD devem ser normalizadas para a carga do semieixo padrão de 4000 kgf, com o intuito de eliminar a influência da variação do carregamento, pois, mesmo mantendo-se fixa a configuração do carregamento, as variações na temperatura do pavimento alteram o valor da carga aplicada, devido à variação da rigidez da camada asfáltica. Para exemplificar, com a diminuição da temperatura ocorre um aumento na rigidez da camada asfáltica e conseqüentemente um aumento no valor da carga aplicada (LUIS, 2009).

$$\text{Deflexão normalizada} = \text{deflexão FWD} \times \frac{\text{Carga padrão}}{\text{Carga FWD}} \quad (24)$$

Onde, carga padrão = 4000 kgf.

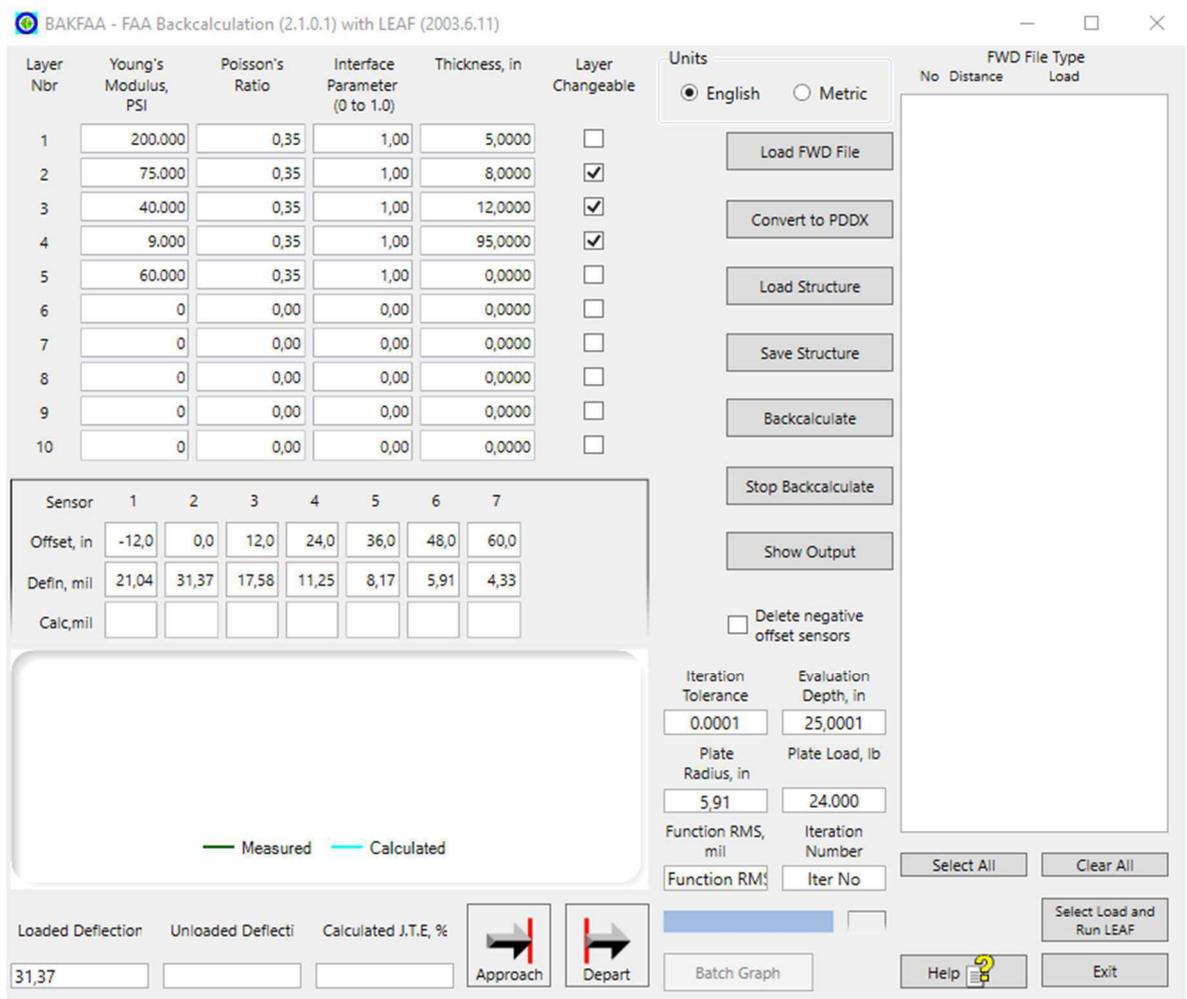
Realizada a relação da carga padrão com a carga medida em cada ponto, foi observada uma variação desprezível, que pouco tem influência sobre a rigidez da camada asfáltica sendo, dessa forma, viável para esse estudo a utilização dos dados deflectométricos medidos no ensaio de FWD para a realização da retroanálise.

3.4 Retroanálise da Bacia de Deflexão

A retroanálise teve o objetivo de determinar as características estruturais do pavimento por meio das bacias de deflexões obtidas a partir dos ensaios deflectométricos. A metodologia consistiu em determinar os módulos resilientes (MR) das camadas asfálticas por meio de um processo iterativo utilizando o programa computacional BAKFAA, por já ser um programa amplamente consolidado para as análises de projetos.

A partir dos dados do levantamento defletoométrico, efetuou-se a retroanálise das bacias de deflexão com o auxílio do software BAKFAA, que ao ser iniciado, como pode ser observado na Figura 29 a tela de abertura do BAKFAA, deve-se optar na seção Units (unidades) pelo sistema de unidades que se encontram os dados de entrada e será realizada a retroanálise. Nesta pesquisa, optou-se pelo Metric (sistema métrico). Posteriormente, deve-se alimentar o software BAKFAA com os dados de entrada da estrutura para a realização da retroanálise.

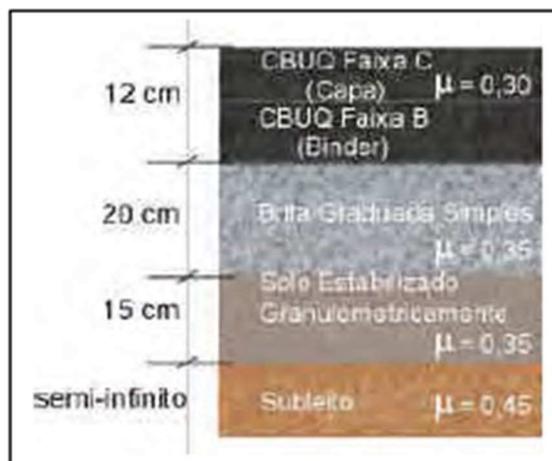
Figura 29 - Página de iniciação do software BAKFAA.



Para caracterizar a estrutura, é necessário informar o módulo de resiliência inicial (MPa), o coeficiente de Poisson, o parâmetro de condição de interface e a espessura (mm) de cada uma das camadas que constitui o pavimento.

Diante do exposto, por obter valores aproximados, os valores dos módulos de resiliência iniciais, coeficientes de Poisson e espessuras das camadas foram obtidos da dissertação de mestrado de Cavalcante (2005), que considerada a estrutura de quatro camadas cujo corte transversal está ilustrado na Figura 30, e os materiais empregados nas camadas de revestimento, base, sub-base e subleito do pavimento, bem como suas respectivas espessuras e coeficientes de Poisson estão apresentados na Tabela 5, como no processo de retroanálise, os cálculos necessários se baseiam na teoria das camadas elásticas de Burmisnter que são para análise de 3 camadas, ao se fazer a extrapolação para 4 ou 5 camadas, os resultados são aproximações e quanto maior o número de camadas maiores as distorções, por isso optou-se por associar as camadas do revestimento.

Figura 30 - Estrutura de quatro camadas utilizada como dados de entrada no BAKFAA.



Fonte: Cavalcante (2005).

Tabela 4 - Estrutura do pavimento no subtrecho homogêneo SH-04.

Nº	Camada	Espessura (cm)	Material	Coef. de Poisson	Módulos semente (Mpa)
1	Revestimento	12	CBUQ Faixa C	0,30	2000
2	Base	20	Brita graduada simples	0,35	100
3	Sub-base	15	Solo estabilizado granulometricamente sem mistura	0,35	100
4	Subleito	∞	-	0,45	100

Nota: * Solo selecionado, sem correção granulométrica, estabilizado por compactação

Fonte: Cavalcante (2005).

A norma ASTM – D5858/15 (Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory) alerta sobre como a escolha dos módulos de elasticidade iniciais pode afetar os módulos de elasticidade finais, e possivelmente falhar ao encontrar uma solução fora dos limites de tolerância dos erros entre a bacia de deflexão medida e a calculada.

O valor de Interface Parameter (parâmetro de condição de interface de cada camada) foi adotado como 1,00, que se refere à condição de atrito total, ou plenamente aderida.

O programa solicita que sejam registrados os seguintes dados do levantamento deflectométrico: valor das deflexões medidas (μc), a distância de cada sensor ao ponto de aplicação da carga (mm), raio do prato (mm) e carga aplicada (kN).

Em seguida, deve-se marcar na seção “Layer Changeable” as camadas que serão realizadas a retroanálise, por meio do cálculo iterativo de seus módulos de resiliência, e marcar a opção “Delete negative offset sensors”, quando não existem sensores antes do ponto de aplicação da carga.

A Figura 31 mostra um exemplo de dados inseridos no programa (BAKFAA).

Figura 31 - Exemplo de dados de entrada inseridos no BAKFAA.

BAKFAA - FAA Backcalculation (2.1.0.1) with LEAF (2003.6.11)

Layer Nbr	Young's Modulus, MPa	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness, mm	Layer Changeable
1	2000,00	0,30	1,00	120,00	<input checked="" type="checkbox"/>
2	100,00	0,35	1,00	200,00	<input checked="" type="checkbox"/>
3	100,00	0,35	1,00	150,00	<input checked="" type="checkbox"/>
4	100,00	0,45	1,00	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>
5	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
6	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
7	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
8	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
9	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>
10	0,00	0,00	0,00	0,00	<input type="checkbox"/>

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, mm	0,0	200,0	300,0	450,0	600,0	900,0	1500,0
Defln, mc	555,1	398,9	302,8	177,1	116,1	43,6	15,6
Calc, mc							

English Metric

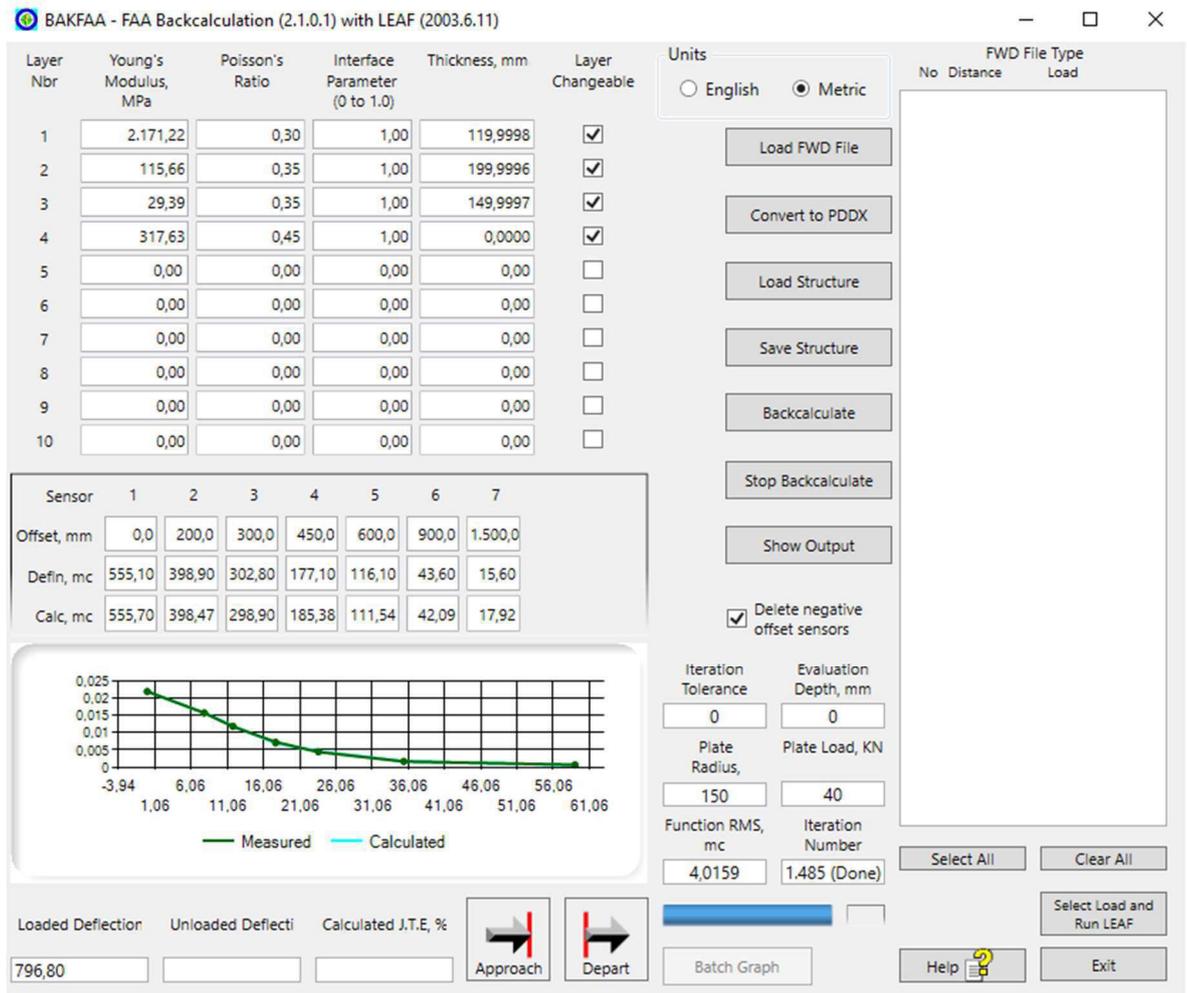
 Delete negative offset sensors

Iteration Tolerance: Evaluation Depth, mm:
 Plate Radius: Plate Load, KN:
 Function RMS, mc: Iteration Number:

Loaded Deflection: Unloaded Deflecti: Calculated J.T.E, %:

Por fim, pressiona-se a opção Backcalculate (retrocalcular) para realizar a retroanálise (Figura 32). Por meio de iterações, o software calculará os módulos de resiliência e a bacia de deflexões, avaliando o erro através do valor da raiz quadrática média (RMS), de maneira que quanto mais próximo à zero, mais próximo será o valor da bacia de deflexão calculada e a medida em campo.

Figura 32 - Exemplo de retroanálise realizada.



Os valores dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise das camadas devem ser analisados e verificados se estão de acordo com o comportamento real desses materiais em campo.

3.5 Análise de consistência e compatibilidade na retroanálise

Esta pesquisa desenvolveu um novo método de análise de consistência na retroanálise por meio da redução do RMSE (%) no cálculo do módulo de resiliência de pavimentos flexíveis, determinando uma metodologia para o cálculo o módulo resiliente das camadas do pavimento a partir da camada mais contribuinte para a deflexão elástica total na superfície do pavimento. Este método visa verificar a uma maior acurácia e precisão ainda na fase de projeto sobre o comportamento esperado dos pavimentos no campo.

3.5.1 Avaliação da evolução das deflexões

A estimativa das deflexões do pavimento foi feita por meio de uma análise da tensão/deformação da estrutura do pavimento com o auxílio do software Elastic Layered System (ELSYM5), criado pela Universidade da Califórnia. O software calcula as tensões, deslocamentos e deformações para um sistema tridimensional de camadas elásticas.

O software ELSYM5 é originalmente escrito na linguagem FORTRAN, que dificulta sua execução nos computadores atuais, dessa forma, foi utilizada uma linguagem compilada do programa. Compilação é o processo de "tradução" do programa escrito em uma linguagem de programação, no caso FORTRAN, para um formato no qual o computador entenda. A compilação gera um ficheiro binário (arquivo de dados executável) a partir do código fonte.

Para a execução do programa ELSYM5 compilado são necessários 4 arquivos como mostra a Figura 33:

- DADOS: um arquivo com os dados de entrada para o ELSYM5 compilado;
- ELSYM5: texto de introdução do programa ELSYM5;
- ELSYM5_win7OrLater: o programa ELSYM5 compilado;
- OUT: um arquivo com os dados de saída do ELSYM5 compilado;

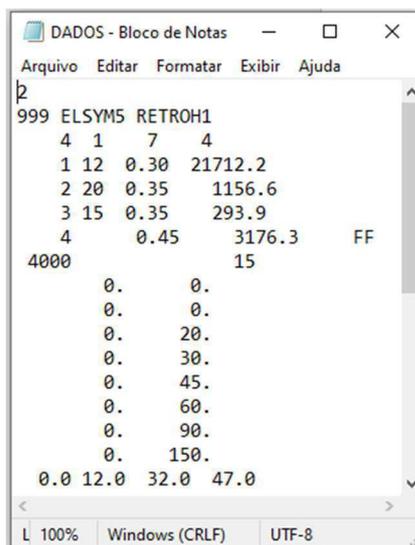
Figura 33 - Arquivos necessários para a execução do programa ELSYM5.

Nome	Data de modificação	Tipo
DADOS	08/05/2020 07:24	Arquivo DAD
ELSYM5	24/09/1985 13:57	Arquivo INS
ELSYM5_win7OrLater	09/07/2016 10:54	Aplicativo
OUT	08/05/2020 07:24	Arquivo DAT

Com o arquivo “DADOS” aberto, inserem-se os dados referentes às características das camadas elásticas (quantidade de camadas, espessura (cm), coeficiente de Poisson e o módulo de resiliência (kgf/cm^2), obtido anteriormente na retroanálise), aos dados das coordenadas (coordenadas (x,y) e profundidade z, onde se deseja saber os deslocamentos na estrutura), à condição de contato entre as interfaces das camadas (FF – plena aderência com total atrito ou NF – não aderente ou sem atrito), e aos dados das carregamento (a carga

aplicada (kgf) e o raio de aplicação da carga (cm)). A Figura 34 apresentam exemplos de dados inseridos no programa.

Figura 34 - Exemplo de dados de caracterização inserido no arquivo “DADOS”.



A carga aplicada foi adotada como sendo 4000 kgf, diâmetro do prato de 15,0 cm sob as camadas de interesse, e a condição de contato entre as interfaces das camadas como apresentando plena aderência (FF).

Para o software realizar os cálculos de deslocamento, deve-se salvar e fechar o arquivo “DADOS” com os dados de entrada inseridos. Então, seleciona-se a opção Abrir com o botão direito do mouse no arquivo “ELSYM5_win7OrLater” para executar o ELSYM5 compilado, em seguida será gerado o arquivo de saída “OUT” resultados de tensão, deformação e deslocamento para os pontos determinados como apresentados no exemplo da Figura 35.

Figura 35 - Exemplo de tela do arquivo “OUT” com dados de saída.

```

OUT - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
1 ELSYMS 5/80 - 3A, ELASTIC LAYERED SYSTEM WITH ONE TO TEN NORMAL IDENTICAL CIRCULAR UNIFORM LOAD(S)
0 ELASTIC SYSTEM 1 - ELSYMS RETROH1
0 ELASTIC POISSONS
LAYER MODULUS RATIO THICKNESS
1 21712. 0.300 12.000 IN
2 1157. 0.350 20.000 IN
3 294. 0.350 15.000 IN
4 3176. 0.450 SEMI-INFINITE
0 1 LOAD(S), EACH LOAD AS FOLLOWS
0 TOTAL LOAD..... 4000.00 LBS
LOAD STRESS..... 5.66 PSI
LOAD RADIUS.... 15.00 IN
0 LOCATED AT
LOAD X Y
1 0.000 0.000
0 RESULTS REQUESTED FOR SYSTEM LOCATION(S)
0 DEPTH(S)
Z= 0.00 12.00 32.00 47.00
X-Y POINT(S)
X= 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
Y= 0.00 20.00 30.00 45.00 60.00 90.00 150.00
1 ELSYMS 5/80 - 3A ELASTIC LAYERED SYSTEM WITH ONE TO TEN NORMAL IDENTICAL CIRCULAR UNIFORM LOAD(S)
0 ELASTIC SYSTEM 1 - ELSYMS RETROH1
0 Z= 0.00 LAYER NO 1
0 X= 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
Y= 0.00 20.00 30.00 45.00 60.00 90.00 150.00
0 N A T S
S-0.1553E+02-0.6706E+01-0.3539E+01-0.1275E+01-0.3862E+00 0.4512E-01 0.1499E-02
S-0.1553E+02-0.2431E+01 0.5682E+00 0.1748E+01 0.1600E+01 0.7583E+00 0.2823E-01
S-0.5659E+01-0.5051E-01 0.1947E-01 0.2877E-01 0.2650E-01 0.2088E-01-0.2150E-02
0 S R R E
S 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
S 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
S 0.0000E+00 0.8649E-06 0.5335E-06-0.1178E-05 0.2196E-07 0.4770E-06 0.7023E-07
0 P C L R E
P-0.5659E+01-0.5051E-01 0.5682E+00 0.1748E+01 0.1600E+01 0.7583E+00 0.2823E-01
P-0.1553E+02-0.2431E+01 0.1947E-01 0.2877E-01 0.2650E-01 0.4512E-01 0.1499E-02
P-0.1553E+02-0.6706E+01-0.3539E+01-0.1275E+01-0.3862E+00 0.2088E-01-0.2150E-02
0 P C L E S S
P 0.4935E+01 0.3328E+01 0.2054E+01 0.1512E+01 0.9931E+00 0.3687E+00 0.1519E-01
P 0.4935E+01 0.1190E+01 0.2743E+00 0.8598E+00 0.7867E+00 0.3566E+00 0.1337E-01
P 0.0000E+00 0.2138E+01 0.1779E+01 0.6518E+00 0.2063E+00 0.1212E-01 0.1825E-02
0 D L M S
U 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
U 0.0000E+00-0.5492E-02-0.5134E-02-0.3747E-02-0.2416E-02-0.7819E-03-0.4370E-04
U 0.5557E-01 0.3983E-01 0.2989E-01 0.1854E-01 0.1115E-01 0.4205E-02 0.1794E-02

```

Entre os resultados apresentados, serão utilizadas para o cálculo do RMS (%) entre as deflexões medidas e calculadas as deflexões em (Z=0; Y=0; X= 0; 20; 30; 45; 60; 90; 150cm de distância d ponto de aplicação da carga), e para o cálculo da contribuição de cada camada serão utilizadas as deflexões em (X=0; Y=0; Z= 0; 12; 32; 47cm de profundidade).

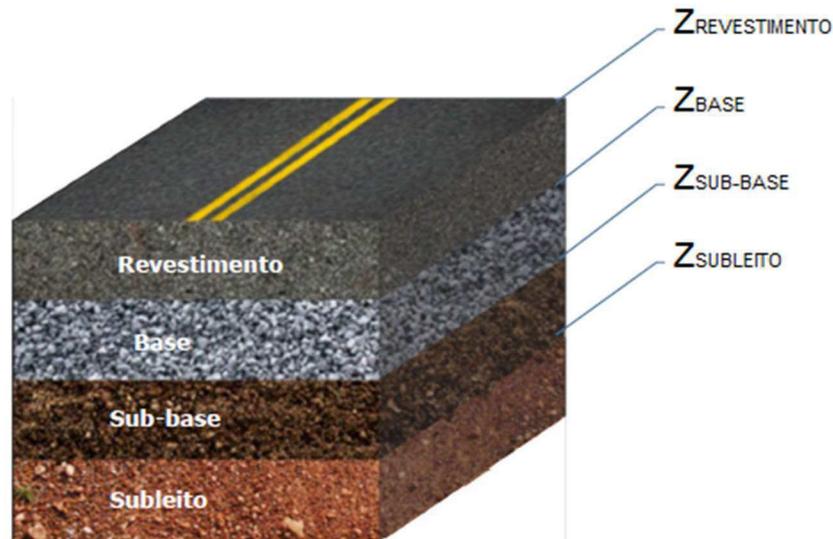
3.5.2 Contribuição individual das camadas para a deflexão

De posse da bacia deflectométrica e dos módulos resilientes, é dada a continuidade ao procedimento por meio do inter-relacionamento entre os parâmetros que caracterizam o segmento homogêneo.

Segundo Cavalcante (2005) o parâmetro área representa a rigidez global da estrutura em relação a distribuição dos esforços, este apresenta uma tendência ao crescimento com a rigidez do revestimento e o decréscimo com o módulo do subleito, em que quanto menor a deflexão máxima D_0 , maior a área e maiores os módulos, e quanto maior a deflexão D_{90} , que melhor representa a contribuição do subleito, maior a área e menor o módulo do subleito.

Calcula-se as deflexões nas interfaces das camadas da estrutura utilizando o software ELSYM5, considerando como módulos sementes os mesmos módulos de resiliência obtidos no BAKFAA ou os módulos refinados a cada interação, de modo a indicar a contribuição percentual de cada camada constituinte do sistema pavimento-subleito na deflexão total da estrutura. Entre os resultados apresentados, serão utilizadas para o cálculo da contribuição de cada camada as deflexões calculadas na interface superior do revestimento ($X=0$; $Y=0$; $Z= 0$ cm de profundidade), base ($X=0$; $Y=0$; $Z= 12$ cm de profundidade), sub-base ($X=0$; $Y=0$; $Z= 32$ cm de profundidade) e subleito ($X=0$; $Y=0$; $Z= 47$ cm de profundidade), como mostra a Figura 36.

Figura 36 - Interface superior de cada camada.



Para o cálculo da contribuição percentual de cada camada de revestimento na deflexão total da estrutura são utilizadas as seguintes equações:

$$C_r = \frac{(D_{Z_r} - D_{Z_b}) \times 100}{D_{Z_r}} \quad (25)$$

Onde:

C_r = contribuição de revestimento (%);

D_{Z_r} = deflexão no topo da camada de revestimento (cmm);

D_{Z_b} = deflexão no topo da camada de base (cmm);

Para o cálculo da contribuição percentual de cada camada de base na deflexão total da estrutura são utilizadas as seguintes equações:

$$C_b = \frac{(D_{Z_b} - D_{Z_{sb}}) \times 100}{D_{Z_r}} \quad (26)$$

Onde:

C_b = contribuição da base (%);

D_{Z_r} = deflexão no topo da camada de revestimento (cmm);

D_{Z_b} = deflexão no topo da camada de base (cmm);

$D_{Z_{sb}}$ = deflexão no topo da camada de sub-base (cmm);

Para o cálculo da contribuição percentual de cada camada da sub-base na deflexão total da estrutura são utilizadas as seguintes equações:

$$C_{sb} = \frac{(D_{Z_{sb}} - D_{Z_{sl}}) \times 100}{D_{Z_r}} \quad (27)$$

Onde:

C_{sb} = contribuição da sub-base (%);

D_{Z_r} = deflexão no topo da camada de revestimento (cmm);

$D_{Z_{sb}}$ = deflexão no topo da camada de sub-base (cmm);

$D_{Z_{sl}}$ = deflexão no topo da camada de subleito (cmm);

Para o cálculo da contribuição percentual de cada camada do subleito na deflexão total da estrutura são utilizadas as seguintes equações:

$$C_{sl} = \frac{D_{Zsl} \times 100}{D_{Zr}} \quad (28)$$

Onde:

C_{sl} = contribuição do subleito (%);

D_{Zr} = deflexão no topo da camada de revestimento (cmm);

D_{Zsl} = deflexão no topo da camada de subleito (cmm);

3.5.3 Hierarquia das camadas do pavimento

A contribuição percentual de cada camada constituinte do sistema pavimento-subleito na deflexão total da estrutura indica as camadas críticas da estrutura, bem como a hierarquia de cada camada na composição da deflexão total da estrutura, conforme a seguinte identificação:

Hierarquia 1: camada com maior contribuição para a deflexão total do pavimento (camada crítica).

Hierarquia 2: 2^a camada com maior contribuição para a deflexão total do pavimento.

Hierarquia 3: 3^a camada com maior contribuição para a deflexão total do pavimento.

Hierarquia 4: 4^a camada com maior contribuição para a deflexão total do pavimento.

3.5.4 Refinamento da retroanálise

O refinamento seguiu a seguinte metodologia: inicialmente, calcula-se as deflexões do pavimento utilizando o software ELSYM5, considerando como módulos sementes os mesmos módulos de resiliência obtidos no BAKFAA. Em seguida, são realizados o cálculo do RMSE (%) entre as deflexões medidas e calculadas, da contribuição de cada camada na deflexão total do pavimento e apresentada a hierarquia de cada camada.

Em seguida, na camada de hierarquia 1, é realizada a obtenção dos módulos sementes utilizados no refinamento da retroanálise de cada iteração seguindo um dos métodos, de

forma que a cada iteração varia-se 0,1 kgf/cm² do módulo anterior até que se tenha um aumento no valor do RMSE (%):

- Método da subtração:

$$MR_f = MR_i - \sum_{i=1}^n 0,1 \times i \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (29)$$

- Método da adição:

$$MR_f = MR_i + \sum_{i=1}^n 0,1 \times i \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (30)$$

Com o arquivo “DADOS” aberto, inserem-se os dados referentes aos módulos sementes (kgf/cm²) obtidos de acordo com método escolhido e demais dados referentes às características das camadas elásticas.

Se:

- $RMSE_{MR_f} \leq RMSE_{MR_i}$ continua o refinamento nesta camada;
- $RMSE_{MR_f} > RMSE_{MR_i}$ para o refinamento nesta camada e parte para o refinamento da segunda camada mais contribuinte.

Em seguida, na camada de hierarquia 2, é realizada a obtenção dos módulos sementes utilizados no refinamento da retroanálise de cada iteração seguindo um dos métodos, de forma que a cada iteração varia-se 0,1 kgf/cm² do módulo anterior até que se tenha um aumento no valor do RMSE (%).

Com o arquivo “DADOS” aberto, inserem-se os dados referentes aos módulos sementes (kgf/cm²) obtidos de acordo com método escolhido e demais dados referentes às características das camadas elásticas.

Se:

- $RMSE_{MR_f} \leq RMSE_{MR_i}$ continua o refinamento nesta camada;
- $RMSE_{MR_f} > RMSE_{MR_i}$ para o refinamento nesta camada e parte para o refinamento da terceira camada mais contribuinte.

Em seguida, na camada de hierarquia 3, é realizada a obtenção dos módulos sementes utilizados no refinamento da retroanálise de cada iteração seguindo um dos métodos, de

forma que a cada iteração varia-se 0,1 kgf/cm² do módulo anterior até que se tenha um aumento no valor do RMSE (%).

Com o arquivo “DADOS” aberto, inserem-se os dados referentes aos módulos sementes (kgf/cm²) obtidos de acordo com método escolhido e demais dados referentes às características das camadas elásticas.

Se:

- $RMSE_{MR_f} \leq RMSE_{MR_i}$ continua o refinamento nesta camada;
- $RMSE_{MR_f} > RMSE_{MR_i}$ para o refinamento nesta camada e parte para o refinamento da terceira camada mais contribuinte.

Em seguida, na camada de hierarquia 4, é realizada a obtenção dos módulos sementes utilizados no refinamento da retroanálise de cada iteração seguindo um dos métodos, de forma que a cada iteração varia-se 0,1 kgf/cm² do módulo anterior até que se tenha um aumento no valor do RMSE (%).

Com o arquivo “DADOS” aberto, inserem-se os dados referentes aos módulos sementes (kgf/cm²) obtidos de acordo com método escolhido e demais dados referentes às características das camadas elásticas.

Se:

- $RMSE_{MR_f} \leq RMSE_{MR_i}$ continua o refinamento nesta camada;
- $RMSE_{MR_f} > RMSE_{MR_i}$ para o refinamento nesta camada e finaliza-se o refinamento, em que $MR_f = MR_i$.

3.5.5 Compatibilidade na retroanálise entre os programas

A compatibilidade é verificada por meio da comparação entre as bacias teóricas na superfície dos pavimentos calculadas pelo software BAKFAA durante o processo de retroanálise e as bacias teóricas superfície dos pavimentos calculadas pelo programa ELSYM5, considerando os mesmos módulos de resiliência obtidos nas retroanálises com o BAKFAA, por meio do cálculo do RMSE.

3.6 Análise probabilística do pavimento

3.6.1 Análise de danos do pavimento

A análise de danos consiste em fazer uma comparação do resultado dos parâmetros de deformabilidade com os parâmetros admissíveis para um determinado N_p (número de passadas previstas no projeto).

Nesta análise, buscou-se verificar o efeito da variação dos módulos resilientes de camada do sistema pavimento-subleito nos parâmetros de deformabilidade da estrutura. O cálculo dos parâmetros de deformabilidade do pavimento procedeu-se a partir de uma análise mecanística da tensão/deformação da estrutura do pavimento com o auxílio do software Elastic Layered System (ELSYM5), que calcula as tensões, deslocamentos e deformações para um sistema tridimensional de camadas elásticas.

A execução do programa ELSYM5 compilado segue a mesma metodologia comentada anteriormente, para a estimativa de danos do pavimento. A estrutura adotada foi a mesma usada para o estudo da retroanálise e que permitiram o ajuste das bacias medida e calculada de deflexões, exceto pelos módulos resilientes que, para o cálculo dos parâmetros de deformabilidade necessários para esta análise probabilística, serão considerados como variáveis aleatórias em avanço, centrado e em atraso, cujos valores estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 - Módulos de resiliência utilizados para análise probabilística.

Variáveis		Módulos de Resiliência			
		Mr (kgf/cm ²)	Mb (kgf/cm ²)	Msb (kgf/cm ²)	Msl (kgf/cm ²)
Em avanço (xi + 0,01xi)	Mr	22178,81	1232,10	356,89	2787,96
	Mb	21959,22	1244,42	356,89	2787,96
	Msb	21959,22	1232,10	360,46	2787,96
	Msl	21959,22	1232,10	356,89	2815,84
Centrado	Média	21959,22	1232,10	356,89	2787,96
	Msl	21959,22	1232,10	356,89	2760,08
Em atraso (xi - 0,01xi)	Msb	21959,22	1232,10	353,32	2787,96
	Mb	21959,22	1219,78	356,89	2787,96
	Mr	21739,63	1232,10	356,89	2787,96

Entre os resultados apresentados, os parâmetros de deformabilidade utilizados para a análise probabilística foram a deflexão máxima reversível na superfície, a diferença de tensões no revestimento, calculada a partir da tensão vertical e horizontal na base do revestimento, a deformação de tração na base do revestimento, a tensão vertical no topo do subleito e a deformação de compressão no topo do subleito, cuja localização está demonstrada na Tabela 7.

Tabela 6 - Localização dos parâmetros de deformabilidade.

Localização dos parâmetros de deformabilidade						
Parâmetros		Camada	Unidade	Coordenadas		
				X	Y	Z
D0	Deflexão máxima reversível	Topo do revestimento (superfície)	cmm	0,0	0,0	0,0
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões	Base do revestimento	kgf/cm ²	0,0	0,0	12,0
ϵ_t	Deformação de tração		cm/cm	0,0	0,0	12,0
ϵ_c	Tensão vertical	Topo do Subleito	cm/cm	0,0	0,0	47,0
σ_v	Deformação de compressão		kgf/cm ²	0,0	0,0	47,0

Os critérios admissíveis adotados para os parâmetros resposta foram os seguintes:

- Deflexão máxima admissível medida na superfície do pavimento segundo o DNER PRO-269/94:

$$D_{adm} = 10^{(3,148 - 0,188 \log P)} \quad (31)$$

- Diferenças de tensões na fibra inferior do revestimento (CBUQ Faixa C):

$$N_p = f_0 \times 2003,9 \times \Delta\sigma^{-3,4965} \quad (32)$$

- Deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento (CBUQ Faixa C):

$$N_p = f_0 \times 6 \times 10^{-1} \times \varepsilon_t^{-3,4965} \quad (33)$$

- Deformação específica de compressão no topo do subleito (DORMON & METCALF, 1965):

$$N_p = 6,07 \times 10^{-10} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right)^{4,762} \quad (34)$$

- Tensão vertical admissível vertical no topo do subleito (HEUKELOM & KLUMP, 1962)

$$\sigma_v = \frac{0,006 \times M_{sl}}{1 + 0,7 \log N_p} \quad (35)$$

É importante salientar que para os modelos de fadiga de deformação específica de tração e deformação específica de compressão foi considerado um fator campo-laboratório de $f_0 = 10^5$, e para a diferença de tensões na camada do revestimento $f_0 = 10^4$ conforme os estudos realizados por PINTO (1991); e que para o cálculo dos parâmetros admissíveis foi utilizado o N_p que consta no IP-02/2004 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS.

3.6.2 Estudo de sensibilidade do pavimento

Após o estudo de retroanálise e análise de danos 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 (D_0 , $\Delta\sigma$, ε_t , ε_c e σ_v) relacionados com o comportamento mecânico do pavimento. Dada à impossibilidade de obter a derivada de forma analítica neste trabalho, como foi comentado anteriormente, ela foi determinada de maneira numérica, tal qual cada módulo resiliente se variou em $\pm 10\%$, tendo sido mantidos os demais valores. Aplicaram-se, para isso, as equações de derivadas parciais, para os incrementos em avanço, centrados e em atraso, respectivamente, e por sua vez calculando o valor médio, a derivada parcial, a variância para os incrementos em avanço, centrados e em

atraso, respectivamente, e a influência de cada módulo resiliente sobre os parâmetros de deformabilidade.

Para a análise probabilística do pavimento da BR-230/PB, o Método FOSM foi aplicado às deflexões máximas reversíveis, diferença de tensões na camada do revestimento, deformações de tração na base do revestimento asfáltico, deformações de compressão no topo do subleito e a tensão vertical no topo do subleito, tendo como variáveis aleatórias os módulos resilientes das camadas da estrutura do pavimento.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Para atingir o objetivo principal desta dissertação, que é a verificação da influência dos módulos resilientes das camadas do pavimento obtidos por retroanálise nos parâmetros de deformabilidade do pavimento, foi selecionado um conjunto de dados de deflexões de um trecho de uma rodovia, obtido em anos anteriores, necessários para a retroanálise, para a análise de danos e para a análise probabilística da BR-230/PB. Lançou-se mão somente dos dados de bacias de deflexão, dados de levantamentos funcionais e de tráfego, para compor um roteiro de análise que representasse uma situação real.

4.2 Retroanálise da bacia de deflexão

Neste item será abordada os resultados da retroanálise dos módulos de resiliência, que realiza o ajuste das bacias medida e calculada das deflexões com o programa BAKFAA, utilizando como dados de entrada a estrutura considerada nesta pesquisa e as deflexões do subtrecho homogêneo SH-04 da rodovia BR-230/PB - lote III.

Na Tabela 8, são apresentados os módulos de resiliência resultantes das bacias de deflexões do subtrecho homogêneo SH-04, a partir das retroanálises no programa BAKFAA.

Tabela 7 - Retroanálise do subtrecho homogêneo SH 04 da BR-230/PB Lote III.

Módulos de resiliência (kgf/cm²)						
Estaca	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	RMS (μm)	RMSE (%)
4306	21712,2	1156,6	293,9	3176,3	4,02	6,24
4310	27788,9	1000,7	373,7	3515,6	3,46	5,02
4314	24231,2	1118,8	310,5	3524,6	3,75	6,18
4318	14468,5	1012,2	466,4	1769,2	3,94	2,33
4322	13219,4	1022,8	439,2	1790,4	4,25	2,23
4326	21907,5	1070	234,8	1732,7	4,2	2,03
4330	20952,2	1035,7	217,3	1835,1	4,51	2,53
4334	23566,5	1937,1	414	4156,3	3,21	7,44
4338	23260,2	1774,9	376	4258,1	3,47	9,09
4342	28485,6	1192,2	443,1	2121,3	3,51	3,35
Média	21959,22	1232,10	356,89	2787,96	3,83	4,64
Característica	26898,74	1569,14	445,47	3829,09	4,25	7,16
Mínimo	13219,40	1000,70	217,30	1732,70	3,21	2,03
Máximo	28485,60	1937,10	466,40	4258,10	4,51	9,09
Desvio padrão	4939,52	337,04	88,58	1041,13	0,42	2,51
Variância	2,44E+07	1,14E+05	7,85E+03	1,08E+06	1,76E-01	6,31E+00
Coef. Variação (%)	22,49%	27,35%	24,82%	37,34%	10,95%	54,09%
z	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	3,50
Limite mínimo	9610,42	389,51	135,44	185,14	2,78	-4,15
Limite máximo	34308,02	2074,69	578,34	5390,78	4,88	13,44

O ajuste das bacias medida e calculada para a BR-230/PB, SH-04, foi satisfatório, com margem de erro entre 2,03% e 9,09%.

Os valores médios dos módulos referidos que melhor ajustaram as bacias deflectométricas medida e calculada foram: 2195,92 MPa para a camada de revestimento constituído com CBUQ Faixa C; 123,21 MPa para a camada de base constituída brita graduada simples; 35,69 MPa para a camada de sub-base de solo estabilizado granulometricamente; e 278,80 MPa para a camada de subleito.

Os resultados mostraram que os módulos de resiliência não atenderam as especificações exigidas em relação à faixa de módulos recomendada para cada camada pelo DER-SP, na instrução de projeto de pavimentação, como pode ser observado na Tabela 9. Observa-se o efeito de camadas com baixa rigidez (base e sub-base) entre camadas com

rigidez consideravelmente superiores (revestimento e subleito), se comportando como “vidro sobre espuma”, levando a camada superior, do revestimento, a sofrer elevadas tensões de tração em sua base, acarretando o rompimento precoce do pavimento por fadiga.

Tabela 8 - Valores usuais de Módulo de Resiliência.

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Concretos Asfálticos:	
revestimento (CAP 50-70)	2000 – 5000
revestimento (CAP 30-45)	2500 – 4500
binder (CAP 50-70)	2000 – 3000
binder (CAP 30-45)	2500 – 4000
Materiais granulares:	
brita graduada	150 – 300
macadame hidráulico	250 – 450
Materiais estabilizados quimicamente:	
solo-cimento	5000 – 10000
brita graduada tratada com cimento	7000 – 18000
concreto compactado com rolo	7000 – 22000
Concreto de cimento Portland	30000 – 35000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito:	
solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 – 200
solos de comportamento não laterítico	25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 – 400
Concreto de cimento Portland	28000 – 45000

Fonte: DER-SP/2006.

Os coeficientes de variação dos módulos retroanalizados das camadas do pavimento e subleito é relacionado a magnitude das deflexões medidas em cada geofones e da forma das bacias deflectométricas, e dependem de inúmeros parâmetros como o teor de umidade, as condições de compactação, a composição dos matérias e as espessuras de cada camada constituinte da estrutura (ALBERNAZ, 1997).

A “Long-Term Pavement Performance” – LTPP (2002) recomenda a faixa aceitável de CV para os coeficientes de variação a ser utilizada nos projetos de pavimentos apresentada na Tabela 10, em que se observa que o segmento homogêneo SH-04 apresenta coeficientes de variação obtidos pelo BAKFAA dentro da faixa aceitável do LTPP (2000).

Tabela 9 - Faixa aceitável de CV's utilizada em projetos de pavimentos.

CAMADA	Para um grau de 95% de confiança			Coeficientes de variação recomendados		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Concreto Asfáltico	39,4	38,5	40,3	39	14	72
Base Granular	49,7	48,7	50,7	50	17	92
Sub-base Granular	73,8	70,4	77,1	74	16	150
Subleito	35,3	34,2	36,4	35	6	92
Base tratada*	68,5	66,3	70,7	68	24	116
Sub-base tratada*	90,7	85,7	95,7	91	30	158

*Não é especificado o tipo de tratamento

Fonte: LTPP, 2002.

Da mesma forma que as deflexões, os módulos de resiliência apresentaram alta variabilidade nos dados, atingindo valores de coeficientes de variação da ordem de 35%, dessa forma, não é recomendado utilizar valores médios, como para cálculo de dimensionamento de reforço. Mesmo assim, com o propósito de passar para as etapas seguintes e realizar a análise probabilística com o uso do Método FOSM, resolveu-se adotar os valores médios dos módulos de resiliência encontrados por seu satisfatório entre bacias ajuste obtido nesse trecho.

O subleito foi a camada que apresentou maior coeficiente de variação, o que está de acordo com a maior variabilidade dos pontos mais distantes do ponto de aplicação da carga nas deflexões, visto que estes são mais afetados pelas variações do módulo do Subleito.

Como pode ser observado nas penúltimas colunas da Tabelas 4, todas as 10 bacias analisadas apresentaram valores de RMS aceitáveis conforme Camarini (2019), que considera valores menores que 5 μm . No entanto, nenhuma das bacias de deflexões calculadas pelo programa enquadrou-se dentro dos limites de tolerância dos valores de RMSE recomendados pela ASTM – D5858/15, entre 1 a 2%. A mesma norma afirma que caso os limites de erros não possam ser atingidos, podem existir algumas motivações que contrariam as hipóteses de linearidade elástica ou as espessuras das camadas adotadas. Metade das bacias possuem RMSE inferior a 5% que corresponde a uma aproximação razoável na estimativa dos módulos de acordo com Correia, J. (2014), e todas possuem RMSE inferior a 10% que segundo Machado (2012) consiste em uma boa correlação.

Como existem vários autores que consideram diferentes valores de erro admissíveis, é possível a adoção de diferentes faixas de erro, no entanto como o objetivo dessa pesquisa é a acurácia, o refinamento dos módulos de resiliência tem como objetivo a obtenção do

RMSE na faixa de aceitação definida pelo ASTM – D5858/15 ou por Correia, J. (2014), desde que esse apresente um conjunto de valores realísticos.

Segundo Camarini (2019) desvios elevados entre a bacia teórica e a bacia calculada podem ocorrer devido as condições locais do pavimento que não atendem devidamente as hipóteses da Teoria das Múltiplas Camadas Elásticas, como a heterogeneidade dos materiais que compõem pavimento real, podendo aumentar os erros calculados, gerar módulos de resiliência incorretos e elevar os valores dos coeficientes de variação dos módulos de resiliência retroanalizados, de forma que a integridade do pavimento pode alterar a cada ponto ensaiado; ou variações de espessura das camadas, a variação das densidades dos matérias e a presença de trincas no revestimento asfáltico que pode resultar em bacias de deflexões medidas com formato incomum, dificultando a convergência com as bacias teóricas calculadas.

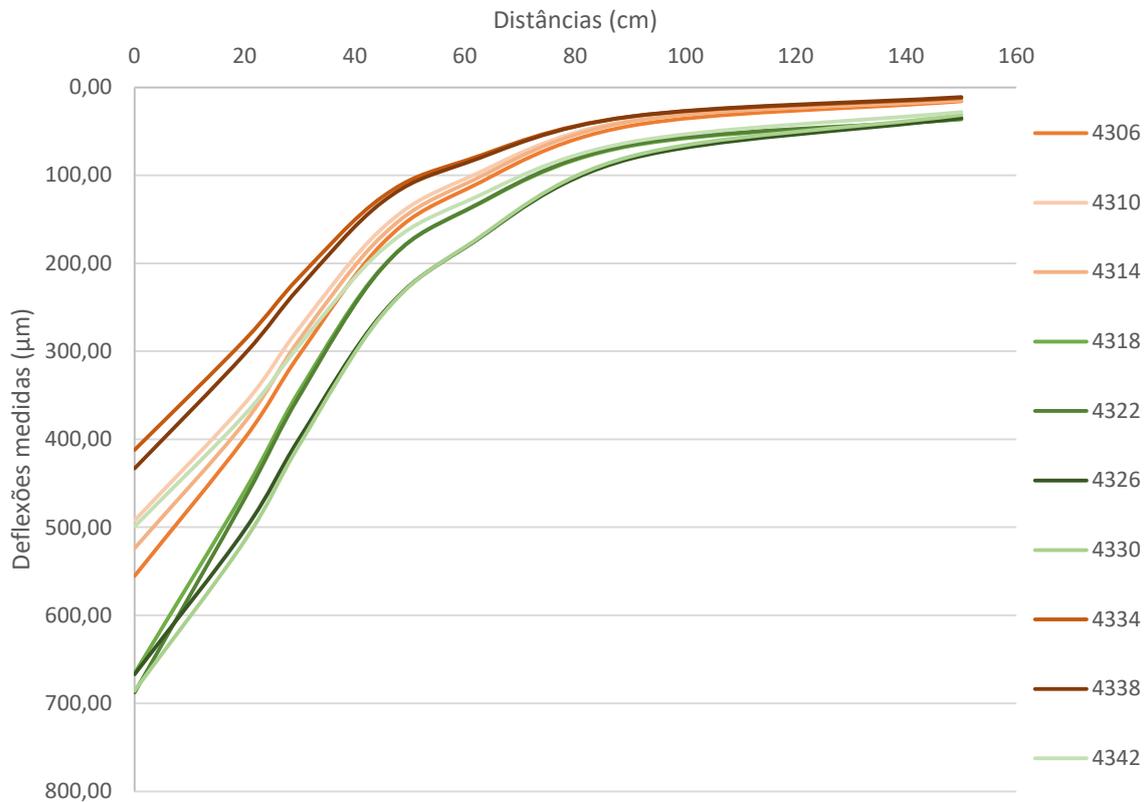
Com os dados das deflexões medidas na Tabela 2 é possível realizar a criação do delineamento da linha de influência longitudinal de deformação de cada estaca, denominada bacia de deformação, apresentadas na Figura 37.

Cada bacia foi tonalizada de acordo com a escala de cores atribuída aos valores do RMSE dispostos em ordem decrescente na Tabela 11, com o objetivo de avaliar a influência das as deflexões medidas na obtenção dos módulos e sua acurácia.

Tabela 10 - RMSE das deflexões retroanalizadas em ordem decrescente.

Estaca	RMSE (%)
4338	9,09
4334	7,44
4306	6,24
4314	6,18
4310	5,02
4342	3,35
4330	2,53
4318	2,33
4322	2,23
4326	2,03

Figura 37 - Bacia de deflexão ponto a estudo de cada estaca.



Há uma variação nos valores encontrados de deflexões, onde a retroanálise realizada a partir de pontos com menores valores de deflexão, resultaram em um conjunto de módulos com maior RMSE (>5%), já a retroanálise realizada a partir de pontos com maiores valores de deflexão, resultaram em um conjunto de módulos com RMSE aceitável por Correia, J. (2014), ou seja, menores que 5%.

Valores pequenos são encontrados em sua maioria em pontos onde uma camada confere maior rigidez ao pavimento dando conseqüentemente maior resistência ao deslocamento elástico quando solicitada pelo tráfego. Os valores de deslocamentos um pouco maiores que os demais em alguns pontos, são devido ao pavimento ser flexível conferindo maiores deflexões elásticas ao pavimento construído.

4.3 Análise de consistência e compatibilidade na retroanálise

A aproximação entre as bacias medidas no FWD e as bacias teóricas calculadas durante o processo de retroanálise pelo software BAKFAA; E a aproximação entre as bacias medidas no FWD e as bacias teóricas calculadas após a metodologia de refinamento do RMSE (%) pelo software ELSYM5, considerando os mesmos módulos de resiliência obtidos no BAKFAA, foi realizada para a verificação da precisão e acurácia na retroanálise. Estas aproximações estão apresentadas nas Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 11 - RMSE dos módulos resilientes utilizando o método de diminuição do módulo.

Estaca	RMSEi (%)	RMSEf (%)	Diferença (%)
4306	6,29	6,25	0,64
4310	5,07	5,04	0,56
4314	6,23	6,23	0,01
4318	2,34	2,33	0,36
4322	2,23	2,23	0,21
4326	2,05	2,05	0,02
4330	2,57	2,55	0,73
4334	7,50	7,49	0,17
4338	9,16	9,15	0,06
4342	3,37	3,37	0,01

Tabela 12 - RMSE dos módulos resilientes utilizando o método de acréscimo do módulo.

Estaca	RMSEi (%)	RMSEf (%)	Diferença (%)
4306	6,29	6,25	0,64
4310	5,07	5,02	0,95
4314	6,23	6,23	0,01
4318	2,34	2,29	2,07
4322	2,23	2,2	1,55
4326	2,05	2,04	0,51
4330	2,57	2,38	7,35
4334	7,50	7,5	0,03
4338	9,16	9,16	0,05
4342	3,37	3,24	3,86

As bacias deflectométricas obtidas com o ELSYM5 nos métodos de diminuição e acréscimo do módulo apresentaram desvios irrisórios em relação às bacias medidas com BAKFAA. Dessa forma, é possível concluir que a análise de múltiplas camadas elásticas implementada no BAKFAA gera uma boa aproximação entre as bacias medidas e teóricas

evidenciando uma elevada precisão e acurácia destes programas, tornando desnecessária a busca por métodos de aprimoramento ou outros programas.

Para a análise de compatibilidade entre os programas BAKFAA e ELSYM5 foi realizada a comparação entre as bacias teóricas calculadas durante o processo de retroanálise pelo software BAKFAA e as bacias teóricas calculadas pelo programa ELSYM5, considerando os mesmos módulos de resiliência obtidos no BAKFAA, por meio do cálculo do RMSE (%), os resultados dos erros entre as 10 bacias analisadas estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 13 - Comparação entre bacias deflectométricas do BAKFAA versus ELSYM5.

Estaca	RMSE (%)
4306	0,059
4310	0,060
4314	0,061
4318	0,048
4322	0,048
4326	0,064
4330	0,062
4334	0,065
4338	0,070
4342	0,034

As bacias deflectométricas obtidas com o ELSYM5 apresentaram desvios irrisórios em relação às bacias calculadas por retroanálise no BAKFAA. Dessa forma, é possível concluir que a análise de múltiplas camadas elásticas implementada no BAKFAA é similar à utilizada pelo programa ELSYM5, de forma que apresenta valores de respostas estruturais similares aos calculados pelo ELSYM5, o que torna viável a utilização do ELSYM5 no processo de refinamento dos módulos obtidos pelo BAKFAA, por meio da análise do RMSE. Os pequenos desvios observados podem ser consequência de diferentes arredondamentos numéricos considerados pelos dois programas.

4.4 Análise probabilística do pavimento

4.4.1 Análise de danos do pavimento

Após a retroanálise dos valores de módulos de resiliência em avanço, centrado e em atraso e dos dados referentes a estrutura do pavimento da BR-230/PB, utilizou-se o programa ELSYM5, para realizar a análise de danos, de modo a obter resultados dos valores das deflexões máximas reversíveis, das diferenças de tensão no revestimento, das deformações de tração atuantes na base da camada de revestimento, das deformações de compressão e das tensões verticais atuantes no topo da camada de subleito, em avanço, centrado e em atraso, para o subtrecho homogêneo SH 04, cujos os valores estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 14 - Dados relacionados aos parâmetros de deformabilidade usadas na análise probabilística do pavimento.

Parâmetros de deformabilidade do pavimento						
Módulos de resiliência		Superfície	Base do revestimento		Topo do subleito	
		D0	$\Delta\sigma$	ϵ_t	ϵ_c	σ_v
		cmm	kgf/cm ²	cm/cm	cm/cm	kgf/cm ²
Em avanço ($\xi + 0,01\bar{\xi}$)	Mr	52,97	10,232	3,98E-04	1,42E-04	0,5279
	Mb	52,99	10,108	3,99E-04	1,42E-04	0,5286
	Msb	53,01	10,152	4,00E-04	1,43E-04	0,5301
	Msl	53,04	10,164	4,00E-04	1,41E-04	0,5298
Centrado	Média	53,13	10,164	4,00E-04	1,42E-04	0,5291
	Msl	53,23	10,164	4,00E-04	1,44E-04	0,5284
Em atraso ($\xi - 0,01\bar{\xi}$)	Msb	53,26	10,176	4,01E-04	1,42E-04	0,5281
	Mb	53,28	10,220	4,02E-04	1,42E-04	0,5296
	Mr	53,30	10,096	4,03E-04	1,43E-04	0,5303
Análise estatística						
	Média	53,13	10,16	4,00E-04	1,42E-04	0,53
	Característica	53,27	10,21	4,02E-04	1,43E-04	0,53
	Mínimo	52,97	10,10	3,98E-04	1,41E-04	0,53
	Máximo	53,30	10,23	4,03E-04	1,44E-04	0,53
	Desvio padrão	1,35E-01	4,45E-02	1,31E-06	7,51E-07	8,92E-04
	Variância	1,82E-02	1,98E-03	1,72E-12	5,64E-13	7,95E-07
	Coef. Variação	0,25%	0,44%	0,33%	0,53%	0,17%
	z	2,50	5,50	6,50	7,50	8,50
	Limite mínimo	52,80	9,92	3,92E-04	1,37E-04	0,52
	Limite máximo	53,47	10,41	4,09E-04	1,48E-04	0,54
Tráfego previsto	N_p	Parâmetros de deformabilidade admissíveis				
Muito pesado	5,00E+07	50,19	0,77	3,75E-05	2,80E-04	4,70
Pesado	2,00E+07	59,62	1,00	4,87E-05	3,40E-04	4,91
Meio pesado	2,00E+06	91,92	1,93	9,40E-05	5,51E-04	5,54
Médio	5,00E+05	119,29	2,87	1,40E-04	7,37E-04	6,01
Leve	1,00E+05	161,44	4,55	2,22E-04	1,03E-03	6,67

Para o pavimento em análise, sugere-se que a os parâmetros de deformabilidade obtidos por meio da variação dos módulos resilientes sejam menores ou, na pior das hipóteses, iguais aos parâmetros admissíveis referentes ao número de passadas previstas em projeto para o tráfego previsto, de modo que valores maiores podem levar o pavimento à fadiga ou deformação permanente.

Considerando a deformação de compressão e tensão vertical no topo do subleito, a estrutura apresenta valores compatíveis para tráfego muito pesado, ao se analisar as deflexões máximas reversíveis a estrutura apresenta valores adequados ao tráfego pesado, no entanto, em se tratando das diferenças de tensão no revestimento e deformação de tração na base do revestimento a estrutura apresenta valores muito maiores que os previstos até para o tráfego leve.

Segundo Silva, L.A. (2014) a heterogeneidade das camadas implica em áreas com alta concentração de tensão em relação ao que foi definido no projeto executivo, que pode acarretar em uma menor vida de fadiga para toda a estrutura.

Esse comportamento das elevadas diferenças de tensão no revestimento e deformação de tração na base do revestimento também pode estar relacionado com os módulos da base e sub-base que apresentam módulos resilientes menores que os especificados para o tipo de material pela literatura, que pode resultar no rompimento por fadiga do revestimento antes dos 10 anos, previstos no projeto.

4.4.2 Estudo de sensibilidade do pavimento

Para a análise probabilística do pavimento aplicou-se o Método FOSM às deflexões máximas reversíveis, diferença de tensões no revestimento, deformações de tração na base do revestimento asfáltico, deformações de compressão e tensões verticais no topo do subleito, verificando a sensibilidade destes parâmetros em razão da variação dos módulos resilientes, de modo a determinar a influência de cada módulo no comportamento mecânico da estrutura.

Os valores dos módulos resilientes das camadas da estrutura do pavimento, em avanço, centrados e em atraso, bem como a variância de cada variável considerada para a análise probabilística desse subtrecho do pavimento pelo Método FOSM, são apresentados na Tabela 17.

Tabela 15 - Dados necessários para a análise probabilística do pavimento.

Variáveis	Em avanço ($\bar{x}_i + 0,01\bar{x}_i$)	Centrado (\bar{x}_i)	Em atraso ($\bar{x}_i - 0,01\bar{x}_i$)	Variância
Mr (Kgf/cm ²)	22178,81	21959,22	21739,63	2,44E+07
Mb (Kgf/cm ²)	1244,42	1232,10	1219,78	1,14E+05
Msb (Kgf/cm ²)	360,46	356,89	353,32	7,85E+03
Msl (Kgf/cm ²)	2815,84	2787,96	2760,08	1,08E+06

Os valores numéricos obtidos para as derivadas parciais, variâncias e influências obtidas para a análise probabilística são mostrados na Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20, respectivamente. Na primeira coluna, estão as derivadas parciais dos deslocamentos, tensões e 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%.

Tabela 16 - Valores das derivadas das variáveis aleatórias do pavimento.

Derivadas parciais das variáveis aleatórias				
Parâmetros de deformabilidade	Variáveis aleatórias	Em avanço ($\partial Y/\partial x_i$) +	Centrado ($\partial Y/\partial x_i$) \pm	Em atraso ($\partial Y/\partial x_i$) -
Deflexão máxima reversível (D0)	Mr	-7,29E-04	-7,51E-04	-7,74E-04
	Mb	-1,14E-02	-1,18E-02	-1,22E-02
	Msb	-3,36E-02	-3,50E-02	-3,64E-02
	Msl	-3,23E-03	-3,41E-03	-3,59E-03
Diferença de tensões no revestimento ($\Delta\sigma$)	Mr	-3,64E-05	-3,64E-05	-3,64E-05
	Mb	4,87E-04	4,87E-04	4,87E-04
	Msb	5,60E-04	5,60E-04	5,60E-04
	Msl	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Deformação de tração na base do revestimento (ϵ_t)	Mr	-1,00E-08	-1,00E-08	-1,00E-08
	Mb	-1,14E-07	-1,14E-07	-1,14E-07
	Msb	-8,41E-08	-8,41E-08	-8,41E-08
	Msl	-3,59E-09	-1,79E-09	0,00E+00
Deformação de compressão no topo do subleito (ϵ_c)	Mr	1,82E-09	1,82E-09	1,82E-09
	Mb	8,12E-09	1,22E-08	1,62E-08
	Msb	-1,40E-07	-1,40E-07	-1,40E-07
	Msl	4,66E-08	4,84E-08	5,02E-08
Tensão vertical no topo do subleito (σ_v)	Mr	5,46E-06	5,46E-06	5,46E-06
	Mb	4,06E-05	4,06E-05	4,06E-05
	Msb	-2,80E-04	-2,80E-04	-2,80E-04
	Msl	-2,51E-05	-2,51E-05	-2,51E-05

Tabela 17 - Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento.

Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento				
Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	Variáveis aleatórias	Em avanço V[Y] +	Centrado V[Y] ±	Em atraso V[Y] -
Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	Mr	1,30E+01	1,38E+01	1,46E+01
	Mb	1,47E+01	1,57E+01	1,68E+01
	Msb	8,87E+00	9,63E+00	1,04E+01
	Msl	1,13E+01	1,26E+01	1,39E+01
	Total	4,78E+01	5,17E+01	5,58E+01
Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	Mr	3,24E-02	3,24E-02	3,24E-02
	Mb	2,69E-02	2,69E-02	2,69E-02
	Msb	2,46E-03	2,46E-03	2,46E-03
	Msl	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Total	6,18E-02	6,18E-02	6,18E-02
Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	Mr	2,45E-09	2,45E-09	2,45E-09
	Mb	1,47E-09	1,47E-09	1,47E-09
	Msb	5,54E-11	5,54E-11	5,54E-11
	Msl	1,39E-11	3,49E-12	0,00E+00
	Total	3,98E-09	3,97E-09	3,97E-09
Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	Mr	8,10E-11	8,10E-11	8,10E-11
	Mb	7,48E-12	1,68E-11	2,99E-11
	Msb	1,54E-10	1,54E-10	1,54E-10
	Msl	2,36E-09	2,54E-09	2,73E-09
	Total	2,60E-09	2,79E-09	3,00E-09
Valores das variâncias das variáveis aleatórias do pavimento	Mr	7,29E-04	7,29E-04	7,29E-04
	Mb	1,87E-04	1,87E-04	1,87E-04
	Msb	6,16E-04	6,16E-04	6,16E-04
	Msl	6,83E-04	6,83E-04	6,83E-04
	Total	2,22E-03	2,22E-03	2,22E-03

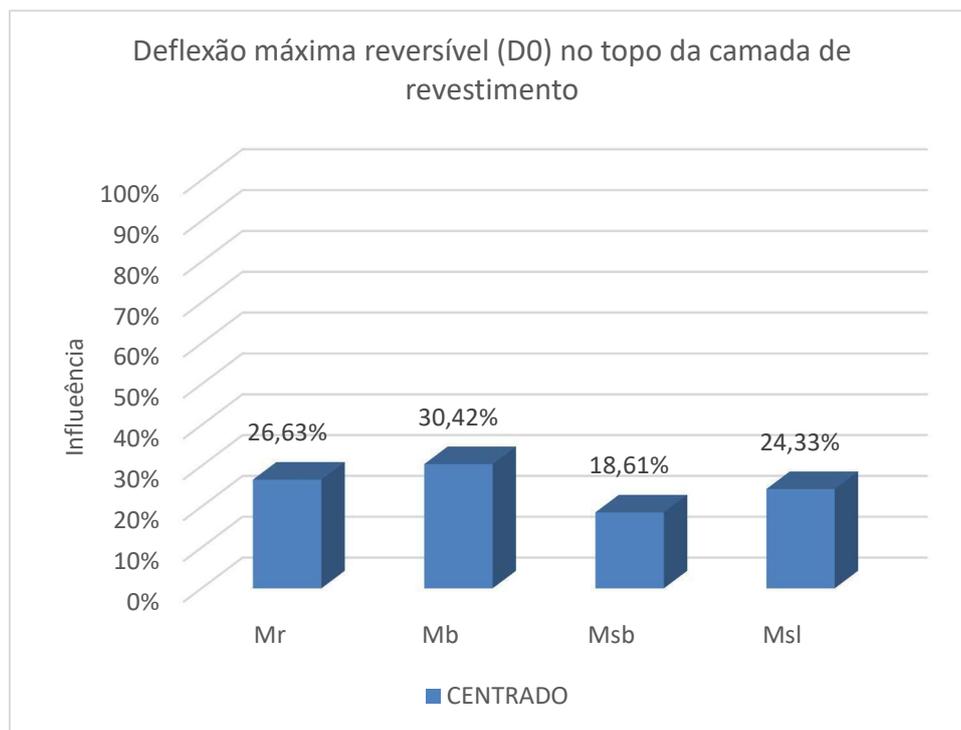
Tabela 18 - Valores das influências das variáveis aleatórias do pavimento.

Influência das variáveis aleatórias				
Parâmetros de deformabilidade	Variáveis aleatórias	Em avanço I[Y] +	Centrado I[Y] ±	Em atraso I[Y] -
Deflexão máxima reversível (D0)	Mr	27,11%	26,63%	26,20%
	Mb	30,69%	30,42%	30,16%
	Msb	18,56%	18,61%	18,65%
	Msl	23,64%	24,33%	24,98%
Diferença de tensões no revestimento ($\Delta\sigma$)	Mr	52,41%	52,41%	52,41%
	Mb	43,60%	43,60%	43,60%
	Msb	3,99%	3,99%	3,99%
	Msl	0,00%	0,00%	0,00%
Deformação de tração na base do revestimento (ϵ_t)	Mr	61,45%	61,62%	61,67%
	Mb	36,80%	36,90%	36,93%
	Msb	1,39%	1,40%	1,40%
	Msl	0,35%	0,09%	0,00%
Deformação de compressão no topo do subleito (ϵ_c)	Mr	3,11%	2,90%	2,70%
	Mb	0,29%	0,60%	1,00%
	Msb	5,93%	5,51%	5,14%
	Msl	90,67%	90,99%	91,16%
Tensão vertical no topo do subleito (σ_v)	Mr	32,89%	32,89%	32,89%
	Mb	8,45%	8,45%	8,45%
	Msb	27,81%	27,81%	27,81%
	Msl	30,85%	30,85%	30,85%

O valor da variância com incremento centrado de $\pm 10\%$, calculado pelo Método FOSM, para a deflexão máxima reversível no topo do revestimento foi de $D0 = 5,17 \times 10^1$, significativamente maior que as variâncias dos demais parâmetros. Seguido do valor da variância da diferença de tensões na base do revestimento de $\Delta\sigma = 6,18 \times 10^{-02}$ e do valor da variância da tensão vertical no topo do subleito de $\sigma_v = 2,22 \times 10^{-03}$. Por fim, com variâncias bem menores, seguem o valor da variância da deformação de tração na base do revestimento de $\epsilon_t = 3,97 \times 10^{-09}$, e o valor da variância de compressão no topo do subleito de $\epsilon_c = 2,79 \times 10^{-09}$.

A influência de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, que contribuiu para a determinação do valor da variância da deflexão máxima reversível no topo do revestimento, usando valores centrados, estão apresentadas na Figura 38.

Figura 38 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da deflexão máxima reversível no topo da camada de revestimento.



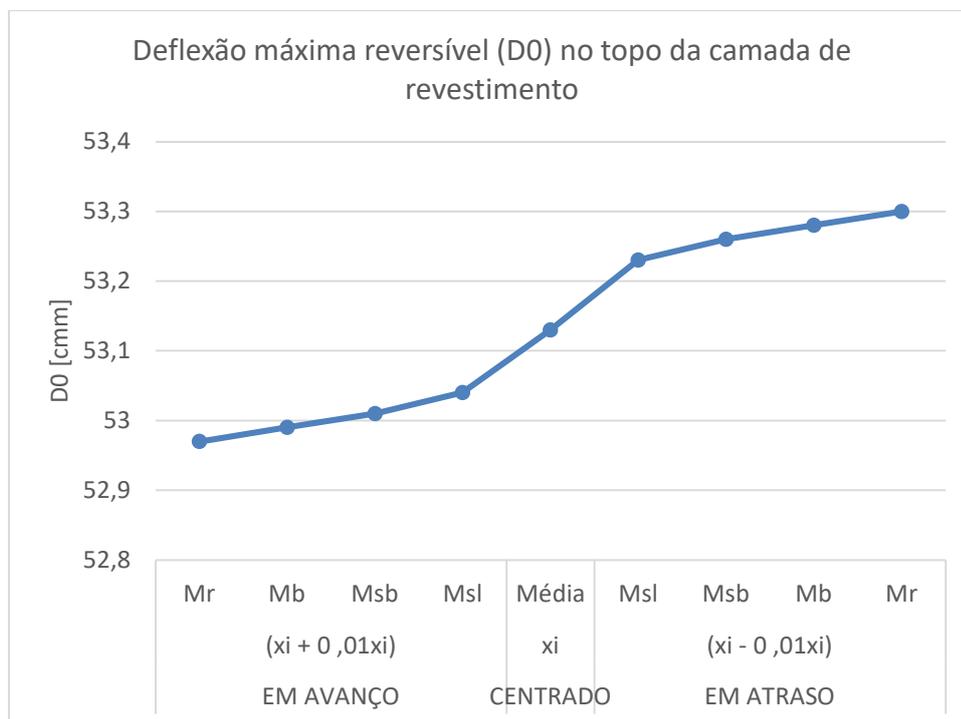
Os dados provenientes da análise probabilística pelo Método FOSM para a variância da deflexão máxima reversível no topo da camada de revestimento, para o incremento centrado, destacou a importância do valor dos módulos resilientes de todas as camadas do pavimento, que se mostraram igualmente expressivos, neste caso o fator mais influente para a determinação da variância da deflexão máxima reversível foi o módulo resiliente da camada de base (30,42%), seguido dos módulos do revestimento (26,63%), subleito (24,33%) e sub-base (18,61%).

Esse comportamento pode ser explicado observando a inversão da magnitude dos valores das variâncias dos módulos resilientes, que em ordem decrescente são a variância do módulo do revestimento, subleito, base e sub-base, em relação a magnitude dos valores das derivadas parciais dos módulos de resiliência em valores absolutos, que em ordem decrescente são as derivadas parciais dos módulos da sub-base, base, subleito e revestimento,

que equiparam os resultados da influência de cada módulo no desenvolvimento das deflexões na superfície do revestimento.

A variação da deflexão máxima reversível no topo do revestimento, conforme os incrementos em avanço, de +10%, centrado de $\pm 10\%$, e em atraso, de -10%, de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, está apresentada na Figura 39.

Figura 39 - Variação da deflexão máxima reversível no topo do revestimento, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória.

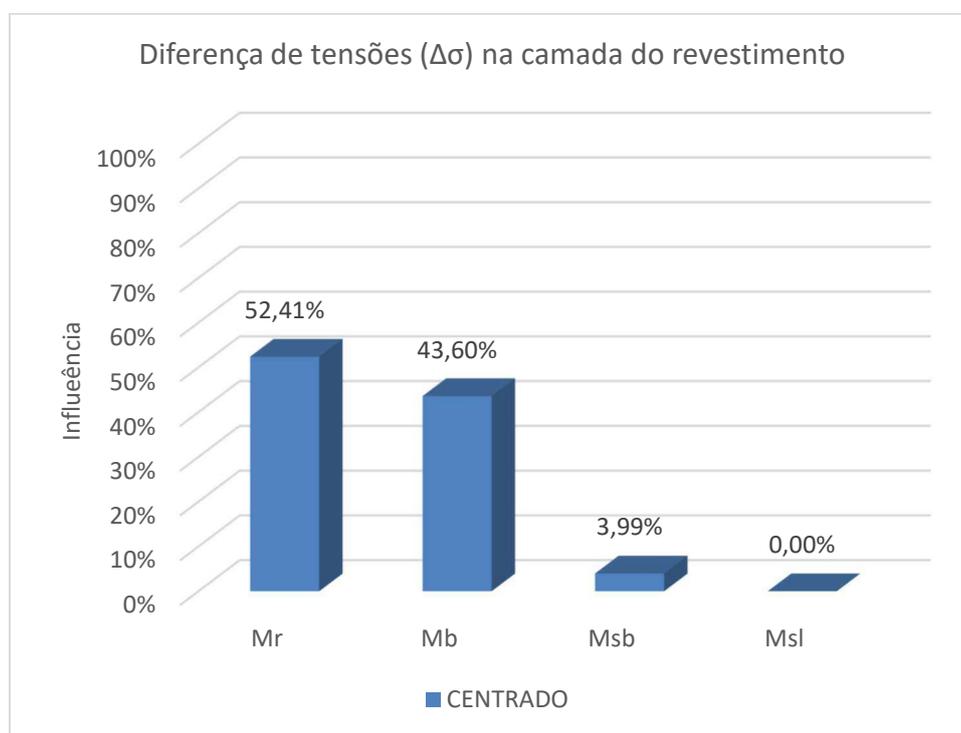


A análise probabilística do pavimento pelo Método FOSM permitiu identificar a relação de proporcionalidade da deflexão máxima reversível com os módulos resilientes associada à influência desses módulos na deflexão:

$$\downarrow D0 = \uparrow \frac{Mb}{31\%} \uparrow \frac{Mr}{26\%} \uparrow \frac{Msl}{24\%} \uparrow \frac{Msb}{19\%}$$

A influência de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, que contribuiu para a determinação do valor da variância da diferença de tensões na base do revestimento, usando valores centrados, estão apresentadas na Figura 40.

Figura 40 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da diferença de tensões no revestimento.



Os dados provenientes da análise probabilística pelo Método FOSM para a variância das diferenças de tensões na base da camada de revestimento, para o incremento centrado, destacou a importância do valor dos módulos resilientes das camadas do revestimento (52,41%) e da base (43,60%) do pavimento, que se mostraram igualmente expressivos, seguidos dos módulos da sub-base (3,99%), o subleito não apresentou influência na diferença de tensões.

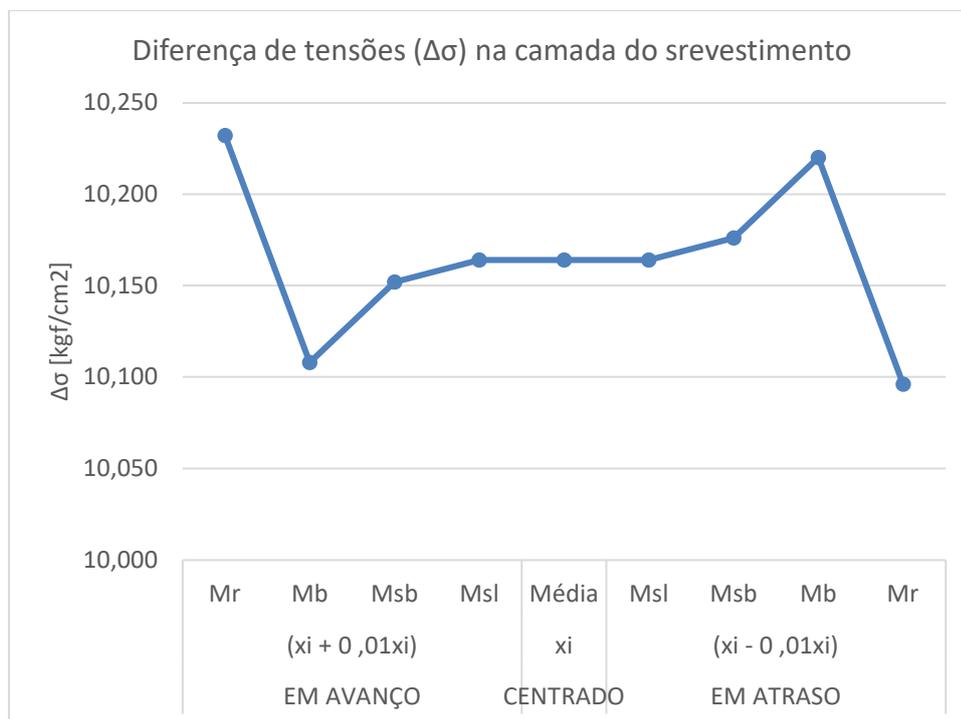
Em função da espessura da camada de revestimento ser maior que 10cm, o desenvolvimento de tensões e deformações na fibra inferior do revestimento passa a ser controlado pela rigidez da desta camada, principalmente pelo seu módulo de resiliência, pois este apresenta uma variância elevada ($2,44 \times 10^7$).

O módulo de resiliência da camada de base, que também afeta de forma significativa as diferenças de tensões, apresenta uma variância menor ($1,14 \times 10^5$) em relação ao módulo do revestimento cuja variância é da ordem de 10^7 , porém apresenta a maior derivada parcial em valores absolutos em relação ao módulo de resiliência do revestimento, esta diferença

potencializa sua influência, pois as derivadas parciais são elevadas ao quadrado no cálculo das variâncias dos parâmetros.

A variação da diferença de tensões na base do revestimento, conforme os incrementos em avanço, de +10%, centrado de $\pm 10\%$, e em atraso, de -10%, de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, está apresentada na Figura 41.

Figura 41 - Variação da diferença de tensões na base do revestimento, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória.



A análise probabilística do pavimento pelo Método FOSM permitiu identificar a relação de proporcionalidade da diferença de tensões com os módulos resilientes associada à influência desses módulos na diferença de tensões:

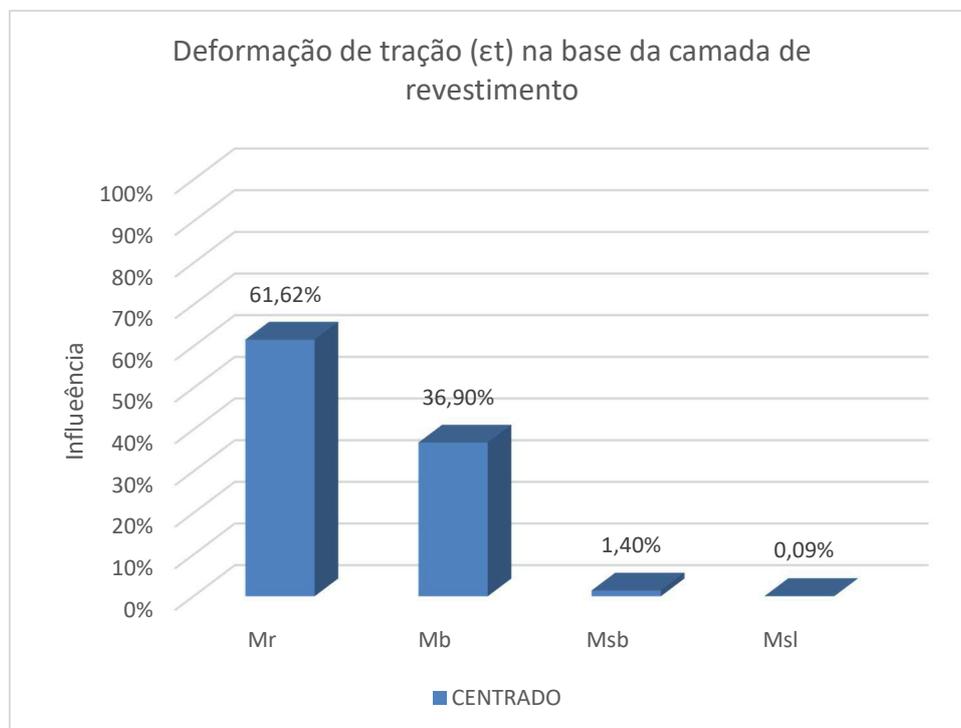
$$\downarrow \Delta\sigma = \downarrow \frac{Mr}{52\%} \uparrow \frac{Mb}{44\%} \uparrow \frac{Msb}{4\%} - \frac{Msl}{0\%}$$

Com base nos resultados das retroanálises, em que alguns módulos de resiliência não apresentaram conformidade com as especificações exigidas, sobretudo os módulos da base e sub-base. E na análise dos parâmetros de deformabilidade para as diferenças de tensões na base do revestimento da estrutura, que apresentaram diferenças de tensões muito maiores que os valores admissíveis para qualquer tipo de tráfego previsto. A análise probabilística

da influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade, permitiu identificar, devido ao seu grau de deterioração e elevada influência, a camada de base como a camada mais crítica em relação a diferença de tensões na fibra inferior do revestimento, seguida do revestimento devido a elevada influência do seu módulo resiliente, podendo afetar seriamente o desempenho do pavimento quanto a vida de fadiga.

A influência de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, que contribuiu para a determinação do valor da variância da deformação de tração na base do revestimento, usando valores centrados, estão apresentadas na Figura 42.

Figura 42 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da deformação de tração na base do revestimento.



Os dados provenientes da análise probabilística pelo Método FOSM para a variância da deformação de tração na base da camada de revestimento, para o incremento centrado, destacou a importância do valor do módulo resiliente da camada de revestimento (61,62%), seguido do módulo da base (36,90%). Os demais módulos se mostraram pouco expressivos neste caso, com contribuições de 1,40% e 0,09% para as camadas de sub-base e subleito, respectivamente.

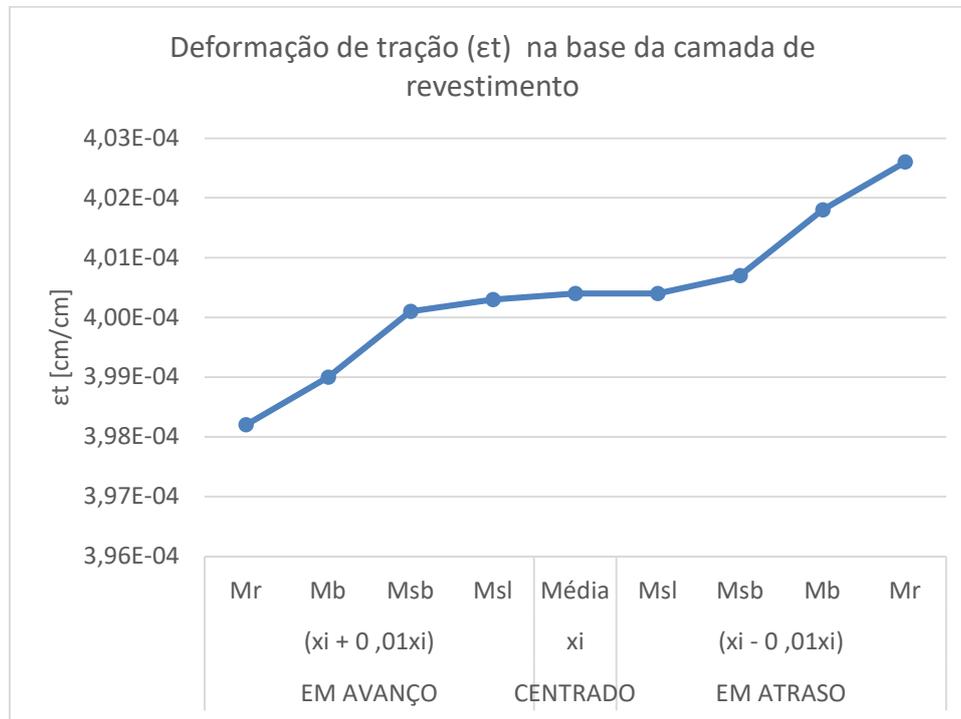
Segundo Silva. L. A. (2014), revestimentos asfálticos delgados (com menos de 5,0 cm de espessura), independente da rigidez, têm pouca influência sobre as deformações a que está sujeito, sendo praticamente constante e, promovendo assim, condições de deformação controlada. Por outro lado, revestimentos asfálticos mais espessos (com espessuras superiores a 10,0 cm), a sua rigidez tem pouco efeito sobre as tensões, sendo praticamente constante, promovendo dessa forma condições de tensão controlada, mas influencia significativamente as deformações de tração. Isto explica a alta influência das variáveis relativas ao módulo do revestimento, visto que o revestimento possui uma espessura de 12cm que promove uma significativa influência nas deformações, independente da sua rigidez.

Em função da espessura da camada de revestimento ser maior que 10cm, o desenvolvimento de tensões e deformações na fibra inferior do revestimento passa a ser controlado pela rigidez da desta camada, principalmente pelo seu módulo de resiliência, pois este apresenta uma variância elevada ($2,44 \times 10^7$).

O módulo de resiliência da camada de base, que também afeta de forma significativa as deformações, apresenta uma variância menor ($1,14 \times 10^5$) em relação ao módulo do revestimento cuja variância é da ordem de 10^7 , porém apresenta a maior derivada parcial em valores absolutos dentre os módulos de resiliência dos demais materiais, esta diferença amplia sua influência, pois as derivadas parciais são elevadas ao quadrado no cálculo das variâncias dos parâmetros de deformabilidade.

A variação da deformação de tração na base do revestimento, conforme os incrementos em avanço, de +10%, centrado de $\pm 10\%$, e em atraso, de -10%, de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, está apresentada na Figura 43.

Figura 43 - Variação da deformação de tração na base do revestimento, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória.



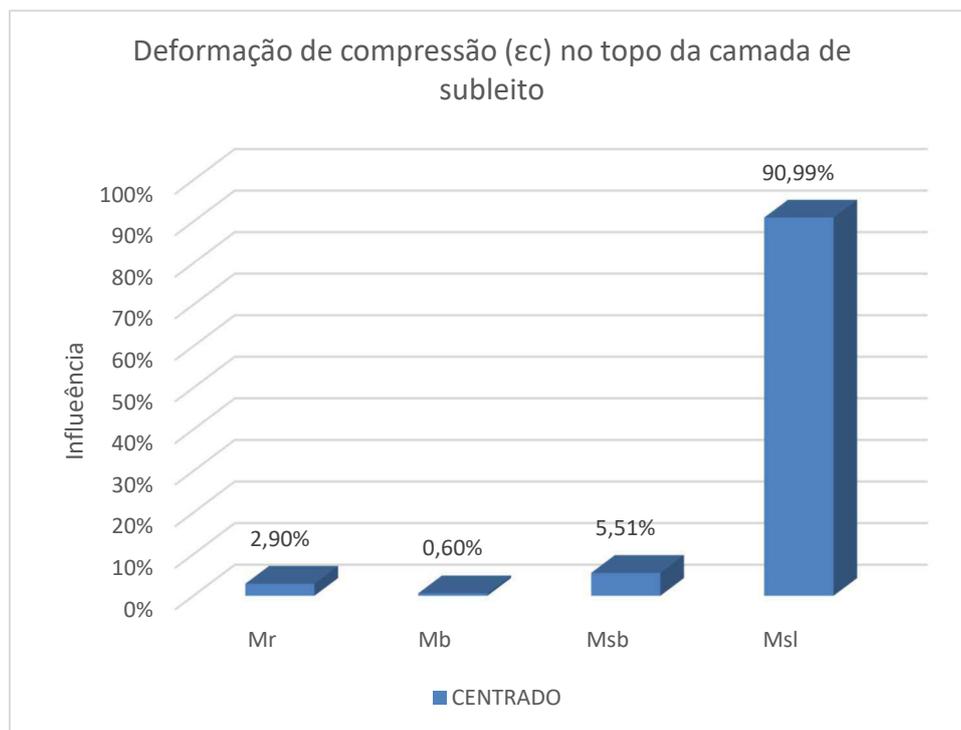
A análise probabilística do pavimento pelo Método FOSM permitiu identificar a relação de proporcionalidade da deformação de tração com os módulos resilientes associada à influência desses módulos na deformação de tração:

$$\downarrow \epsilon_t = \uparrow \frac{Mr}{61\%} \uparrow \frac{Mb}{37\%} \uparrow \frac{Msb}{1\%} \uparrow \frac{Msl}{0\%}$$

Com base nos resultados das retroanálises, em que alguns módulos de resiliência não apresentaram conformidade com as especificações exigidas, sobretudo os módulos da base e sub-base. E na análise dos parâmetros de deformabilidade para as deformações de tração na base do revestimento da estrutura, que apresentaram deformações de tração muito maiores que os valores admissíveis para qualquer tipo de tráfego previsto. A análise probabilística da influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade, permitiu identificar, devido ao seu grau de deterioração e elevada influência, a camada de base como a camada mais crítica em relação a deformação de tração na fibra inferior do revestimento, seguida do revestimento devido a elevada influência do seu módulo resiliente, podendo afetar seriamente o desempenho do pavimento quanto a vida de fadiga.

A influência de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, que contribuiu para a determinação do valor da variância da deformação de compressão no topo do subleito, usando valores centrados, estão apresentadas na Figura 44.

Figura 44 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da deformação de compressão no topo do subleito.



O valor esperado para a deformação de compressão no topo de subleito foi influenciado, predominantemente, pelos valores do módulo de resiliência do subleito (90,99%), os módulos das demais camadas tiveram pouca influência para a variância da deformação de compressão no topo do subleito, tendo o módulo da sub-base influência de 5,51%, revestimento de 2,90% e base de 0,60%.

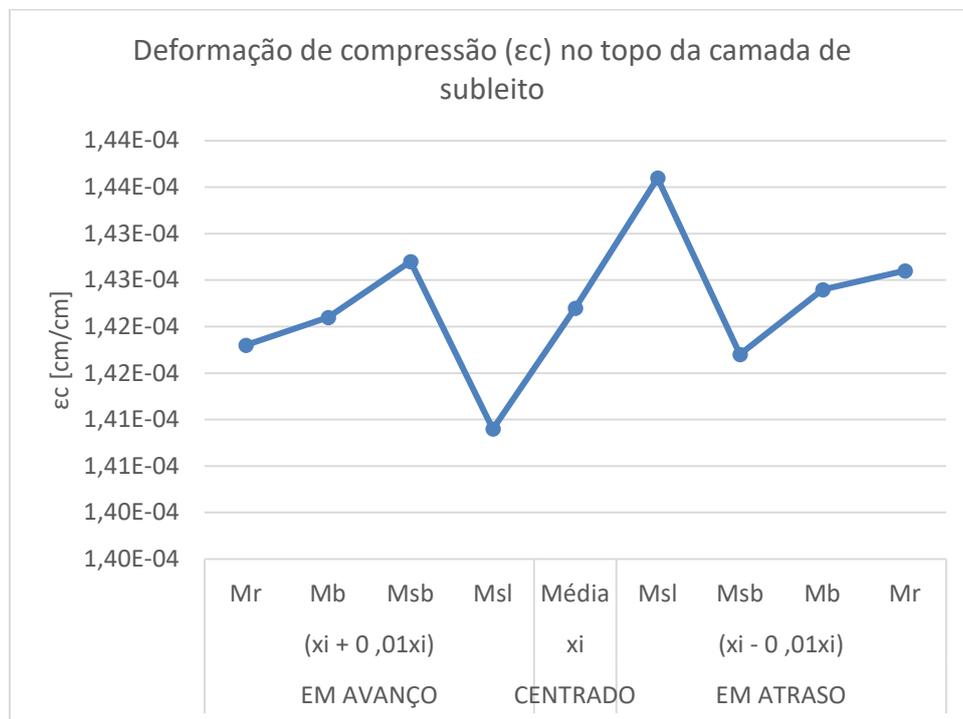
A maior influência do módulo do subleito deve-se tanto à sua alta variância ($1,08 \times 10^6$), como ao fato de sua derivada parcial ser a segunda de maior valor absoluto, relativamente às derivadas das demais variáveis. Esta diferença é ampliada, pois as derivadas parciais são elevadas ao quadrado no cálculo das variâncias da variável dependente.

O módulo de resiliência da camada de sub-base, tem a segunda maior influência sobre as deformações, pois apesar de apresentar uma variância bem menor ($7,83 \times 10^3$) em relação ao módulo do subleito cuja variância é da ordem de 10^6 , possui a maior derivada

parcial em valores absolutos dentre os módulos de resiliência dos demais materiais, esta característica amplia sua influência, pois as derivadas parciais são elevadas ao quadrado no cálculo das variâncias dos parâmetros de deformabilidade.

A variação da deformação de compressão no topo do subleito, conforme os incrementos em avanço, de +10%, centrado de $\pm 10\%$, e em atraso, de -10%, de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, está apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Variação da deformação de compressão no topo do subleito, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória.

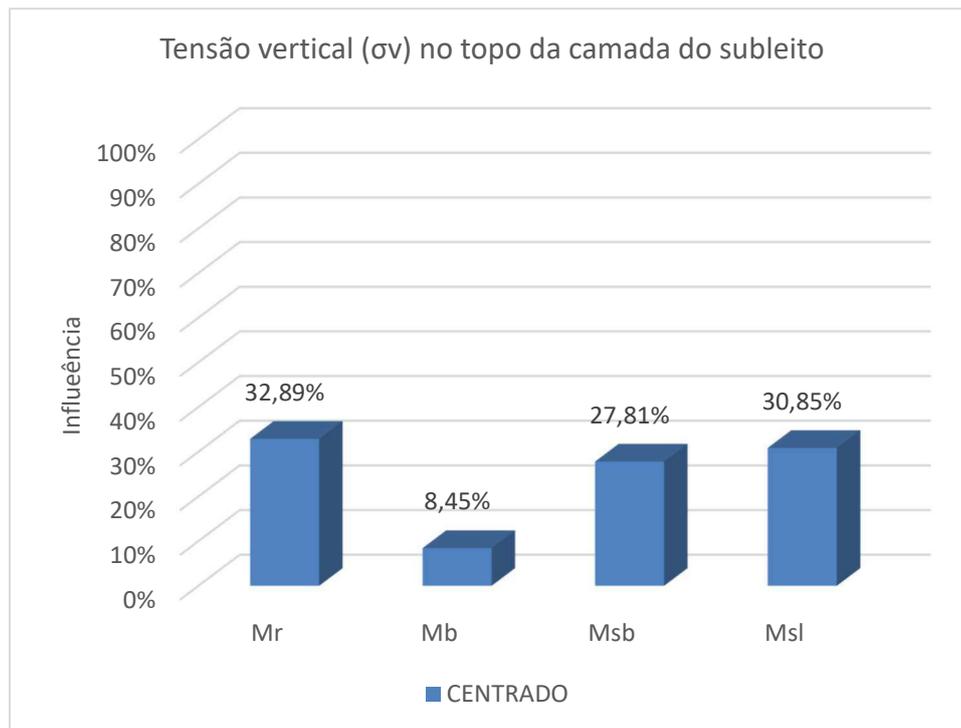


A análise probabilística do pavimento pelo Método FOSM permitiu identificar a relação de proporcionalidade da deformação de compressão com os módulos resilientes associada à influência desses módulos na deformação de compressão:

$$\downarrow \epsilon_c = \uparrow \frac{Msl}{91\%} \downarrow \frac{Msb}{6\%} \uparrow \frac{Mr}{3\%} \uparrow \frac{Mb}{0\%}$$

A influência de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, que contribuiu para a determinação do valor da variância da tensão vertical no topo do subleito, usando valores centrados, estão apresentadas na Figura 46.

Figura 46 - Gráfico da influência dos módulos resilientes de cada camada sobre o valor da tensão vertical no topo do subleito.

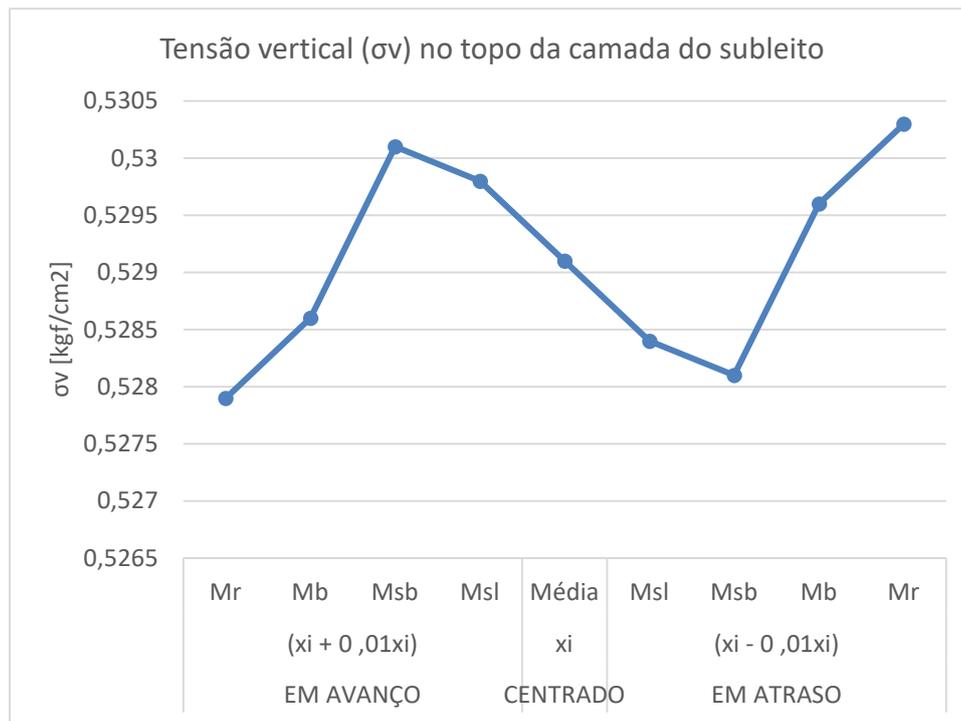


Os dados provenientes da análise probabilística pelo Método FOSM para a variância da tensão vertical no topo da camada do subleito, para o incremento centrado, destacou a importância do valor dos módulos resilientes em equilíbrio para as camadas do revestimento (32,89%), sub-base (27,81%) e subleito (30,85%), seguidos do módulo resiliente da base (8,45%).

Esse comportamento pode ser explicado observando a inversão da magnitude dos valores das variâncias dos módulos resilientes, que em ordem decrescente são a variância do módulo do revestimento, subleito, base e sub-base, em relação a magnitude dos valores das derivadas parciais dos módulos de resiliência em valores absolutos, que em ordem decrescente são as derivadas parciais dos módulos da sub-base, base, subleito e revestimento, que equiparam os resultados da influência de cada módulo no desenvolvimento de tensões na fibra superior do revestimento.

A variação da tensão vertical no topo do subleito, conforme os incrementos em avanço, de +10%, centrado de $\pm 10\%$, e em atraso, de -10%, de cada variável aleatória, ou seja, os módulos resilientes das camadas, está apresentada na Figura 47.

Figura 47 - Variação da tensão vertical no topo do subleito, conforme os incrementos em avanço, centrado e em atraso, de cada variável aleatória.



A análise probabilística do pavimento pelo Método FOSM permitiu identificar a relação de proporcionalidade da tensão vertical com os módulos resilientes associada à influência desses módulos na tensão vertical:

$$\downarrow \sigma_v = \uparrow \frac{Mr}{33\%} \downarrow \frac{Msl}{31\%} \downarrow \frac{Msb}{28\%} \uparrow \frac{Mb}{8\%}$$

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são resumidas as conclusões do trabalho desenvolvido. Pretende-se, numa primeira abordagem, apresentar as considerações finais sobre a importância dos resultados obtidos com o uso do FWD na avaliação das características estruturais das camadas da estrutura dos pavimentos flexíveis. Em seguida, pretende-se dar um enfoque na análise estatística dos módulos de resiliência obtidos nas retroanálises. E, por fim, destacar a importância de se analisar o grau de influência das variáveis consideradas na análise probabilística dos pavimentos, para o controle das propriedades mecânicas das camadas da estrutura do pavimento em seu projeto de dimensionamento e durante a sua construção.

- Falling Weight Deflectometer (FWD)

A utilização do FWD, mostrou-se ser uma ferramenta muito útil para a obtenção da bacia de deflexões de pavimentos flexíveis e, a partir destas, dos módulos resilientes e dos parâmetros de deformabilidade do pavimento e, viabilizando determinar a influência de cada módulo resiliente sobre tais parâmetros por meio da análise probabilística do pavimento. Fundamental na gerência de pavimentos, em que seu acompanhamento contribui para que os materiais especificados em projeto, apresentem os mesmos módulos em sua construção.

- Retroanálise das bacias de deflexões

Os resultados mostraram que os módulos de resiliência não apresentaram conformidade com as especificações exigidas em relação à faixa de módulos recomendada para cada camada pelo DER-SP. Os módulos mais preocupantes foram os da base e sub-base, com significativas diferenças entre os módulos da camada retroanalizados e os recomendados, que por serem as camadas mais críticas em termos de tensão e deformação no revestimento, podem afetar seriamente o desempenho revestimento quanto a vida de fadiga.

O ajuste das bacias medida e calculada para a PECV, Trecho 1, foi satisfatório, com margem de erro entre 2,03% e 9,09%, favorecendo o uso dos valores médios dos módulos de resiliência encontrados na análise probabilística do pavimento.

- Análise de compatibilidade e consistência na retroanálise

A correlação satisfatória entre as bacias teóricas calculadas pelos programas BAKFAA e ELSYM5 indicou uma compatibilidade na análise de múltiplas camadas elásticas implementada nestes programas, que apresentam valores de respostas estruturais similares, o que torna viável a utilização destes programas nas análises de precisão de consistência dos programas e nas análises probabilísticas do pavimento.

- Análise probabilística do pavimento

As elevadas tensões e deformações na base do revestimento em relação aos valores aceitáveis para a vida de projeto, bem como as altas variabilidades entre os módulos resilientes encontrados a partir da retroanálise para cada bacia deflectométrica, considerando que o pavimento utilizado para esta análise se encontrava em condição de deterioração, podem estar relacionados ao descumprimento das hipóteses da linearidade elástica devido a presença de inconsistências locais, como trincas, variações das espessuras e heterogeneidade do material que compõem as camadas do pavimento.

A análise dos parâmetros de deformabilidade mostra a importância de um método de dimensionamento mecanística-empírico. Somente com este tipo de abordagem é possível considerar os deslocamentos, tensões e deformações atuantes nas diversas camadas da estrutura, por procedimentos amparados nos métodos científicos da Mecânica dos Meios Contínuos e técnicas constitutivas adequadas aos materiais utilizados, aliado a equações de vida de fadiga e afundamento de trilhas de roda, calibrados com base em uma larga base de dados empírica.

Os resultados das análises probabilísticas da BR-230/PB para a influência dos módulos resilientes nos parâmetros de deformabilidade, indicam equivalência na influência dos módulos nas deflexões máximas reversíveis na superfície do revestimento, maior influência do módulo de revestimento e de base na diferença de tensões e na deformação de tração na fibra inferior do revestimento, maior influência do módulo do subleito na deformação de compressão no topo desta camada, e maiores influências com valores equivalentes para os módulos do revestimento, sub-base e subleito nas tensões verticais na fibra superior do subleito.

Dessa forma, a metodologia de análise probabilística pelo Método FOSM, se mostrou bastante promissora, permitindo identificar as camadas de base como a camada crítica em

termos de tensão e deformação, podendo afetar seriamente o desempenho revestimento quanto a vida de fadiga, mas também deve-se atentar para outras variáveis aleatórias relativas à estrutura, ao ambiente e ao tráfego, bem como a necessidade de melhores modelos de desempenho que incorporem a influência destes fatores. Concluiu-se que a análise probabilística possibilita o delineamento de defeitos do pavimento associados aos parâmetros de deformabilidade (deslocamentos, tensões e deformações) e a rigidez das camadas do pavimento, se mostrando como uma importante ferramenta para a gerência e dimensionamento de reforço dos pavimentos.

Os resultados aqui obtidos apontam para a necessidade de maior controle construtivo, principalmente para um controle de compactação rigoroso de modo a obter os módulos de rigidez adequados ao projeto, um dimensionamento de base com espessura e módulo resiliente maiores, também com um rigoroso controle executivo para garantir a homogeneidade da camada, diminuindo assim as áreas com alta concentração de tensão em relação ao que foi definido no projeto executivo.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

- realizar levantamento deflectométrico com o FWD considerando diferentes níveis de carga, a fim de analisar a não linearidade das camadas de base, sub-base, reforço e subleito;
- realizar um experimento futuro que compare a análise do programa BAKFAA com outros programas que adotam métodos de análises não-lineares;
- investigar as condições de interface entre as camadas do pavimento e suas possíveis influências nos resultados obtidos na retroanálise;
- investigar as propriedades geofísicas do pavimento com o objetivo de determinar as espessuras das camadas de pavimentos;
- pesquisar métodos geofísicos que possam contribuir para as pesquisas geotécnicas associadas a pavimentos, com o objetivo de obter as suas propriedades mecânicas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, C. A. V.; **Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

AZEVEDO, I. C. D.; **Análise de Tensões e Deformações em Solos**. Universidade Federal de Viçosa. Editora UFV. 2007.

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

BERNUCCI, L. B. MOTTA, L. M. G. CERATTI, J A. P et al.; **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3 ed. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 2010.

BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CAMARINI, G. C.; JUNIOR, C. A. P S.; FONTENELE, H. B.; **Avaliação de bacias de deflexões retroanalizadas pelo programa BackMeDiNa**. Universidade Estadual de Londrina. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. Balneário Camboriú, SC. 2019.

CARDOSO, S. H.; **Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos**. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. V. 2. Cuiabá - MG, 1995.

CARVALHO, C. F. C.; **Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis restaurados com revestimento asfáltico para a região de Urucu (Coaril - AM)**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Amazonas. 2019.

CAVALCANTE, F. P.; **Avaliação da características funcionais e estruturais da rodovia BR-230/PB LOTE III**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG, Programa de Pós-Graduação, 2005.

CRUZ, J. G. F.; **Avaliação do Desempenho a Longo Prazo da Reciclagem com Adição de Cimento da Rodovia SC 355**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM. DER-SP. **Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001**. Departamento de Estrada de Rodagem, 2006, 56p.

DNER ME - 024/94 (1994d). **Método de ensaio - Pavimento - Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman**. Rio de Janeiro.

DUARTE, J. P. D.; **Avaliação do Efeito do nível de informação no desempenho de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Nova de Lisboa. 2016.

FABRÍCIO; E.; **Avaliação do desempenho a longo prazo do segmento monitorado da rodovia SC-405 / Itapoá**. Trabalho Conclusão do Curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC. 2018.

FABRÍCIO, J. M.; GONÇALVES, E. A.; FABRÍCIO, O. F.; **Método simplificado de retroanálise em pavimentos flexíveis**. In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte - MG, 1994.

FRANCO, M. L. O.; **Estudo do efeito de intervenções sobre o comportamento de pavimento de um grupo de rodovias do estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2004.

GONÇALVES, F. J. P.; **Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2002.

GONTIJO, P. R. A.; GUIMARÃES, F. H. R.; NOGUEIRA, C. L.; **Metodologias brasileiras para avaliações das características funcionais e estruturais de pavimentos rodoviários - Estado da arte**. In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte - MG, 1994.

LTTP. **LTTP Data Analysis: Variations in Pavement Design Inputs**. NCHRP Web Document 48. Preoarado por: STUBSTAD, R. N., TAYABJI, S. D., LUKANEN, E. O.

LOPES, R. A.; **Avaliação de programas de retroanálise de bacias deflectométricas - aplicação a um trecho de uma rodovia federal.** Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro - RJ, 2019.

MACHADO, A. B. A. S. B.; **Contribuição para a avaliação estrutural de infraestruturas rodoviárias por métodos não destrutivos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Nova de Lisboa. 2012,

MACHADO, T. F. O.; MARQUES, G. L. O.; ROCHA, M. L.; **Projeto de um reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional.** Laboratório de Pavimentação, Departamento de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Juiz de Fora. Revista: TRANSPORTES (ISSN: 2237-1346), Vol.: 28. ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Juiz de Fora, MG. 2020. Em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2144>

MEDINA, J. MACEDO, J. A. G.; MOTTA, L. M. G.; **Utilização de ensaios deflectométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos.** In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte - MG, 1994.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; **Mecânica dos Pavimentos.** 3 ed, Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2015.

MIRANDA, L. P.; CASAGRANDE, M. T.; MOTTA, L. M. G.; **Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza.** 199 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

NEGRELLO, C. S.; **Avaliação do desempenho a longo prazo da reciclagem a frio de pavimento, com adição de cimento, da rodovia SC 150, trecho BR 282 à Capinzal.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, SC, 2014. 196 p.

NETO, P. V. A.; **Avaliação Funcional de um Trecho da Rua Francisco Vicente Ferreira pelos Métodos do IGG e do PCI.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2019.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos.** Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2003.

PEREIRA, J. M. B.; **Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, SO. 2007.

PINTO, S. e PREISSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** Rio de Janeiro. 2002.

PINTO, S., PREISSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** 2 ed. Synergia – IBP. 2010.

POULOS, H, G; DAVIS, E, H; **Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics. Series in Soil Engineering.** New York, John Wiley & Sons, 1974. Reprinted by: Centre for Geotechnical Research, University of Sidney, 1991.

PPA - Plano Plurianual, 2016-2019. **Desenvolvimento, produtividade e inclusão social - Mensagem presidencial, Ministério do planejamento, orçamento e gestão.** Brasília - DF, 2015.

RODRIGUES, R. M. **Aplicação da mecânica dos pavimentos ao projeto e à avaliação estrutural de pavimentos asfálticos.** In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Cuiabá-MG, 1995.

SANTOS, M. S.; CERVO, T. C.; SPECHT, L. P.; BORDIN, D.T.; BUENO, L. D.; BOEIRA, F. D.; PINHEIRO, G. S. **Obtenção do módulo de resiliência por retroanálise de três trechos monitorados.** 18º ENACOR - Encontro nacional de conservação rodoviária, 44ª RAPv - Reunião anual de pavimentação, 2015.

SCARANTO, M.; **Procedimentos aplicáveis na definição de medidas para a manutenção de pavimentos urbanos com revestimentos asfálticos.** Dissertação

(Mestrado) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura e Urbanismo de Passo Fundo. Passo Fundo, RS. 2007.

SILVA, L. A.; **Sistema de gerência de pavimentos do DER/SP**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Campinas, SP. 2008.

SILVA, L. A.; **Uso de Georadar (GPR) e retroanálises de deflexões como suporte a análises probabilísticas de desempenho de pavimentos**. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. 2014.

SILVA, C. A. R.; **Controle Deflectométrico na execução de camadas de pavimento**. In: 3º Simpósio internacional de avaliação de pavimentos e projetos de reforço. Belém - PA, 1999.

VARGAS, E. G.; **Avaliação Estrutural e retroanálise de um trecho de pavimento da Avenida Tirajú no município de Alegre-RS com a utilização de Viga Benkelman**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pampa. Alegre, RS. 2019.

VELLASCO, B. Q.; **Análise Crítica do controle construtivo de pavimentos com a Viga de Benkelman: aplicação ao caso da ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, SP. 2018.

VILLELA, A. R. A.; MARCON, A. F.; **Avaliação Estrutural de Pavimentos Utilizando um método simplificado de retroanálise - Retran-2CL**. In 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis, SC, 2001.

VILLELA, A. R. A.; **Análise da base de dados de um grupo de rodovias para a aplicação em projetos de reabilitação**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 1999.

ZANETTI, F.S. **O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para auxiliar na determinação da vida útil de pavimentos flexíveis**. 2008. Dissertação (Mestrado em Infra-estrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-28042009-091916/pt-br.php>. Acesso em: 27/02/2020.