

# Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Departamento de Engenharia Civil

**METODOLOGIA DE RETROANÁLISE DE MÓDULOS  
DE RESILIÊNCIA EM CAMADAS DE PAVIMENTOS  
FLEXÍVEIS: DESENVOLVIMENTO DO  
PROGRAMA RETROPAV**

**CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE**

**Campina Grande**  
**Data: MAIO / 2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

ÁREA GEOTÉCNICA

**METODOLOGIA DE RETROANÁLISE DE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA EM CAMADAS DE  
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA RETROPAV**

**Por:**

CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil e Ambiental**



**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC**

C376m Cavalcante, Cacildo de Medeiros Brito

Metodologia de retroanálise de módulos de resiliência em camadas de pavimentos flexíveis: desenvolvimento do Programa RETROPAV / Cacildo de Medeiros Brito Cavalcante. — Campina Grande, 2010.

151 f. : il. col.

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

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena.

1. Pavimentação. 2. Mecânica dos Pavimentos. 3. Retroanálise. I. Título.

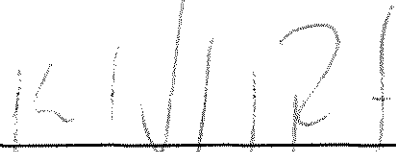
CDU – 625.85(043)

CACILDO DE MEDEIROS BRITO CAVALCANTE

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande-PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

Área de Concentração – Geotécnica

APROVADA POR:



Prof. John Kennedy Guedes Rodrigues, D.Sc. (UFCG)  
(Orientador)



Prof. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena, D.Sc. (UFCG)  
(Orientador)



Prof. Erinaldo Hilário Cavalcante, D.Sc. (UFS)  
(Examinador Externo)



Prof. Raimundo Leidimar Bezerra, D.Sc. (PPGECA/UFCG)  
(Examinador Interno)

Campina Grande- PB, Março de 2010



**“Aos audazes nem a morte se impõe”**

**(ALEXANDRE, O GRANDE)**

## Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, amigos e professores que influenciaram toda a minha vida, representando uma fonte contínua de aprendizado e desenvolvimento.

## Agradecimentos

- A Deus, principalmente.
- À Kellianne minha esposa pelo incentivo, carinho, compreensão, amizade e amor durante todo o desenvolvimento deste trabalho.
- Aos Meus pais, Jorge e Rosângela, por todo o esforço, companheirismo, cobrança e incentivo em todas as fases de minha vida.
- Ao Professor Dr. José Afonso Gonçalves de Macedo, mestre, pessoa por quem cultivei grande respeito e admiração.
- Ao meu amigo Fabiano Pereira, a quem sou eternamente grato, pela ajuda, compreensão, disponibilidade e apoio em todas as atividades que desempenhei na elaboração deste trabalho.
- Ao Professor Dr. Kennedy e Professor Dr. Adriano pela paciência, disponibilidade e orientação em todos os momentos.
- À JBR Engenharia por todo o apoio disponibilizado, que propiciou este estudo.

## Resumo

O trabalho desenvolvido teve por finalidade estudar os processos envolvidos na retroanálise dos módulos resilientes das camadas constituintes do pavimento, com o objetivo de desenvolver uma metodologia diferenciada de retroanálise e implementá-la em um programa, o RETROPAV, acurado e de fácil utilização. Para a elaboração do programa, várias premissas foram seguidas, das quais se destaca a utilização do programa de análise tensão/deformação de camadas elásticas ELSYM5 para o cálculo das deflexões, programa baseado na teoria das camadas elásticas, que caracteriza o pavimento como um semi-espaço elástico, composto por multicamadas consideradas isotrópicas, homogêneas e com aderência perfeita. A rotina para obtenção dos módulos emprega a técnica de ajuste das deflexões medidas às calculadas, através de processo iterativo, até que a função obtida pela soma dos erros relativos entre deflexões medida e calculada atinja um valor mínimo. Foi realizado o estudo utilizando bancos de dados disponibilizados por Nóbrega (2003) e Cavalcante (2005), que propiciaram realizar um comparativo entre os resultados apresentados pelo RETROPAV e vários outros programas de retroanálise, como o REPAV, o REPAV2V, o RETROANA, o RETRAN5-L, o EVERCALC5 e ELMOD. A técnica de obtenção de módulos a partir do ajuste entre bacias não garante unicidade para a solução obtida, onde se podem obter várias combinações de MR para a mesma bacia de deflexões analisada. Este aspecto é estudado, demonstrando que o principal parâmetro para a obtenção de bons valores de MR está no engenheiro, agente do processo de retroanálise, baseado na sua experiência e conhecimento, dos limites e critérios adotados pelos métodos de retroanálise utilizados, como também do comportamento dos materiais, validados em estudos realizados por outros pesquisadores ou verificados em estudos de laboratório.



## Abstract

The work in this study was to study the processes involved in backanalysis of the resilient modulus of the constituent layers of the pavement, with the goal of developing a different methodology of backanalysis and implement it in a program, the RETROPAV, accurate and easy to use. In preparing the program several assumptions have been followed, of which highlights the use of program analysis stress-strain of elastic layers ELSYM5 for the calculation of deflections, a program based on the theory of elastic, which features the pavement like a half-space elastic, composed of multilayer considered isotropic, homogeneous and perfect grip. The routine for obtaining the module employs the technique of adjusting measures to deflections calculated using an iterative process until the function obtained by summing the relative errors between measured and calculated deflection reaches a minimum value. Study was conducted using databases provided by Nobrega (2003) and Cavalcante (2005), which enabled to carry out a comparison between the results reported by RETROPAV to several other programs of backanalysis, as REPAVE, REPAV2V, RETROANA, RETRAN5-L, EVERCALC5 and ELMOD. The technique of obtaining modules from the fit between basins does not guarantee uniqueness for the solution, we can get various combinations of module for the same basin of deflections analyzed. This aspect is studied, demonstrating that the main parameter for obtaining good modules is the engineer officer in the process of backanalysis, based on his experience and knowledge, of the limits and criteria for backanalysis methods used but also the behavior of materials, validated his studies by other researchers or verified in laboratory studies.

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Notação Boussinesq para a equação (Huang, 1993)._____	6
Figura 2.2: Linhas de influência para determinação da tensão vertical em um ponto devido a um carregamento circular (Huang, 1993)._____	8
Figura 2.3: Típicas transformações no método MEQ._____	9
Figura 2.4: Típico sistema multicamadas._____	9
Figura 2.5: Modelos mecânicos para materiais viscoelásticos (Huang, 1993)._____	12
Figura 2.6: Tela do programa JULEA for Windows (FRANCO, 2000)._____	21
Figura 2.7: Esquema do ensaio de placa (NÓBREGA, 2003)._____	27
Figura 2.8: Ilustração do ensaio realizado com a viga Benkelman (MOTTA, 2003)._____	29
Figura 2.9: Ilustração do Deflectôgrafo Digital (www.solostest.com.br, 2004)._____	30
Figura 2.10: Localização dos Geofones em relação à placa de teste._____	31
Figura 2.11: Ilustração do FWD Dynatest 8000E ( <a href="http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm">http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm</a> )._____	32
Figura 2.12: Princípio de Funcionamento do FWD._____	32
Figura 2.13: Distribuição real do carregamento no pavimento, (HUANG, 1993)._____	34
Figura 2.14: Representação esquemática – Conceito de Deflexão Nula._____	46
Figura 2.15: Geometria do Modelo de Hoog (FABRÍCIO et al., 1988)._____	54
Figura 2.16: Linhas de Iguais Deflexões Verticais no Sistema Pavimento-Subleito (modificado - NORELDIN, 1993)._____	56
Figura 3.1: Processo de Iteração Realizado pelo RETROPAV para Retroanálise. _____	67
Figura 4.1: Estrutura Alimentada no Programa RETROPAV, Referente a BR-277/PR (NÓBREGA, 2003)_____	78
Figura 4.2: Histograma dos Módulos Retroanalizados do Revestimento do SH-01 da BR-277/PR_____	80
Figura 4.3: Histograma dos Módulos Retroanalizados da Base do SH-01 da BR-277/PR_____	80
Figura 4.4: Histograma dos Módulos Retroanalizados do Subleito do SH-01 da BR-277/PR_____	81

Figura 4.5: Estrutura Alimentada no Programa RETROPAV, Referente à BR-418/MG	83
Figura 4.6: Histograma dos Módulos Retroanalizados do Revestimento do SH-01 da BR-418/MG	85
Figura 4.7: Histograma dos Módulos Retroanalizados da Base do SH-01 da BR-418/MG	85
Figura 4.8: Histograma dos Módulos Retroanalizados do Subleito do SH-01 da BR-418/MG	86
Figura 4.9: Estrutura Alimentada no Programa RETROPAV, Referente à BR-230/PB, Composta por 3 Camada.	88
Figura 4.10: Estrutura Alimentada no Programa RETROPAV, Referente à BR-230/PB, Composta por 4 Camadas	88
Figura 4.11: Histograma dos Módulos Retroanalizados do Revestimento do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.	91
Figura 4.12: Histograma dos Módulos Retroanalizados da Base do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.	91
Figura 4.13: Histograma dos Módulos Retroanalizados da Sub-base do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.	92
Figura 4.14: Histograma dos Módulos Retroanalizados do Subleito do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.	92
Figura 4.15: Seção do Pavimento da Rodovias BR-230PB, Lote III, Dimensionada para um Número de Repetições de Eixo Padrão de $N = 4.50 \times 10^7$ .	103
Figura 4.16: Estrutura utilizada para cômputo de Tensões e Deformações.	103
Figura 4.17: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 1.	108
Figura 4.18: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 2.	109
Figura 4.19: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 3.	109
Figura 4.20: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 4.	109
Figura 4.21: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 5.	110
Figura 4.22: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 6.	110
Figura 4.23: Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 7.	110

Figura A.1: Tela de Apresentação do RETROPAV. _____	121
Figura A.2: Detalhe da Caracterização do Levantamento Deflectométrico a ser Retroanalisado pelo RETROPAV. _____	122
Figura A.3: Detalha de Caracterização da Estrutura do Pavimento do RETROPAV. _____	123
Figura A.4: Dados Referentes à Retroanálise Realizada pelo RETROPAV. _____	124
Figura A.5: RETOPAV Durante Realização de Retroanálise. _____	125



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Equações de Boussinesq para um Ponto de Carga. _____	6
Tabela 2.2: Valores de Coeficiente de Poisson para Alguns Materiais de Pavimentação (TRB, 1975) _____	39
Tabela 2.3: Fatores de Correção da Carga em Função do Coeficiente de Poisson (AASHTO, 1993). _____	50
Tabela 2.4: Faixas de Módulos Retroanalizados (CARDOSO, 1995). _____	51
Tabela 3.1: Segmentos Homogêneos da BR277/PR Tratados Estatisticamente (Cavalcante et al., 2007). _____	70
Tabela 3.2: Resultado da Retroanálise pelos Métodos Avaliados de Convergência para 3 Camadas. _____	70
Tabela 3.3: Análise Estatística dos RMS (%) e ITERAÇÕES das Soluções Apresentadas para os Métodos 1 e 2 da Retroanálise com 3 Camadas do Programa RETROPAV. _____	71
Tabela 3.4: Resultado dos Módulos Retroanalizados das Camadas 1 e 2 para os 4 Métodos Avaliados. _____	72
Tabela 3.5: Resultado dos Módulos Retroanalizados das Camadas 3 e 4 para os 4 Métodos Avaliados. _____	73
Tabela 3.6: Análise Estatística dos RMS (%) e Iterações das Soluções Apresentadas para os Métodos 1, 2, 3 e 4 da Retroanálise com 4 Camadas do Programa RETROPAV. _____	74
Tabela 4.1: Retroanálise dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, das Bacias Deflectométricas da BR-277/PR, com o Programa RETROPAV. _____	79
Tabela 4.2: Análise Estatística dos Módulos Retroanalizados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETAN5-L, para o SH-01 da BR-277/PR. _____	82
Tabela 4.3: Retroanálise dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, das Bacias Deflectométricas da BR-418/MG, com o Programa RETROPAV. _____	84
Tabela 4.4: Análise Estatística dos Módulos Retroanalizados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETAN5-L, para o SH-01 da BR-418/MG. _____	87
Tabela 4.5: Retroanálise com 3 Camadas dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, Lado Direito, das Bacias Deflectométricas da BR-230/PB, Lote II. _____	89
Tabela 4.6: Retroanálise com 4 Camadas dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, Lado Direito, das Bacias Deflectométricas da BR-230/PB, _____	

Lote II. _____	90
Tabela 4.7: Análise Estatística dos Módulos Retroanalizados pelos Programas RETROPAV – 3 Camadas, RETROANA, RETROPAV – 4 camadas, EVERCALC5 e ELMOD, para o SH-01 da BR-230/PB, Lote II _____	95
Tabela 4.8: Análise Estatística dos RMS(%) Obtidos com a Reconstituição das Bacias Deflectométricas do Segmento Homogêneo 01, da BR-277/PR, com o Programa JULEA, Utilizando os Módulos Retroanalizados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L _____	97
Tabela 4.9: Análise Estatística dos RMS(%) Obtidos com a Reconstituição das Bacias Deflectométricas do Segmento Homogêneo 01, da BR-418/PR, com o Programa JULEA, Utilizando os Módulos Retroanalizados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L _____	99
Tabela 4.10: Análise Estatística dos RMS(%) Obtidos com a Reconstituição das Bacias Deflectométricas do Segmento Homogêneo 01 Lado Direito, da BR-230, Lote II, com o Programa JULEA, Utilizando os Módulos Retroanalizados pelos Programas RETROPAV, RETROANA EVERCALC5 e ELMOD. _____	100
Tabela 4.11: Resumo Estatístico das Bacias Deflectométricas Medidas entre as Estacas 4002 e 4118, na BR-230/PB, Lote III, Lado Direito _____	104
Tabela 4.12: Resumo Estatístico da Retroanálise 1. _____	104
Tabela 4.13: Resumo Estatístico da Retroanálise 2. _____	104
Tabela 4.14: Resumo Estatístico da Retroanálise 3. _____	105
Tabela 4.15: Resumo Estatístico da Retroanálise 4. _____	105
Tabela 4.16: Resumo Estatístico da Retroanálise 5. _____	105
Tabela 4.17: Resumo Estatístico da Retroanálise 6. _____	106
Tabela 4.18: Resumo Estatístico da Retroanálise 7. _____	106
Tabela 4.19: Tensões Admissíveis e Efetivas no Topo do Subleito, Utilizando os Módulos Retroanalizados e o Modelo de Heukelom e Klomp (1962). _____	107
Tabela 4.20: Deformações de Tração Admissíveis e Efetivas na Fibra Inferior do Revestimento, Utilizando os Módulos Retroanalizados e o Modelo de Pinto (1991). _____	107
Tabela 4.21: Deformações de Tração Determinada para Várias Espessuras de Reforço para os Sete Conjuntos de Módulos Retroanalizados. _____	108
Tabela 4.22: Espessuras de Reforços pelos Métodos de DNER e pelo Método Mecânico. _____	111

## Lista de Siglas, Abreviaturas e Símbolos

- $(\sigma_r)_{adm}$  - tensão vertical admissível no topo do subleito, Mpa;
- $\nu$  - coeficiente de Poisson;
- $a$  - distância do ponto de aplicação da carga (cm);
- $a$  - raio da área circular de distribuição de carga;
- $a_e$  - raio do bulbo de tensões;
- $D$  - espessura total das camadas sobre o subleito;
- $D_a$  - deflexão à distância  $a$  (cm);
- $d_c$  - Deflexão calculada pelo programa de análise tensão/deformação.
- $d_i$  - Deflexão calculada pelo ELSYM5 na iteração  $i$ ;
- $d_m$  - Deflexão medida em campo com o levantamento deflectométrico;
- $d_o$  - deflexão máxima;
- $D_o$  - deflexão no centro do carregamento;
- $D_x$  - deflexão assumida como sendo do subleito;
- $E$  - módulo elástico.
- $E_i$  - módulo elástico da camada superior
- $E_n$  - módulo elástico da camada inferior,
- $E_p$  - módulo de deformação da placa;
- $E_p$  - módulo efetivo do pavimento;
- $E_{SL}$  - módulo de deformação do subleito;
- $E_{sub}$  - módulo do subleito;
- $F$  - força de pico
- $f$  - fator de correção.
- $f_0$  - fator laboratório-campo;
- $g$  - aceleração da gravidade
- $h$  - altura de queda
- $h_{e,n}$  - espessura equivalente para  $n$  camadas,

$h_i$  – espessura da camada superior,

$k$  – constante de mola do sistema de amortecedores

$l_0$  – comprimento característico;

$M$  – massa do peso que cai

$M_{AL}$  – módulo de elasticidade do alumínio.

$M_i$  – Módulo adotado para o valor inicial quando  $i = 0$  ou módulo determinado na iteração  $i$ ;

$M_{i+1}$  – Módulo da nova iteração

$MR$  – módulo resiliente.

$M_{sub}$  – módulo de resiliência do subleito;

$N$  – número de repetições de carga.

$N'_f$  – Número equivalente de solicitações da carga de eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada de concreto asfáltico;

$N_c$  – número terminal de solicitações do eixo padrão rodoviário, para uma área afetada por trincas de fadiga da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento.

$N_f$  – Número equivalente de solicitações da carga de eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada de concreto asfáltico para uma área afetada da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento;

$N_L$  – número de repetições de cargas necessários à ruptura completa da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada – Vida de Fadiga;

$P$  – carga aplicada;

$p$  – pressão de contato;

$r$  – distância horizontal entre o ponto de carga e o ponto estudado.

$R$  – rigidez da placa;

$RMS(\%)$  – “Root Mean Square” - Raiz Média Quadrática (%);

$r_x$  – distância radial assumida como sendo o ponto de localização da deflexão do subleito (em cm);

$S_f$  – fator de correção da carga em função do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

$SN_{EF}$  – número estrutural efetivo do pavimento;

$t$  – espessura da placa;

$T_x$  – espessura efetiva do pavimento;

$z$  – profundidade do ponto estudado,



$\Delta\sigma$  – diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;

$\varepsilon_t$  – máxima deformação específica horizontal de tração na face inferior da camada betuminosa, cm/cm;

$\mu$  – viscosidade do material.

$\nu_{SL}$  – coeficiente de Poisson do subleito.

## SUMÁRIO

<i>Capítulo 1</i>	1
<i>1. Introdução</i>	1
1.1 Justificativa	2
1.2. Objetivo	2
1.2.1 Objetivo geral	2
1.2.2 Objetivo Específicos	2
1.3 Organização do Trabalho	3
<i>Capítulo 2</i>	4
<i>2. Fundamentação Teórica</i>	4
2.1 Considerações Gerais sobre Tensões e Deformações em Análise de Pavimentos	4
2.2 Teorias sobre Tensões e Deformações dos Materiais Constituintes do Pavimento	4
2.2.1 Lei de Hooke	5
2.2.2 Equação de Boussinesq	5
2.2.3 Método Gráficos	7
2.2.4 Método de Espessura Equivalente (meq)	8
2.2.5 Método dos Elementos Finitos	10
2.2.6 Método Viscoelástico	10
2.3 Sistemas de Camadas	12
2.3.1 Teorias das Camadas Elásticas	13
2.4 Programas de Multicamadas Elásticas	14
2.4.1 Programas de Análise Tensão/Deformação	16
2.5 Dimensionamento Mecanístico dos Pavimentos	22
2.5.1 Previsão da Vida de Fadiga dos Pavimentos	23
2.5.2 Danos por Deformação Permanente	25
2.6 Métodos de Avaliação Estrutural Através de Ensaios Não-Destrutivos	26
2.6.1 Medições de Deflexão in situ	27
2.6.1.1 Equipamentos de Carregamento Quase-Estático	27
2.6.1.2 Equipamento de Carregamento por Impulso	30
2.7 Considerações Gerais Sobre Retroanálise do Comportamento Mecânico da Estrutura do Pavimento	35
2.7.1 Considerações Acerca da Retroanálise	37

2.7.2 Limitações dos Programas de Retroanálise _____	39
2.7.3 Módulos Resilientes de Materiais Granulares Retroanalísados Versus Ensaio em Laboratório _____	41
2.7.4 Fatores que Influenciam no Processo de Retroanálise _____	42
2.7.5 Métodos Clássicos de Retroanálise _____	46
2.7.5.1 Métodos Iterativos _____	48
2.7.5.2 – Métodos Simplificados _____	51
2.7.5.3 Métodos Iterativos Inversos _____	58
2.7.6 Programas de Retroanálise de Camadas Elásticas _____	59
<b>Capítulo 3</b> _____	66
3. Metodologia de Retroanálise de Bacia de Deflexão. _____	66
3.1 Introdução _____	66
3.2 Procedimentos Gerais _____	67
3.2.1 Processos do RETROPAV _____	67
3.2.2 Algoritmo de Aproximação do RETROPAV _____	68
3.3 Critérios de Parada Adotados no RETROPAV _____	74
3.3.1 Erro Médio Quadrático como Critério de Parada _____	75
3.3.2 Quantidade de Iterações como Critério de Parada _____	75
3.3.3 Convergência Contínua do rms (%) como Critério de Parada _____	75
<b>Capítulo 4</b> _____	77
4. Retroanálise com o RETROPAV _____	77
4.1 Retroanálise com 3 Camadas _____	78
4.2 Retroanálise com 4 Camadas _____	88
4.3 Análise Crítica dos Resultados Obtidos _____	96
4.4 Avaliação do Erro Médio Quadrático como Critério de Parada _____	101
4.4.1 Erro Médio Quadrático _____	102
4.4.2 Estudo de Retroanálise _____	102
4.4.3 Avaliação da Influência do Critério de Parada no Diagnóstico da Rodovia. _____	104
<b>Capítulo 5</b> _____	113
<b>Referências Bibliográficas</b> _____	116
<b>Anexo I - Programa De Retroanálise De Pavimentos - RETROPAV.</b> _____	121
<b>Anexo II – Reconstituição das Bacias Deflectométricas dos Módulos Retroanalísados para o SH- 01 da BR-277/PR</b> _____	126

*Anexo III – Reconstituição das Bacias Deflectométricas dos Módulos Retroanalisados Para o SH-01 da BR-418/MG.* \_\_\_\_\_ 132

*Anexo IV – Reconstituição das Bacias Deflectométricas dos Módulos Retroanalisados para o Segmento Homogêneo 01, Lado Direito, Da BR-230/PB* \_\_\_\_\_ 141



# Capítulo 1

## 1. Introdução

A retroanálise dos módulos resilientes das camadas constituintes do pavimento, através de medidas de deflexão, determinadas em ensaios não-destrutivos, tem sido utilizada a mais de quatro décadas tanto para avaliar e gerenciar pavimentos, quanto, para dimensionar pavimentos novos. Infelizmente, ainda existe muita imprecisão, apesar da variedade de programas que empregam diferentes procedimentos e algoritmos para realizar a retroanálise dos módulos das camadas.

Segundo Chou e Lytton (1991); apud Alkasawneh (2007), "o valor e a precisão dos módulos retroanalizados são diretamente dependentes do processo de retroanálise". De forma geral, para que se possa dar início ao processo de retroanálise, é necessário informar módulos de partida. A realização do mesmo processo de retroanálise com diferentes módulos de partida levam a diferentes valores para os módulos retroanalizados que, por sua vez, levam a diferentes concepções e avaliações do pavimento, criando grandes desafios aos engenheiros.

Pode-se destacar, segundo Alkasawneh (2007), que dentre os problemas de qualquer procedimento clássico de retroanálise destacam-se a convergência, a acurácia, bem como a limitação do número de camadas no programa de retroanálise. A seleção acurada dos módulos iniciais também influencia na convergência do processo de retroanálise dos módulos das camadas do pavimento, que tem como objetivo minimizar o erro médio quadrático entre a bacia de deflexões medida e a bacia de deflexões calculada, utilizando os módulos retroanalizados.

Sabe-se que mais de uma solução pode satisfazer o critério de convergência dos módulos retroanalizados do pavimento, devido a própria natureza do processo de retroanálise, onde várias combinações modulares podem demonstrar a solução do problema. Por sua vez, a chegada a estas combinações pode conduzir a uma "imprecisa" determinação dos módulos das camadas de pavimento, podendo chegar a diagnósticos distintos, tanto ao avaliar e gerenciar, como para dimensionar pavimentos.

Segundo Huang (1993), outro fator de grande importância a ser considerado na retroanálise é que o número máximo de camadas que podem ser utilizadas em qualquer programa não deve exceder a 5, com recomendações para se utilizar 3 camadas, com o objetivo de diminuir o erro associado ao processo de retroanálise, mesmo existindo situações onde o aumento do número de camadas no processo de retroanálise é desejável para se determinar mais precisamente a variação dos módulos com a profundidade.

## **1.1 Justificativa**

Este trabalho tem por fundamento a proposição de metodologia iterativa de retroanálise diferente da utilizada pelos programas disponíveis na atualidade; os quais iniciam a determinação dos módulos resilientes a partir do módulo do subleito, depois partem para o módulo do revestimento, para finalmente determinarem os módulos das camadas granulares de base e sub-base.

Na metodologia proposta e implementada no programa de retroanálise RETROPAV, a determinação dos módulos é iterativa e a aproximação ocorre em todas as camadas constituintes do pavimento ao mesmo tempo, tendo como fator de aproximação a relação entre as deflexões medidas e calculadas.

## **1.2. Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um programa de retroanálise (RETROPAV) que possua interface amigável e que seja acurado na determinação dos módulos do pavimento.

### **1.2.2 Objetivo Específicos**

- 1) Estudo do processo de determinação dos módulos elásticos das camadas constituintes do pavimento e o efeito do erro médio quadrático como critério de parada para o processo de retroanálise dos módulos do pavimento;
- 2) Estudo da complexidade do espaço de soluções para os módulos retroanalizados;
- 3) Avaliar o desempenho e a acurado do novo programa de retroanálise, comparando seus

resultados com aqueles fornecidos por outros programas de retroanálise existentes (REPAV, REPAV 2V, RETRAN 2CL, RETRAN 5L, RETROANA, ELMOD, EVERCALC5).

### **1.3 Organização do Trabalho**

O texto desta Dissertação encontra-se em um volume distribuído da seguinte forma:

[Capítulo 1] Introdução, Objetivos e Organização do Trabalho – é descrita uma visão geral do trabalho com a introdução, os objetivos a serem alcançados e a forma de organização do trabalho.

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica – é realizada revisão bibliográfica acerca das teorias que regem o comportamento das camadas constituintes do pavimento, das teorias aplicadas às soluções do problema de retroanálise, como também sobre as metodologias existentes e os programas mais utilizados no Brasil que possibilitam a execução de retroanálise.

[Capítulo 3] Metodologia – é apresentada nova metodologia de retroanálise, implementada no programa RETROPAV, fundamentando os critérios utilizados através de avaliações.

[Capítulo 4] Programa RETROPAV – está apresenta um manual resumido para utilização do programa RETROPAV.

[Capítulo 5] Resultados e Discussões – é avaliado o programa RETROPAV, comparando seus resultados aos resultados apresentados por outros programas, como também avalia o critério de aproximação, o erro médio quadrático, como único parâmetro para determinar a acurado da retroanálise.

Conclusões e Sugestões – são realizadas as considerações finais do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema.

Por fim estão incluídas as Referências Bibliográficas e os Anexos, onde foram inseridas as referências citadas para a realização do trabalho, as planilhas e os gráficos resultantes dos ensaios realizados.

## Capítulo 2

### 2. Fundamentação Teórica

#### 2.1 Considerações Gerais Sobre Tensões e Deformações em Análise de Pavimentos

No quadro modal de transportes do Brasil, as estradas são elementos de grande importância na economia do país, pois é o principal meio utilizado para escoar sua produção. Sendo assim, a durabilidade das rodovias e trafegabilidade são elementos essenciais para a concepção, reabilitação e manutenção do pavimento. Outro fator muito influente, que muitas vezes se destaca na pavimentação rodoviária, é o custo dos materiais utilizados para sua construção ou reabilitação, que sofrem grande influência do tipo de material disponível na região onde a rodovia está localizada, fazendo com que seu custo varie amplamente, baseado nos parâmetros utilizados para o dimensionamento.

O desempenho e a durabilidade são então, parâmetros de grande interesse tanto para os pavimentos existentes quanto para os novos, na perspectiva de aumentar a vida útil do pavimento e de diminuir os perigos a que os usuários estão submetidos. No Brasil, uma grande parte do orçamento das agências de transporte é gasta anualmente na manutenção e melhoria do pavimento. Pode-se então afirmar que a necessidade atual de procedimentos mais práticos e atualizados para avaliar e dimensionar pavimentos é inevitável, devido à complexidade das estradas, o avanço nas técnicas de dimensionamento e dos mecanismos que regem o comportamento dos pavimentos.

#### 2.2 Teorias Sobre Tensões e Deformações dos Materiais Constituintes do Pavimento

Pode-se avaliar o desempenho dos pavimentos através da avaliação do comportamento dos materiais que constituem suas camadas. Dentre as teorias que existem, a teoria da elasticidade foi a primeira a ser utilizada para análise de pavimentos. Foi aplicada para estudar a resposta estrutural do pavimento assumindo que os materiais que o compõem são elásticos. A teoria da elasticidade funciona bem enquanto a relação tensão-deformação é constante. Segundo Huang (1993), a teoria da elasticidade é bem adequada para se estudar camadas do pavimento

enquanto estas são submetidas a tensões abaixo da tensão de ruptura. Equações derivadas da teoria da elasticidade usam a mesma teoria básica, mas com pressupostos diferentes para as propriedades dos materiais e geometria. A análise do pavimento através da teoria da elasticidade é normalmente realizada utilizando a lei de Hooke e as equações de Boussinesq, que são descritas a seguir.

### 2.2.1 Lei de Hooke

Lei de Hooke se baseia no pressuposto de que a relação tensão-deformação é constante no caso de uma carga uniaxial ser aplicada ao material. A lei de Hooke foi derivada assumindo que o material é perfeitamente elástico e homogêneo.

### 2.2.2 Equação de Boussinesq

Boussinesq desenvolveu equações para calcular tensões dentro de um semi-espaco homogêneo, isotrópico, linearmente elástico, sob um ponto de carga agindo perpendicularmente à superfície. Este semi-espaco foi considerado como uma área infinitamente grande a uma profundidade infinita. Segundo Huang (1993), Boussinesq determinou o valor da tensão em um ponto de uma estrutura composta de um material homogêneo, isotrópico e linearmente elástico através da equação (01):

$$\sigma_z = \frac{P(3z^3)}{2\pi(r^2 + z^2)^{5/2}} = \frac{(3P/2\pi)}{z^2 \left(1 + \frac{r^2}{z^2}\right)^{5/2}} \quad (01)$$

sendo  $P$  = carga aplicada,  $z$  = profundidade do ponto estudado,  $r$  = distância horizontal entre o ponto de carga e o ponto estudado.

Boussinesq desenvolveu também outras equações para calcular as deformações, tensões normais e deslocamentos em um material elástico carregado como mostrado na Tabela 2.1 e na Figura 2.1. Pode ser visto, a partir da Tabela 2.1 que as tensões normais, deslocamentos, deformação tangencial e deformação radial dependem do módulo de Poisson,  $\nu$ , e/ou do módulo de elasticidade,  $E$ , enquanto a tensão vertical e deformações principais são independentes do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade.

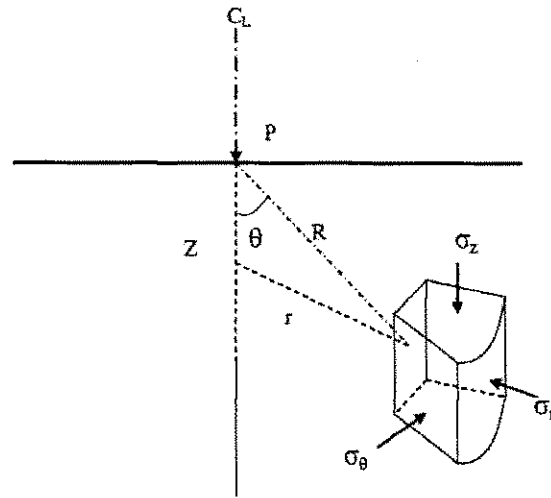


Figura 2.1 – Notação de Boussinesq para a equação (Huang, 1993).

Tabela 2.1 – Equações de Boussinesq para um Ponto de Carga.

<p><b>Tensões Normais</b></p> $\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3 \theta$ $\sigma_r = \frac{3P}{2\pi R^2} \left( 3 \cos \theta \sin^2 \theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right)$ $\sigma_t = \frac{3P}{2\pi R^2} (1-2\nu) \left( -\cos \theta + \frac{1}{1+\cos \theta} \right)$ $\sigma_v = \frac{1}{3} (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_t) = \frac{P}{3\pi R^2} (1+\nu) \cos \theta$	<p><b>Deformações Normais</b></p> $\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi ER^2} (3 \cos^3 \theta - 2\nu \cos \theta)$ $\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi ER^2} \left( -3 \cos^3 \theta - (3-2\nu) \cos \theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right)$ $\varepsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{2\pi ER^2} \left( -\cos \theta + \frac{1-2\nu}{1+\cos \theta} \right)$ $\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{2\pi ER^2} (1-2\nu) \cos \theta$
<p><b>Tensões Cisalhantes</b></p> $\tau_{rz} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^2 \theta \sin \theta$ $\tau_{rt} = \tau_{zt} = 0$	<p><b>Deslocamentos</b></p> $d_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi ER^2} (2(1-\nu) + \cos^2 \theta)$ $d_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi ER^2} \left( \cos \theta \sin \theta - \frac{(1-2\nu) \sin \theta}{1+\cos \theta} \right)$ $d_t = 0$

Westergaard derivou a equação de tensões sobre um ponto carregado em um espaço semi-infinito, elástico e homogêneo com coeficiente de Poisson igual a zero. Quando estudadas as respostas fornecidas pelas equações de Boussinesq e comparando-as às de Westergaard, ambas

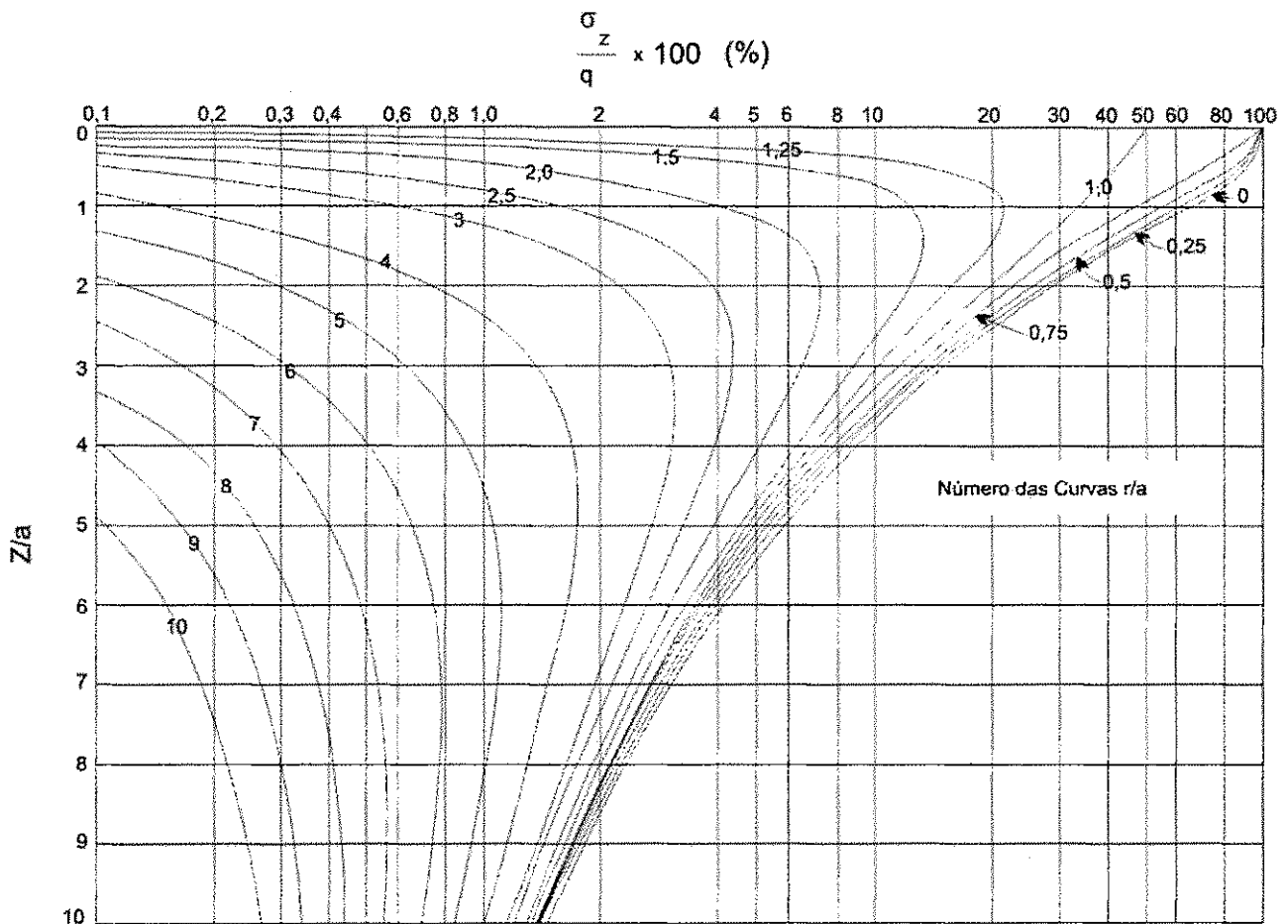
forneem quase o mesmo valor de tensões para  $r/z \geq 1,5$ ; já para valores de  $r/z < 1,5$  as equações de Boussinesq forneem valores maiores que as equações de Westergaard (Huang, 1993).

Segundo Huang (1993), Boussinesq desenvolveu uma teoria mais realista para tensões em materiais granulares assumindo a variável módulo de deformabilidade, que varia em função da mudança da pressão confinante. Esta hipótese considera que o módulo do material aumenta com o aumento das tensões a que está submetido.

### 2.2.3 Método Gráficos

A solução de Boussinesq foi estendida por diferentes pesquisadores para várias condições de carregamento diferentes. Podemos citar como exemplo, a solução para uma área circular carregada, que pode ser obtida através da integração da solução de Boussinesq para um ponto de carga.

Outra forma de obtenção das soluções é pelo método das linhas de influência, que forneem as soluções para tensões e deformações em ábacos que foram desenvolvidos aplicando simplificações para as condições existentes, como visto na Figura 2.2. Estas hipóteses podem, segundo FOSTER e AHLIN, 1954 apud ALKASAWNEH, 2007, desprezar o coeficiente de Poisson, ou o considerar, segundo AHLVIN e ULERY, 1962 apud ALKASAWNEH, 2007. Segundo Huang (1993), o Coeficiente de Poisson tem relativamente pouco efeito sobre a deformação e as tensões na teoria do semi-espaço elástico e, portanto, pode ser desprezado através de simplificações.



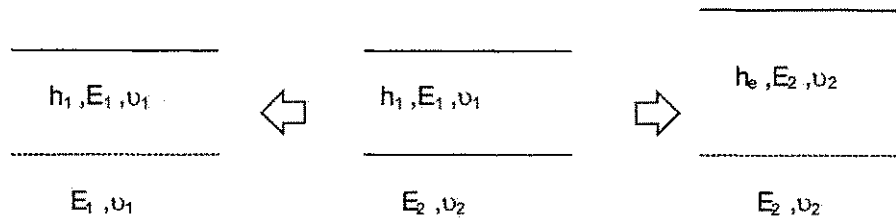
**Figura 2.2 – Linhas de Influência para Determinação da Tensão Vertical em um Ponto Devido a um Carregamento Circular aplicado na superfície de uma camada (Huang, 1993).**

#### 2.2.4 Método de Espessura Equivalente (MEQ)

Segundo Alkasawneh (2007), este método foi desenvolvido inicialmente por Odemark, no qual o método transforma um sistema com diferentes módulos em um sistema com um único módulo, a fim de aplicar a teoria da elasticidade clássica ao sistema. Este método envolve duas etapas em que a interface desempenha uma regra fundamental para a transformação. Na Figura 2.3, tensões e deformações na primeira camada podem ser encontrados usando o mesmo módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para a segunda camada, considerando um espaço semi-infinito.

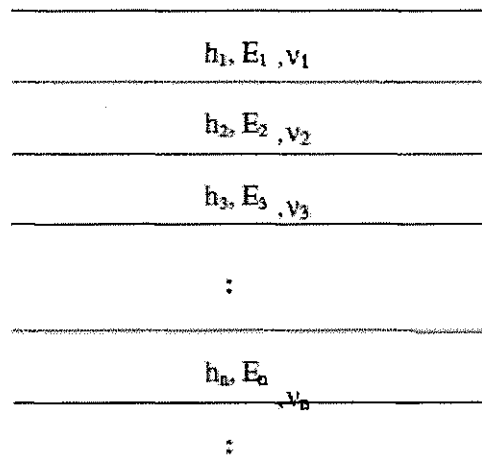
A deformação e as tensões na segunda camada podem ser encontradas ao transformar a primeira camada em uma camada com o mesmo módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da segunda camada, mas com uma nova espessura, determinada com base na rigidez original da primeira camada.





**Figura 2.3 – Típicas Transformações no Método MEQ.**

Teoricamente, o método MEQ pode ser aplicado a qualquer sistema, com qualquer número de camadas como mostrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4 – Típico Sistema Multicamadas.**

A espessura equivalente da camada transformada é baseada na rigidez original da camada, e pode ser determinada utilizando a Equação 02 (Huang, 1993):

$$h_{e,n} = f \sum_{i=1}^{n-1} \left( h_i \left( \frac{E_i}{E_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (02)$$

Sendo  $h_{e,n}$  a espessura equivalente para  $n$  camadas,  $h_i$  a espessura da camada superior,  $E_i$  o módulo elástico da camada superior e  $E_n$  o módulo elástico da camada inferior, sendo  $f$  um fator de correção.

Este método é baseado no pressuposto de que a distribuição de tensão abaixo da camada não sofrerá mudança desde que uma rigidez equivalente seja utilizada para cada camada. Desta maneira, supõe-se que as tensões e as deformações são lineares em cada camada. No entanto, o MEQ é um método aproximado de determinação da deformação e tensões, devendo estes valores serem corrigidos para fiarem de acordo com a teoria das camadas elásticas.

O fator de correção deve ser calculado em função do número de camadas no sistema, do coeficiente de Poisson, do módulo de elasticidade, e da espessura da camada. Em geral, o fator de correção recomendado para a primeira interface em um sistema de duas camadas é 0,9, enquanto que em um sistema de multicamadas é 1,0. Já o fator de correção recomendado para outras interfaces em um sistema de multicamadas é 0,8 (Ullidtz, 1987 apud Alkasawneh, 2007). O método MEQ pode superestimar ou subestimar tensões e deformações na camada e na interface, podendo, portanto, produzir resultados errados, a menos que um bom fator de correção, aferido com resultados confiáveis de laboratório, seja utilizado.

### **2.2.5 Método dos Elementos Finitos**

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido utilizado para estudar as respostas dos pavimentos flexíveis utilizando qualquer lei constitutiva do material. No MEF, a geometria em estudo é discretizada em pequenos elementos ligados por nós para assemelhar a geometria real ou domínio. Aplicando então as leis constitutivas que regem o comportamento do material, as tensões e deformações podem ser calculadas. A vantagem da análise através do MEF vem da capacidade de simular qualquer condição de carga, estática e dinâmica, e qualquer variação geométrica, e descontinuidades locais, tais como fissuras ou juntas.

A modelagem mais prática usando o MEF envolve apenas a análise bidimensional da seção do pavimento devido ao custo, tempo e limitações da modelagem associada à análise tridimensional. A análise tridimensional envolve a discretização do domínio utilizando técnicas sofisticadas que afetam o tempo e os custos necessários para o estudo das respostas do pavimento. A análise bidimensional pressupõe equilíbrio axisimétrico das condições que limitam a simulação de toda geometria onde ocorrem descontinuidades.

### **2.2.6 Método Viscoelástico**

Segundo Huang (1993), as deformações nos materiais podem ser elásticas, plásticas, viscosas e viscoelásticas. Com base no comportamento físico, estas deformações podem ser categorizadas

como processos de armazenamento de energia e processos de dissipação viscosa. Tem-se que o comportamento viscoelástico é dependente do tempo, enquanto deformações elásticas podem ser independentes deste fator. Tem-se também que materiais plásticos são ligeiramente viscosos, mas por simplificação podem ser considerados independentes do fator tempo. Desta maneira os modelos viscoelásticos são compostos por diferentes partes, molas e amortecedores:

Molas: segundo a Lei de Hooke, a deformação é proporcional à tensão aplicada:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (03)$$

Sendo E o módulo de elasticidade. Nesta lei, deformações são independentes do tempo e os elementos elásticos apresentam capacidade de armazenamento de energia.

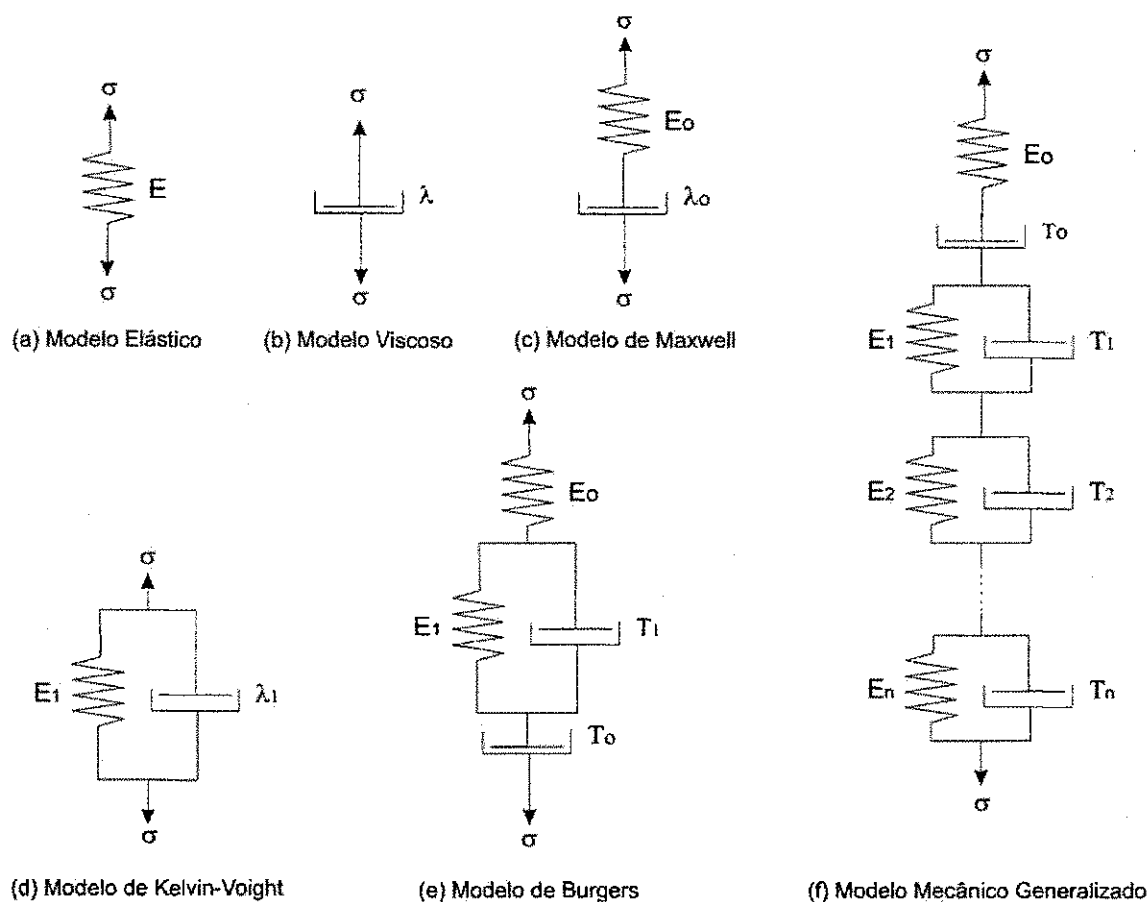
Amortecedor: a resposta do amortecedor é função direta da velocidade e descrita por:

$$\sigma = \mu \dot{\varepsilon} \quad (04)$$

Sendo  $\mu$  a viscosidade do material.

O elemento amortecedor representa o processo de dissipação que ocorre como um resultado do movimento relativo entre as partículas. Este movimento induz atrito onde existir contato entre os elementos ou amortecimento viscoso se este for um fluido intersticial.

A viscoelasticidade é descrita por um ou mais dos dois elementos citados. Se a mola e amortecedor são montados em série, o modelo resultante é chamado de modelo de Maxwell, e é melhor para fluidos viscoelásticos. Se a mola e o amortecedor são montados em paralelo, o modelo resultante é chamado de modelo de Kelvin-Voight e é mais adequado para sólidos viscoelásticos. Estes modelos são elementares e podem ser combinados para obter mais modelos representativos como o modelo de Burgers. Este método pode descrever alguns aspectos do comportamento físico, mas eles ainda têm as suas próprias limitações. Na Figura 2.5 são apresentados aspectos destes modelos.



**Figura 2.5 – Modelos Mecânicos para Materiais Viscoelásticos (Huang, 1993).**

### 2.3 Sistemas de Camadas

Pode-se considerar o pavimento como sendo uma estrutura constituída por camadas, cujo comportamento pode ser avaliado pelos métodos antes mencionados. Dentre os métodos mais utilizados, pode-se destacar a teoria das camadas elásticas, embora, segundo Ullidtz (1987), o módulo de elasticidade do solo e camadas do pavimento não são constantes e que variam em função de diferentes fatores, tais como o nível de deformação, umidade e temperatura. Por outro lado, o pressuposto de que os materiais constituintes das camadas do pavimento e do subleito são lineares não remetem às condições reais. Dependendo do nível de deformação e tensões, a resposta física do solo e das camadas do pavimento pode ser classificada como elástica, plástica, viscosa, e viscoplástica. Portanto, a modelagem do pavimento e do subleito, usando apenas a teoria da elasticidade, pode resultar em previsões equivocadas. Este problema pode ser resolvido admitindo o comportamento elástico não-linear e utilizando diferentes técnicas para lidar com a não-linearidade.

### 2.3.1 Teorias das Camadas Elásticas

Em 1885, o cientista francês Joseph Boussinesq, publicou o trabalho "Application des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques", desenvolvendo um sistema de equações para o cálculo das tensões e deformações, assumindo as seguintes hipóteses: que o material é homogêneo, isotrópico, semi-infinito e de comportamento elástico-linear obedecendo à Lei de Hooke, para a aplicação de uma carga pontual agindo perpendicularmente na superfície do maciço. Em seguida, as equações foram estendidas para outros tipos de carregamento pelo próprio Boussinesq.

A teoria das camadas elásticas foi um método inicialmente proposto por Burmister (1945), como um esforço para resolver as limitações do método de Boussinesq. Burmister (1945) simplificou as condições entre duas camadas supondo que todas as camadas são isotrópicas, elásticas, e homogêneas. A camada superior, em um sistema de duas camadas, foi assumida como infinita em extensão, na direção horizontal, mas finita em espessura no sentido vertical. A camada inferior, em um sistema de duas camadas, foi assumida como sendo de extensão infinita tanto no sentido horizontal como vertical.

Além disso, Burmister (1945) presume que as tensões e deformações normais fora dos limites da superfície carregada são iguais a zero. A continuidade das condições ao longo da interface entre as camadas foram consideradas usando dois casos. No primeiro caso, a plena continuidade de deformações e de deslocamentos em toda a interface foi considerada assumindo pleno contato entre as duas camadas e possuindo resistência ao cisalhamento total. No segundo caso, a continuidade normal das tensões e deslocamentos normais só foi considerada assumindo uma interface sem atrito entre as camadas.

Segundo Huang (1993), o método de Burmister dá resultados mais precisos do que o método de Boussinesq, desde que a condição do espaço semi-infinito não seja aplicável às camadas do pavimento e subleito, porque a camada superior possui uma profundidade finita. Por outro lado, o método de Burmister enfatiza a importância da modelagem da interface entre as duas camadas. O método de Boussinesq superestima as tensões verticais na interface em mais de 20% em comparação com o método de Burmister.

O comportamento real do pavimento e as condições de contorno são diferentes do comportamento retratado na teoria de camadas múltiplas. Os materiais do pavimento ocupam uma largura finita e não têm uma espessura constante. As variações espaciais da geometria do

material e discontinuidades locais não são consideradas quando se utiliza este método. Além disso, idealizar a mistura betuminosa e o solo como materiais homogêneos, elástico-lineares e isotrópicos está longe de ser o real comportamento desses materiais. O asfalto tem um comportamento viscoelástico, enquanto materiais granulares têm um comportamento predominantemente não-linear. Por outro lado, tensões na seção do pavimento não são consideradas na teoria das camadas múltiplas.

Segundo Huang (1993), tensões horizontais gerada pela roda de carga equivalente e às cargas dinâmicas devido ao tráfego devem ser consideradas para simular corretamente a não-linearidade e viscoelasticidade das respostas. A anisotropia dos materiais do pavimento devido aos métodos de construção e à natureza dos materiais é inevitável e deve ser considerada para determinar as mudanças de tensão em todas as direções dentro da seção do pavimento.

Burmister estendeu a sua teoria para sistemas de três camadas ao derivar unicamente a equação do recalque da superfície do terreno. Segundo Huang (1993), baseados na teoria de Burmister, Acum e Fox derivaram uma solução de forma fechada para a interface das tensões abaixo do centro circular da área carregada. Em 1962, Schiffman desenvolveu uma solução para sistemas de multicamadas elásticas, que foi utilizado por muitos pesquisadores para desenvolver os programas de computador para análise do comportamento do pavimento.

#### **2.4 Programas de Multicamadas Elásticas**

A maioria dos programas que modelam o comportamento das camadas constituintes do pavimento utiliza a Teoria Geral das Tensões e Deslocamentos proposta por Burmister, cujas hipóteses consideradas em sua formulação, para uma carga circular, além da teoria da elasticidade, foram:

- Cada uma das duas camadas consiste em um sólido homogêneo, isotrópico, linearmente elástico, obedecendo a Lei de Hooke;
- O topo da camada tem peso desprezível e espessura finita, e a segunda camada pode tender ao infinito no plano vertical. Ambas as camadas são assumidas como sendo infinitas no plano horizontal;

- A camada superficial tem peso desprezível e espessura finita. A segunda camada pode tender ao infinito no plano vertical, e ambas são assumidas como sendo infinitas no plano horizontal.

Além disso, as condições de fronteira do sistema são:

- a) A superfície do fundo da camada está livre de tensões normais e cisalhantes fora dos limites da área carregada;
- b) Tensões e deslocamentos no fundo da camada desaparecem com o aumento da profundidade.

As condições de continuidade do sistema são:

- a) Existe um total contato entre o fundo da camada superior e o suporte da fundação;
- b) Tensões normais e cisalhantes, bem como os deslocamentos verticais e horizontais são contínuos de um lado para o outro da interface entre as duas camadas; às vezes as tensões radiais horizontais em qualquer lado da interface podem, em geral, ser desiguais. Isso muitas vezes é referido como sendo uma condição de atrito total entre as camadas.

Com relação às condições de interfaces são assumidas as seguintes condições:

- a) O sistema de duas ou três camadas tem total continuidade de tensões e deslocamentos entre as interfaces das duas camadas com atrito entre elas;
- b) O sistema de duas ou três camadas estão continuamente em contato e sem atrito entre as duas interfaces das camadas, e com continuidade apenas de tensões normais e deslocamentos normais.

Na atualidade existem inúmeros programas computacionais que fazem este tipo de análise estrutural permitindo uma grande acurácia na definição do estado tensional em sistema de camadas elásticas.

Cavalcante (2005) destaca que a sua aplicação exige o conhecimento de parâmetros elásticos dos materiais que compõem as camadas dos pavimentos, que são determinadas em campo ou laboratório, aplicando-se técnicas específicas, como por exemplo, ensaios dinâmicos, ensaios estáticos, retroanálise de bacias de deformação, etc.

Fala-se ainda que tais modelos fundamentam-se na teoria elástica apropriada, fazendo uso de métodos indiretos para a solução de equações de equilíbrio e compatibilidade entre tensões e deformações, e geralmente são aplicados métodos numéricos de diferenças finitas ou elementos finitos.

#### **2.4.1 Programas de Análise Tensão/Deformação**

Alguns dos programas de análise de tensões e deformações mais utilizados no Brasil serão descritos a seguir, conforme Darous (2003).

##### **a) ELSYM 5**

Conforme destaca Cavalcante (2005), o ELSYM5 foi desenvolvido segundo a formulação matemática da teoria da elasticidade desenvolvida por Burmister de meios semi-finitos estratificados. Utiliza modelagem elástico-linear (módulo de resiliência constante) e o procedimento de cálculo é o do método das diferenças finitas. O programa ELSYM5 foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley, Califórnia, EUA. A linguagem científica utilizada foi o FORTRAN, uma das primeiras linguagens aplicadas em programas para dimensionamento de pavimentos. Foi elaborado, inicialmente, na década de 1970, para computadores de grande porte.

Ainda segundo Cavalcante (2005): "Conforme mencionado, se fundamenta nos modelos teóricos generalizados em 1943 por Burmister, possibilitando o cálculo de estruturas flexíveis e semi-rígidas de até cinco camadas superpostas e permite o cálculo das tensões, deslocamentos e deformações para um sistema tridimensional de camadas elásticas". O autor afirma ainda que o



programa fornece as tensões horizontais, verticais e de cisalhamento máximo, assim como as tensões principais em qualquer ponto do sistema. As camadas são consideradas horizontalmente infinitas, possuindo espessuras uniformes e finitas com exceção da última que possui espessura infinita. Os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson são constantes. As possibilidades relativas às configurações de carregamento estabelecem como limite até dez cargas de rodas simples, cuja aplicação é distribuída uniformemente sobre uma área circular na superfície do sistema.

O programa utiliza as coordenadas retangulares cartesianas XYZ, sendo a parte superior do sistema o plano XY com  $Z = 0$ , local onde são aplicadas as cargas. O eixo Z se estende verticalmente da superfície do sistema (plano XY) para baixo. As camadas são numeradas a partir do revestimento. O programa possibilita, ao se conhecer dois itens entre os seguintes: (i) cargas em kgf; (ii) tensão em kgf/cm<sup>2</sup> e (iii) raio da área carregada em cm, o cálculo do terceiro.

Os dados de entrada do ELSYM5 são:

- Com relação às cargas: quantidade, valor, coordenadas (x,y) e pressão dos pneus;
- Com relação às camadas e seus materiais constituintes: quantidade, espessuras, coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade;
- Com relação aos pontos de análise: coordenadas (x,y) e profundidade z.

Os dados de saída do programa se constituem, para cada ponto solicitado de análise, nos seguintes elementos ocorrentes para o carregamento considerado:

- Tensões normais;
- Tensões cisalhantes;
- Tensões principais atuantes;
- Deslocamentos normais;
- Deformações normais;
- Deformações cisalhantes, e
- Deformações principais.

**b) FEPAVE 2**

O programa computacional FEPAVE (Finite Element Analysis of Pavement Structures), segundo Cavalcante (2005), permite a avaliação de estruturas de pavimento com camadas múltiplas, segundo a formulação matemática advinda da teoria da elasticidade, direcionada para pavimentos de meios semi-infinitos e estratificados de até 12 camadas. Utiliza modelagem elástico-não linear (módulo de resiliência variável) e o procedimento de cálculo é o do método dos elementos finitos (meio contínuo dividido em elementos fictícios de dimensões finitas, ligados entre si por pontos nodais que se assimilam às articulações sem atrito).

Segundo Medina (1997), o Método de Elementos Finitos possui interesse maior nos problemas de elasticidade não linear. Por esta razão foi decisivo o uso do FEPAVE na análise estrutural de pavimentos flexíveis que possuem espessas camadas granulares (bases de brita graduada, solo-brita, sub-bases arenosas, etc.) em que a consideração da não linearidade é essencial.

A determinação do módulo de resiliência, que é dependente das tensões, faz-se experimentalmente em ensaios triaxiais de cargas repetidas. As camadas de pedra britada, areias e argilas arenosas, de modo geral, possuem módulos muito dependentes do estado de tensões. Mas, para alguns materiais, considera-se o módulo constante ou não dependente do estado de tensões: concreto betuminoso (depende da temperatura), solo-cimento, solo-cal, e alguns solos siltsosos de módulos baixos e argilosos lateríticos resistentes de forte cimentação (MEDINA, 1997).

Motta (1991) implementou modificações no sistema de forma a permitir seu uso em microcomputadores. O FEPAVE até então rodava unicamente em computadores de grande porte. Através do programa são obtidas as tensões e as deformações ocorrentes no pavimento submetido a carregamento repetido, sendo então, em muitos casos analisados, os valores das deflexões obtidas, bastante próximos dos valores das deflexões medidas em campo. Desta forma é que o programa apresenta resultados muito confiáveis na interpretação do desempenho estrutural de pavimentos reais.

Motta (1991) adaptou o FEPAVE à consideração da confiabilidade pelo tratamento probabilístico de Rosenblueth (1975, 1981). Trata-se de calcular a média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de assimetria de uma variável dependente a partir dos valores destes mesmos parâmetros das variáveis independentes aleatórias, sem ser necessário conhecer as distribuições

de probabilidade. Para estudo da confiabilidade estatística foi desenvolvido o programa CONF2, ficando o FEPAVE como uma sub-rotina, de modo a mexer o menos possível na sua estrutura.

Segundo Motta (1991), a confiabilidade é definida como: "a probabilidade que um componente, um equipamento ou um sistema tem de desempenhar satisfatoriamente a função para a qual foi desenvolvido sob dadas circunstâncias, tais como: condições ambientais, limitações de operação, frequência de operação e manutenção, para um período de tempo especificado".

Silva (1995) apud CAVALCANTE (2005) introduziu aprimoramentos no programa, traduzidos pelo utilitário UTILFEP, que facilitou significativamente a utilização do FEPAVE. O UTILFEP permite a entrada rápida dos dados de projeto relativos às cargas, materiais e configurações estruturais, tornando mais célere sua utilização.

### c) **PAVE 2000**

Acerca deste programa, Cavalcante (2005) destaca que permite a avaliação de estruturas de pavimento com camadas múltiplas, segundo a formulação matemática advinda da teoria da elasticidade, voltada para meios estratificados e semi-infinitos. Utiliza modelagem elástico-linear (módulo de resiliência constante).

PAVE 2000 foi desenvolvido por Franco (2000) e se constitui em um sistema completo de dimensionamento, parte dele elaborado na linguagem de programação visual C++. Esta linguagem permite janelas e comandos usuais e simples, sem prejuízo da agilidade e velocidade dos cálculos a serem executados.

O programa PAVE 2000 foi baseado no programa AYMA. O programa calcula, para uma determinada estrutura de pavimento, a distribuição de tensões e deformações ao longo do período de análise, considerando os efeitos da variação climática, e estima a vida de fadiga das camadas asfálticas e/ ou cimentadas, a deformação permanente das camadas da estrutura e verifica a condição de tensão ou deformação limite do subleito. O programa também permite que sejam realizadas análises de confiabilidade, quando selecionado o modo probabilístico a ser utilizado.

#### d) JULEA FOR WINDOWS

O JULEA, segundo Cavalcante (2005), foi desenvolvido para pavimentos flexíveis, podendo ser aplicado para sistemas de múltiplas camadas submetidos a carregamentos estáticos e/ ou dinâmicos provenientes de rodas simples ou rodas duplas de eixos simples ou eixos tandem. O comportamento Tensão - Deformação de cada camada é considerada como sendo elástico-linear. O JULEA foi desenvolvido segundo a formulação matemática advinda das teorias da elasticidade elaboradas por Boussinesq e Burmister, de meios semi-infinitos estratificados. O programa monta vários sistemas de duas camadas.

A solução destes sistemas é matemática através da resolução de matrizes, passando por uma inversão de matrizes, cuja solução pode ser obtida através de diversos processos. As sub-rotinas levam os nomes dos elaboradores das soluções, Bessel e outros. Esses processos são sempre iterativos até convergir para uma solução. Esses processos iterativos se constituem na razão pela qual o tempo de processamento do JULEA aumenta geometricamente com o número de profundidades de avaliação. O JULEA somente pode ser aplicado em pavimentos flexíveis com ausência de camadas rígidas. Apóia-se na solução de sistemas de múltiplas camadas sob área circular de atuação de carregamento com base na teoria da elasticidade. O programa foi escrito originalmente em FORTRAN (Formula Translation), uma das primeiras linguagens aplicadas em programas para dimensionamento de pavimentos. Na Figura 2.6, consta a tela do programa JULEA for Windows.

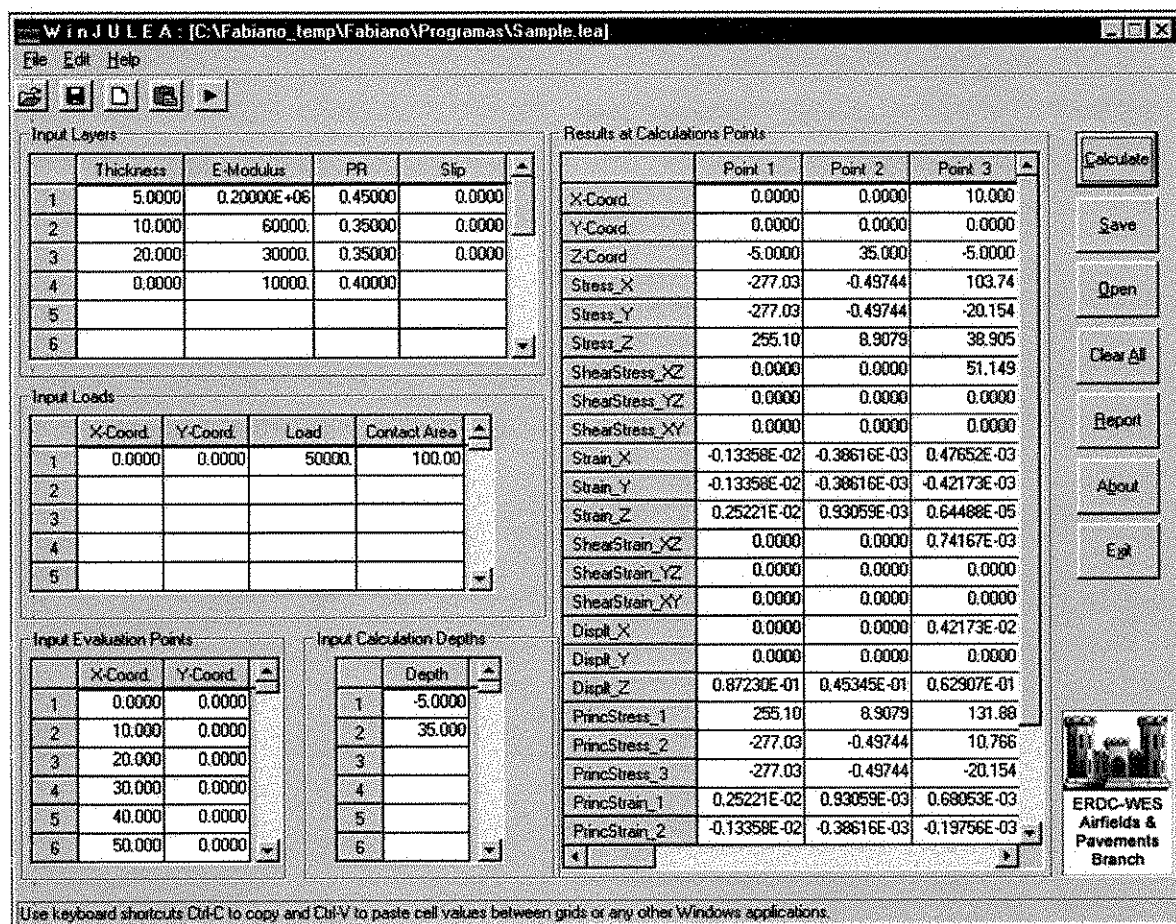


Figura 2.6 – Tela do programa JULEA for Windows (FRANCO, 2000).

### e) KENLAYER

Conforme ilustrado por Cavalcante (2005), o Kenlayer foi desenvolvido para pavimentos flexíveis, podendo ser aplicado para sistemas de múltiplas camadas submetidos a carregamentos estáticos e/ ou dinâmicos provenientes de rodas simples ou rodas duplas de eixos simples ou eixos tandem. O comportamento tensão-deformação de cada camada pode ser elástico-linear, elástico não-linear ou viscoelástico. O programa analisa danos nas camadas do pavimento, a partir da divisão do ano de serviço do mesmo em períodos (no máximo 24). Cada período guarda um grupo de propriedades diferenciadas dos materiais envolvidos, a partir das repetições de diferentes carregamentos axiais (máximo de 24).

O Kenlayer foi originalmente desenvolvido para computadores de grande porte, tendo sido, posteriormente, adaptado para microcomputadores. O Kenlayer foi desenvolvido segundo a formulação matemática da teoria da elasticidade de Burmister para meios semi-infinitos estratificados.

O Kenlayer somente pode ser aplicado em pavimentos flexíveis com ausência de camadas rígidas. Apóia-se na solução de sistemas de múltiplas camadas sob área circular de atuação de carregamento com base na teoria da elasticidade. Os danos causados ao pavimento devido à fadiga e à deformação permanente em cada período pré-estabelecido, considerando a ação dos vários grupos de carregamento, são sumarizados de forma a se analisar a vida de projeto do pavimento em estudo. O programa foi escrito em FORTRAN 77 (Formula Translation), uma das primeiras linguagens aplicadas em programas para dimensionamento de pavimentos.

Pode ser aplicado a sistemas de no máximo 19 camadas. A malha tem capacidade para 10 diferentes coordenadas radiais (x, y) e 19 coordenadas verticais (z), perfazendo um total de 190 pontos de análise. Para rodas múltiplas, além das 19 coordenadas verticais, podem ser obtidas soluções para um total de 25 pontos, especificando as coordenadas x e y de cada ponto. O modelo de deformação permanente por fluência pode ser especificado até no máximo 15 tempos de duração. A análise de danos pode ser feita dividindo-se cada ano em no máximo 24 períodos, sendo cada período com no máximo 24 grupos de carga.

## **2.5 Dimensionamento Mecanístico dos Pavimentos**

Com o subsídio dos programas de análise tensão/deformação, tornou-se possível o estudo do comportamento mecanístico da estrutura do pavimento de modo simplificado, permitindo assim realizar seu dimensionamento tendo como critério a compatibilização das tensões e deformações sofridas pelas camadas constituintes da estrutura.

Os métodos mecanísticos de dimensionamento dos pavimentos empregam a teoria da elasticidade para reger o comportamento das suas camadas constituintes. É um método mais geral que os métodos empíricos, mas exigem que os modelos constitutivos, como a relação 'tensão x deformação', dos materiais sejam conhecidos. Este comportamento é conhecido quando possuímos os valores dos módulos resilientes de cada camada.

No método mecanístico, o pavimento é projetado para apresentar, ao final da vida útil, um certo nível de trincamento e deformação permanente nas trilhas de roda. O trincamento é controlado através da limitação da tensão (ou deformação) na fibra inferior do revestimento. Já a deformação permanente nas trilhas de roda pode ser controlada de duas maneiras, ou limitando a tensão vertical máxima atuante no topo do subleito, considerada a camada mais deformável e de menor

resistência, ou limitando a deformação resultante do somatório das deformações permanentes do subleito e de cada camada, incluindo-se também a capa. No Brasil, devido à “boa qualidade” dos solos de subleito, a limitação da tensão vertical no topo do subleito não é usualmente o critério mais crítico no dimensionamento.

### **2.5.1 Previsão da Vida de Fadiga dos Pavimentos**

Quando os materiais são solicitados por cargas cíclicas, estas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce, enquanto na fase de descarregamento o dano mantém-se constante. Produzem assim falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos, porém, a mesma carga é aplicada diversas vezes (BERNUCCI et al., 2007).

Esse fenômeno é chamado fadiga e é definido como: “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos” (ASTM, 1979).

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material.

Segundo Bernucci et al. (2007), a vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ( $N_f$ ) ou vida de serviço ( $N_s$ ). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido.

O ensaio laboratorial de vida de fadiga tradicionalmente realizado no país para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada, sendo a carga aplicada numa frequência de 1Hz através de equipamento pneumático (PINTO, 1991; RODRIGUES, 1991; MEDINA, 1997).

No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo-de-prova. Esse tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de

revestimentos asfálticos mais espessos, em decorrência da predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação às camadas subjacentes (PINTO, 1991; HUANG, 1993).

No caso de ensaio sob deformação controlada, a simulação corresponde a revestimentos mais delgados, uma vez que nestes há maior contribuição das subcamadas na absorção das tensões solicitantes. Nesse ensaio, a deformação é mantida constante enquanto a tensão inicial no corpo-de-prova diminui até o fim do ensaio. Alguns autores admitem que o limite de ruptura corresponde à redução em 50% do módulo de rigidez à flexão inicial da mistura (BERNUCCI et. al., 2007).

Afirmam ainda Bernucci et al. (2007) que “no método mecânico de dimensionamento de pavimentos usado no Brasil, a diferença entre tensão máxima de compressão e de tração na fibra inferior do revestimento ( $\Delta\sigma$ ) é considerada o principal fator desencadeador do trincamento por fadiga do revestimento em campo, quando se trata de utilizar como critério resultados de laboratório obtidos com ensaios à tensão controlada em compressão diametral. As tensões calculadas servem de entrada de dados nas curvas de fadiga geradas a partir do número de golpes de carga até a ruptura para diversos níveis de  $\Delta\sigma$ . Relaciona-se então o número  $N$  determinado a partir do tráfego previsto com o número de golpes em laboratório por um fator laboratório-campo FLC”.

Vários são os modelos básicos que relacionam tensões ou deformações de tração que ocorrem nos pontos críticos do pavimento concebido. Seguem abaixo alguns modelos segundo Pinto (1991), considerados mais representativos da condição brasileira:

$$N'_f = 9,07 \times 10^{-9} \left(\frac{1}{\sigma_f}\right)^{2,65} \left(\frac{1}{Mr}\right)^{-0,033} \quad (05)$$

$$N_f = f'_0 N'_f \quad (06)$$

$$N_L = 5,63 \times 10^5 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,61} \quad (07)$$

$$N_C = f_0 N_L \quad (08)$$



Sendo:

$N'_f$  – Número equivalente de solicitações da carga de eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada de concreto asfáltico;

$\epsilon_t$  – máxima deformação específica horizontal de tração na face inferior da camada betuminosa, cm/cm;

MR – módulo de resiliência do concreto betuminoso;

$f'_0$  – fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a:  $f'_0 = 10^5$ ;

$N_f$  – Número equivalente de solicitações da carga de eixo padrão rodoviário, considerado como terminal no que tange ao trincamento por fadiga da camada de concreto asfáltico para uma área afetada da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento;

$N_L$  – número de repetições de cargas necessários à ruptura completa da mistura betuminosa no laboratório, no ensaio de compressão diametral à tensão controlada – Vida de Fadiga;

$\Delta\sigma$  - diferença algébrica entre as tensões horizontal (de tração) e vertical (de compressão) no centro da amostra;

$f_0$  – Fator laboratório-campo definido nos estudos de Pinto, tomado igual a:  $f_0 = 10^4$ ;

$N_c$  – número terminal de solicitações do eixo padrão rodoviário, para uma área afetada por trincas de fadiga da ordem de 20% da área total do respectivo revestimento.

Pinto (1991) mostrou diferenças importantes entre FLC para ensaios à flexão e à compressão diametral, em função da porcentagem de área trincada que se admite ao final da vida do pavimento, e ainda questões ligadas ao tempo de aplicação da carga e à frequência.

## 2.5.2 DANOS POR DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, podendo ser atribuída ao revestimento ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos. As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes, principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Esses problemas podem ser evitados com uma seleção dos materiais, compactação adequada, e um bom projeto estrutural, de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros.

A deformação permanente em misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo do material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano neste material, representado pela formação e propagação de trincas. A capacidade de uma mistura de resistir a esse tipo de deformação

depende de diversos fatores, entre os quais, a consistência do ligante e a volumetria da mistura (agregados e ligantes).

Os modelos desenvolvidos por pesquisadores nacionais e internacionais foram formulados para condições especiais de materiais e níveis de tensões consideradas. Por outro lado, é de conhecimento dos projetistas que a obtenção de dados para a investigação de equações específicas é dificultada pela demora na realização dos ensaios devido ao número de variáveis a serem consideradas e avaliadas.

A previsão da deformação permanente de forma indireta pode ser considerada através de tensões verticais e deformações causadas pelas cargas aplicadas nos pavimentos.

Segundo Pinto (1991), a limitação da tensão vertical no topo do subleito é um critério bastante utilizado devido ser a camada de menor resistência ao cisalhamento e, portanto, com aptidão para plastificação. Heukelom e Klomp (1962) indicam para pavimentos dimensionados pelo método do DNER, o modelo abaixo:

$$(\sigma_v)_{adm} = \frac{0,006M_{SUB}}{1,0,7 \log^N} \quad (09)$$

Sendo:

$(\sigma_v)_{adm}$  - tensão vertical admissível no topo do subleito, Mpa;

$M_{sub}$  - módulo de resiliência do subleito, MPa;

N - número de repetições de carga.

## 2.6 Métodos de Avaliação Estrutural Através de Ensaios Não-Destrutivos

Segundo Macêdo (1996), os ensaios não-destrutivos são mais vantajosos que os demais para avaliar o comportamento das camadas que constituem o pavimento, pois provocam interrupções menores no tráfego que os ensaios destrutivos, fornecendo assim, maior flexibilidade para avaliação quantitativa da condição estrutural do pavimento em qualquer estágio de sua vida de serviço, além de possibilitar o retorno no mesmo ponto de cada avaliação.

Aquele autor afirma ainda que a vantagem dos ensaios não destrutivos residem no fato que as medições são realmente in-situ, conseqüentemente, "medem a resposta real do pavimento ao carregamento aplicado, sem submeter os materiais aos distúrbios causados pela retirada de

amostras e dispensando a preparação de corpos-de-prova que reproduzam as características do material na estrutura real do pavimento”.

### 2.6.1 Medições de Deflexão In Situ

Dentre os ensaios não-destrutivos disponíveis, destaca-se a determinação da deflexão “in situ”. Muitos sistemas estão disponíveis para medir deflexões de pavimentos que fornecem os dados necessários para retroanalisar o módulo resiliente, a resposta da fundação (k ou CBR), e o grau de transferência de carga. Os sistemas de medição de deflexão mais populares são a Viga Benkelman e o Falling Weight Deflectometer (FWD).

#### 2.6.1.1 Equipamentos de Carregamento Quase-Estático

##### a) Ensaio de Placa

Segundo Albernaz (1997), o ensaio de placa foi um dos primeiros métodos para medir a variação das deformações recuperáveis dos maciços de terra em função da variação das cargas aplicadas, resultando desta aplicação os módulos de elasticidade dos materiais. Não sendo muito utilizado por demandar muito tempo para a sua realização.

O ensaio de placa é normalizado pela AASHTO T222-81 e pela ASTM D1196-77 conforme apresentado em esquema na Figura 2.7.

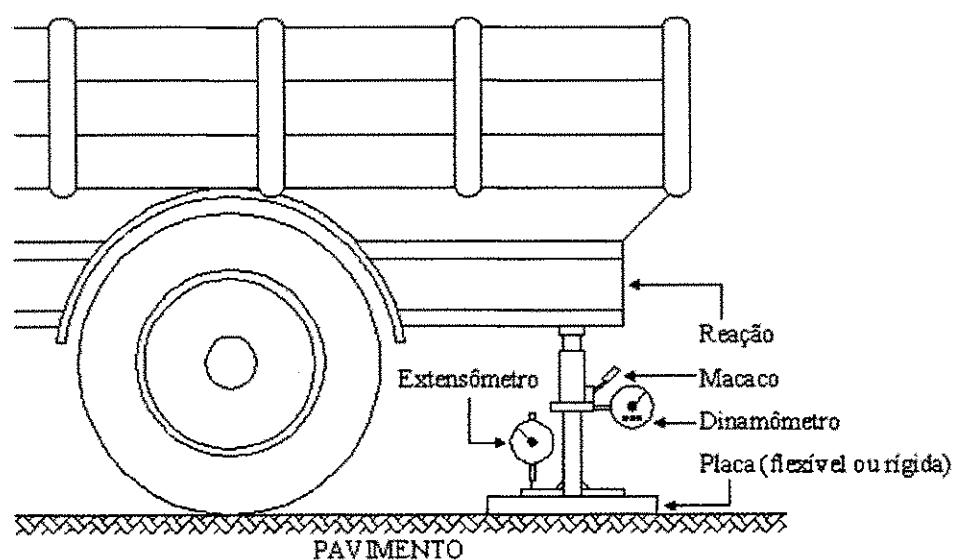


Figura 2.7 – Esquema do ensaio de placa (NÓBREGA, 2003).

**b) Viga Benkelman**

Como afirma Carneiro (1966), a viga Benkelman foi inicialmente proposta por A. C. Benkelman, com o intuito de minimizar os custos das avaliações de pavimentos que vinham sendo feitas através dos ensaios de placa. Já no Brasil, afirma Medina (1997), que os pioneiros foram os engenheiros Nestor Aratangy, do DER de São Paulo, e Francisco Bolívar Lobo Carneiro.

Por se tratar de um equipamento de fácil manuseio e ser largamente difundido no mundo, o Brasil emprega a viga Benkelman desde a década de 1960, na busca de se determinar as condições estruturais do pavimento. A princípio, os levantamentos deflectométricos baseavam-se exclusivamente na deflexão máxima. Porém, com o avanço dos estudos e técnicas de avaliação, constatou-se que apenas a deflexão máxima não seria suficiente para a caracterização das condições estruturais do pavimento, sendo necessária a determinação de outras leituras para a mesma estação, que permitissem determinar o raio da bacia de deformação elástica (ROCHA FILHO e RODRIGUES, 1996).

A viga Benkelman é composta de uma haste metálica articulada e apóia-se em um suporte constituído de três pés, sendo a viga móvel acoplada a esta por meio de uma articulação. Para a realização do ensaio, uma das extremidades, a ponta de prova, deve ficar inserida entre as rodas do semi-eixo de um caminhão com 8,2t no eixo simples de roda dupla traseiro, conforme ilustrado na Figura 2.8.

A outra extremidade aciona um extensômetro com precisão de milímetros. A viga apresenta uma relação conhecida entre os comprimentos da ponta de prova à articulação (a) e desta ao ponto de posicionamento do extensômetro (b), que geralmente obedecem à relações 2/1, 3/1 ou 4/1 (DNER, 1994d; ROCHA FILHO e RODRIGUES, 1996; ALBERNAZ, 1997 ).

O ensaio realizado com a viga Benkelman é normatizado pela AASHTO T256-77 e pela ASTM D4695-87. No Brasil é normatizado através do método de ensaio DNER-ME 024/94 (DNER, 1994) e pelo DNER-ME 061/94 (DNER, 1994a).



**Figura 2.8 – Ilustração do ensaio realizado com a viga Benkelman (MOTTA e MEDINA, 2003).**

### **c) Viga Benkelman Automatizada**

A viga de deflexão automatizada tem o mesmo fundamento da viga Benkelman, e foi desenvolvida para aperfeiçoar a captação das medidas de deflexão. Essas vigas são montadas sob um veículo teste sendo medidas as deflexões e gravadas automaticamente em cada ponto de teste, enquanto o caminhão está em movimento (PINTO e PREUSSLER, 2002).

A SOLOTEST e a SIGEO foram as empresas a desenvolverem os Deflectógrafos Digitais que, através de LVDT (linear variable differential transformer), permitem o levantamento completo da bacia deflectométrica em uma única operação, registrando automaticamente os deslocamentos verticais recuperáveis a cada 5cm e a temperatura da superfície do pavimento, conforme ilustrado na Figura 2.9 (CERATTI, 1997).

Ceratti (1997) elenca as principais vantagens deste equipamento:

- Uma maior sensibilidade nas medidas efetuadas devido à utilização de um sensor do tipo LVDT, com resolução de 0,001 mm;

- Permite a medição automática da linha de influência longitudinal da bacia de deflexão;
- Registro e arquivamento das medidas e deslocamentos da carga aplicada automaticamente;
- Medida de temperatura da superfície do pavimento de forma automática;
- O deflectógrafo digital pode ser facilmente verificado de maneira semelhante à da calibração da viga Benkelmen.



**Figura 2.9 – Ilustração do Deflectógrafo Digital.**

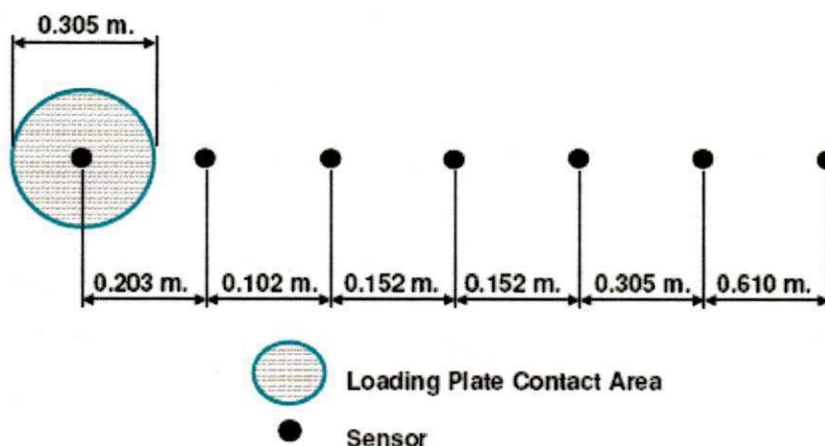
### **2.6.1.2 Equipamento de Carregamento Por Impulso**

#### **a) FWD**

Segundo Pinto e Preussler (2002), todos os equipamentos que utilizam o modo de carregamento dinâmico de impacto (impulso) estão incluídos nesta classificação e são chamados de FWD – “Falling Weight Deflectometer” ou deflectômetros de impacto.



Esse sistema foi apresentado pela primeira vez há 30 anos, na França, para testar os pavimentos flexíveis (ULLIDTZ, 1987). Segundo Rocha Filho e Rodrigues (1996), neste sistema, cargas de impacto são aplicadas a uma placa de carga, e em seguida a deflexão vertical da superfície do pavimento é medida em locais diferentes, usando-se geofones, conforme mostrado na Figura 2.10.



**Figura 2.10 – Localização dos geofones em relação a placa de teste.**

Segundo Macêdo (1996), nesses equipamentos o impacto é caracterizado principalmente pelo tempo de impulso, ou seja, pelo intervalo de tempo que o pulso de carga irá levar do repouso ao valor de pico da carga aplicada e retornar à posição inicial de repouso.

Macêdo (1996) afirma ainda que esses equipamentos permitem variações na magnitude do carregamento aplicado ao pavimento em função da modificação da altura de queda e/ou pela alteração da configuração do conjunto de massas utilizado. Podem, assim, simular os efeitos de diferentes configurações de eixos, rodoviários ou de aeroportos, conforme mostrado nas Figuras 2.11 e 2.12.



Figura 2.11 – Ilustração do FWD Dynatest 8000E.

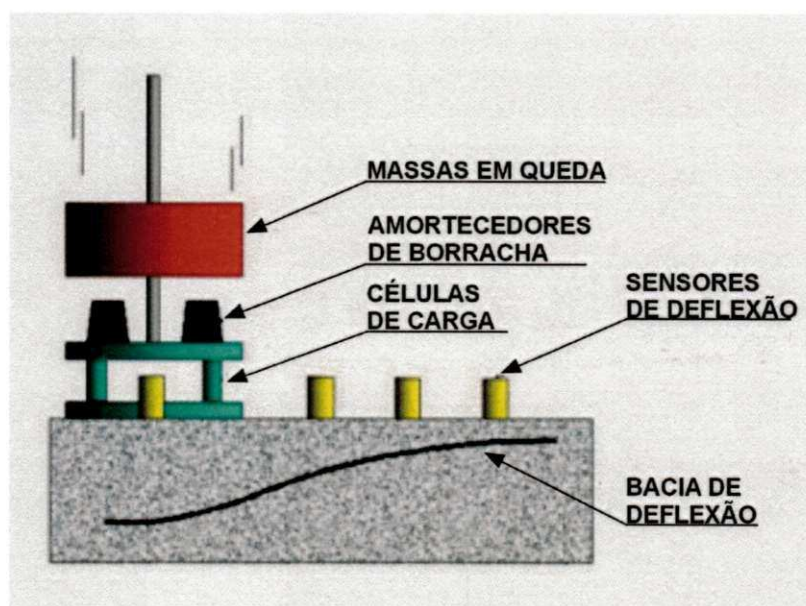


Figura 2.12 – Princípio de Funcionamento do FWD.

A força de pico aplicada pode ser obtida igualando-se a energia potencial da massa antes de sua queda, ao trabalho desenvolvido pelos amortecedores de borracha, depois da queda. Desta forma, pode-se obter a força de pico exercida no pavimento através da equação abaixo:

$$F = \sqrt{2Mghk}$$

(10)

Onde:



F – força de pico

M – massa do peso que cai

g – aceleração da gravidade

h – altura de queda

k – constante de mola do sistema de amortecedores

Segundo Cardoso (1995), a transmissão do carregamento ao pavimento se dá através de uma placa de 30cm de diâmetro e é medida por célula de carga, onde a duração da carga varia de 25 a 30 ms (milissegundos), tempo esse que corresponde a passagem de um veículo com velocidade de 60 a 80 km/h. Acredita-se que o FWD simula melhor o efeito do carregamento em relação aos outros métodos não destrutivos, por simular o movimento real das cargas de roda (Hoffman, 1983). No Brasil, os ensaios com os equipamentos tipo Falling Weight Deflectometer são normatizados pelo procedimento DNER PRO-273/96 (DNER, 1996).

É importante distinguir o nível de carga nominal do nível de carga real, ou seja, o nível de carga nominal é obtido com o uso da equação (5), enquanto que o nível de carga real é medido pela célula de carga, em função da massa, da altura de queda e também da rigidez e temperatura do pavimento (RICCI et al., 1985 apud MACÊDO, 1996).

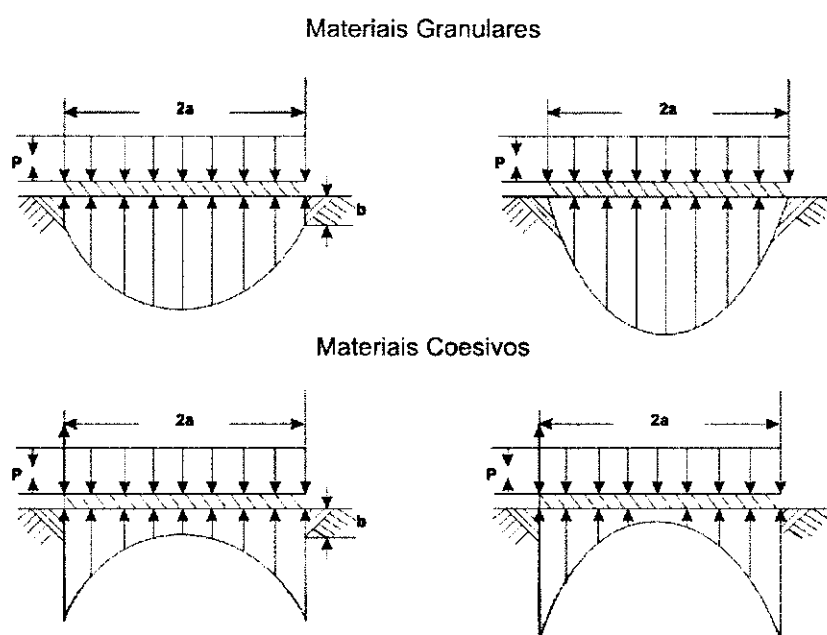
As respostas do pavimento são medidas utilizando uma bacia de deflexões que podem ser criadas através da medição das respostas usando os sensores distribuídos uniforme ou não-uniformemente. Bacias mais representativas podem ser criadas ao acionar mais sensores ao redor do ponto onde o impulso da força é aplicada.

A grandeza e a forma da bacia de deflexão são dependentes da espessura das camadas, do coeficiente de Poisson, módulos das camadas, a relação entre os módulos dos materiais constituintes do pavimento, e da profundidade para a camada rígida (BENDANA et Al., 1994, apud CAVALCANTE, 2005). Geofones próximos ao ponto onde a força é aplicada (interior geofones) são usados para medir a resposta do conjunto das camadas do pavimento. Geofones distanciados do ponto onde o impulso é aplicado (exterior geofones) são usados para medir a resposta das camadas mais profundas.

O módulo de elasticidade determinado a partir da retroanálise é muito sensível às deflexões medidas em campo. A calibração de pequenos erros na deformação da ordem de  $1\mu\text{m}$ - $2\mu\text{m}$  irá

afetar significativamente no módulo de elasticidade (BENDANA et al., 1994, apud CAVALCANTE, 2005).

A distribuição de tensões não é uniforme em pavimentos e é controlada por muitos fatores, tais como o material do subleito, a compactação, o material das camadas constituintes do pavimento, teor de umidade e temperatura. A distribuição de tensões abaixo do pavimento pode ser determinada pela medição das deflexões do pavimento em diferentes distâncias do centro de uma carga aplicada. A distribuição de tensões nos pavimentos é apresentada na Figura 2.13 (HUANG, 1993) onde a distribuição do carregamento aplicado é mostrada como  $p$ , enquanto o diâmetro do carregamento é  $2a$ .



**Figura 2.13 – Distribuição real do carregamento no pavimento (HUANG, 1993).**

Na placa da carga de teste, se a distância do centro da placa circular é maior do que duas vezes o raio da placa, então, praticamente, a carga distribuída pode ser tratado como um ponto de carga e, conseqüentemente, a teoria de Boussinesq pode ser usada para se estimar o módulo de elasticidade baseado nas deflexões superficiais, como descrito na equação a seguir, onde  $d(r, 0)$  é a deflexão da superfície à distância  $r$  do centro da carga.

$$E = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi d(r,0)} \quad (11)$$

Se o módulo de elasticidade do subleito não é idêntico para diferentes distâncias da carga aplicada, então a hipótese de que o subleito é um semi-espaço elástico linear não é válida, sendo que ou o subleito é elástico não-linear ou é constituído por diferentes camadas (Huang, 1993). Outra razão para a não-linearidade pode ser a presença de uma camada rígida com alguma profundidade. A teoria da elasticidade sugere que a deflexão em uma mesma profundidade da carga aplicada é quase idêntica à deflexão da superfície (HUANG, 1993).

No entanto, Bodare e Orrje (1985, apud Huang, 1993) indicaram que a diferença entre o módulo teórico dinâmico do FWD e o módulo teórico estático para um semi-espaço homogêneo é mínima quando o tempo de pico de carga é relativamente longo.

#### **b) FWD KUAB**

O FWD KUAB é um equipamento de fabricação sueca e utiliza um princípio de operação semelhante ao FWD da Dynatest. Esse equipamento possui a vantagem de utilizar um sistema de geração de carga de duas massas, sendo uma principal e outra intermediária. Esta configuração faz com que o pulso de carga seja mais suave e semelhante ao pulso de carga aplicado ao pavimento pelas cargas transientes.

O equipamento utiliza um modelo de placa segmentada, que possibilita melhor uniformização na distribuição do carregamento aplicado pela placa de carga. As deflexões são obtidas através de sete acelerômetros (podendo ser instalados até nove), onde um deles é instalado na placa de carga e os restantes dispostos em distâncias variáveis numa barra de 1,80 m de comprimento (ROCHA FILHO e RODRIGUES, 1996; MACÊDO, 1996).

### **2.7 Considerações gerais sobre retroanálise do comportamento mecânico da estrutura do pavimento**

De acordo com Cavalcante (2005), a retroanálise de módulos de resiliência não representa uma solução fechada, pois os módulos são obtidos por processos, onde se busca o melhor ajuste entre as bacias medidas e calculadas dentro de um erro pré-estabelecido. Com isso, pode-se chegar a várias bacias com ajustes dentro do estabelecido, onde o conjunto de módulos obtidos represente uma resposta do problema, porém, cabe ao projetista, com base em sua experiência, estabelecer

qual o conjunto de módulos é compatível com as características elásticas dos materiais ensaiados.

Segundo Albernaz (1997), a retroanálise é de extrema importância para a avaliação estrutural de pavimentos, pelos seguintes aspectos:

- Permite a avaliação estrutural comparativa entre trechos de uma mesma rodovia ou de rodovias diferentes;
- Fornece dados para projetos de drenagem, indicando a presença de possíveis camadas rígidas no subleito;
- Proporciona a elaboração de projetos mais racionais, que se convertem em pavimento mais duráveis e de custo mais baixo;
- A obtenção dos módulos de resiliência dos materiais na condição em que se encontram no campo.

Conforme relatam ALBERNAZ et al. (1997) e PREUSSLER et al. (2000) a retroanálise dos módulos de resiliência de um pavimento apresenta algumas vantagens em relação a outros processos de avaliação, as quais são descritas a seguir:

- Eliminação ou minoração da necessidade de ensaios destrutivos para a coleta de amostras do pavimento e subleito;
- Representação do estado real da estrutura;
- Estimativas dos módulos resilientes dos materiais nas condições reais de campo;
- Rapidez e acurácia na obtenção das propriedades elásticas das camadas do pavimento;
- Redução de gastos.

Ressalta-se que essas análises constituem apenas uma aproximação do comportamento real, pois sabe-se que a maioria dos materiais aplicados em pavimentação pode apresentar deformações viscosas, visco-elásticas e/ou plásticas, sob tensões, em adição às deformações elásticas. Além disso, esses materiais, na maioria dos casos, são heterogêneos e particulados (PREUSSLER et al., 2000).

Segundo Medina et al. (1994), os ensaios de cargas repetidas realizados em laboratório são de fundamental importância para balizar os programas de retroanálise, utilizados com dados resultantes de ensaios não destrutivos de pavimentos.

Segundo CHEN et al. (1995) apud REZENDE (2003), a maioria dos pesquisadores concorda que o ensaio triaxial cíclico é ideal para o projeto de novos pavimentos, enquanto que os ensaios de campo e as retroanálises devem ser utilizados para a avaliação de estruturas já existentes.

A retroanálise dos módulos de resiliência dá subsídios para a avaliação estrutural, fornecendo propriedades das camadas da estrutura "in situ", onde estes parâmetros são utilizados como dados de análise na manutenção e/ou restauração das características aceitáveis do pavimento para o seu melhor desempenho ao longo de sua vida útil (MARCON e BASÍLIO, 2003).

Watson e Rajapakse (2000) apud REZENDE (2003), concordam que a resposta do pavimento a um carregamento aplicado torna-se complexa devido à heterogeneidade e aos efeitos sazonais. Entretanto, nas retroanálises realizadas para o cálculo do módulo a partir de dados do FWD, várias hipóteses devem ser adotadas para simplificar as condições de campo. O comportamento elástico linear e a homogeneidade de cada camada do pavimento são geralmente assumidos, permitindo o uso da Teoria da Elasticidade. Essas simplificações são amplamente aceitas desde que as deformações induzidas sejam infinitesimais e as deflexões muito pequenas.

Em face da grande quantidade de programas computacionais que permitiram o desenvolvimento de métodos de retroanálise automatizados e das simplificações adotadas nas análises, salienta-se que os programas computacionais são ferramentas que possuem a finalidade de aperfeiçoar a obtenção de determinados parâmetros. Porém, cabe ao engenheiro o papel fundamental diante de um problema da engenharia: aplicar a teoria correta, entender as condições de contorno do problema, analisar e interpretar os resultados dando a melhor solução que satisfaça ao binômio técnico-econômico.

### **2.7.1 Considerações acerca da Retroanálise**

Segundo Cavalcante (2005), a retroanálise pode ser entendida como sendo uma técnica utilizada para a obtenção dos módulos de resiliência do sistema pavimento-subleito, a partir das bacias de

deflexões medidas em campo, espessuras das camadas e os seus respectivos coeficientes de Poisson.

De acordo com o autor, o módulo de resiliência dos solos, britas, misturas asfálticas e cimentadas podem ser determinados de duas formas:

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

Quanto ao coeficiente de Poisson, Trichês (1985) apud MEDINA (1997), estudou a influência do coeficiente de Poisson em ensaios triaxiais com medição das deformações transversal e axial, tendo verificado que o mesmo é influenciado pelo grau de saturação, energia de compactação e o tipo de material.

Segundo o TRB (1975) apud CAVALCANTE (2005), quando não for possível obter com confiabilidade o coeficiente de Poisson, podem-se adotar os valores descritos na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 – Valores de Coeficiente de Poisson para Alguns Materiais de Pavimentação (TRB, 1975).**

<b>MATERIAIS</b>	<b>COEFICIENTE DE POISSON</b>
CBUQ	0,25 - 0,35
Subleito, Sub-base e Bases Granulares	0,25 - 0,35
Solo Cimento	0,10 - 0,25
Subleito Siltoso ou Argiloso	0,40 - 0,50

Segundo Nóbrega (2003), o coeficiente de Poisson define a relação entre as deformações específicas radiais (horizontais) e axiais (verticais) dos materiais. Sua influência nos valores das tensões e deformações calculadas é pequena, salvo no caso das deformações radiais, as quais lhe são proporcionais. Na maioria das vezes esse valor é adotado para cada material quando são usados programas de cálculo de tensões e deformações em pavimentos.

Segundo Maina et al. (2002) apud NÓBREGA (2003), na maioria dos casos de retroanálise os valores da espessura e o coeficiente de Poisson são adotados para cada camada.

No que concerne aos módulos retroanalizados, os mesmos representam a resposta elástica do pavimento e subleito ao carregamento aplicado, o qual mobiliza deslocamentos reversíveis na superfície do pavimento. A deflexão total da estrutura é o somatório da contribuição individual de cada camada constituinte do sistema pavimento-subleito.

### **2.7.2 Limitações dos Programas de Retroanálise**

Os programas de retroanálise sofrem limitações relacionadas às simplificações que foram adotadas para desenvolvê-los, que reflete, na maioria dos casos, às limitações das sub-rotinas de cálculo de tensões/deformações. Uma maneira proposta para superar essas limitações é a implementação de fatores de correção, determinado com base entre comparações dos módulos determinados em laboratório e módulos retroanalizados. No entanto, esses fatores de correções dependem do programa de retroanálise e, portanto, devem ser usados com cuidado.

Algumas das limitações observadas no processo de retroanálise realizadas em diferentes estudos estão listadas a seguir:

- a) Muitos programas são limitados pelo número e espessura das camadas utilizadas na análise do pavimento;
- b) Muitos programas assumem um comportamento elástico-linear poucos considerando o comportamento não-linear das camadas. Infelizmente, os programas que representam o comportamento dos materiais como viscoelásticos (tempo-dependente) ou elastoplásticos (inelástica) não tenham sido bem sucedidos na estimativa de resultados confiáveis e consistentes;
- c) Os módulos de resiliência das camadas não são precisamente calculados, principalmente por não se considerar muitos fatores que os afetam. Estes fatores incluem sensibilidade aos níveis de tensão, descontinuidades e anomalias, tais como variações da espessura da camada, segregação localizada, fissuras, e a consideração de que materiais semelhantes constituem uma única camada. Portanto, o módulo retroanalizado é conhecido como módulo "efetivo" ou "equivalente".
- d) A maioria dos programas utiliza retroanálise com cargas estáticas, quando o carregamento aplicado pelo FWD é uma carga dinâmica. Procedimentos padronizados para retroanálise estão disponíveis apenas no caso estático (ASTM D5858), enquanto que o caso dinâmico é mais complexo;
- e) Um grande número de iterações é necessário se o modelo é baseado nas teorias de comportamento elástico-lineares, para avaliar a não-linearidade das camadas com diferentes níveis de carga (queda diferentes alturas). Em outras palavras, a análise (cálculo das deflexões) do sistema utilizando modelos de resposta lineares é relativamente rápida, enquanto a retroanálise utilizando modelos lineares para estimar as propriedades não-lineares requerem uma quantidade relativamente grande de iterações;
- f) A convergência da solução não é garantida para muitos programas. Os módulos iniciais devem ser ajustados com base na experiência e julgamento do usuário para se chegar a um valor razoável que se encaixem ao intervalo do módulo resiliente desejado e atenda o RMS (root mean square). Isso torna o processo de retroanálise altamente dependente do usuário e não totalmente automatizado;
- g) A acurácia das propriedades retroanalizadas usando modelos elásticos varia de acordo com a profundidade. A acuracia dos resultados retroanalizados varia entre 1% e 20%, com um alto valor para a camada de revestimento e do baixo valor para a camada de subleito;



- h) A maioria dos programas é incapaz de analisar o comportamento plástico ou o movimento lateral dos materiais subjacentes da superfície. Esta limitação pode resultar em valores elevados de módulos numa retroanálise;
- i) A subdivisão da camada do subleito em mais de duas camadas pode melhorar significativamente a correspondência entre as bacias de deflexão medida e calculada, resultando em um baixo RMS (root mean square). No entanto, a maioria dos programas tem limitações quanto ao número máximo de camadas;
- j) Todos os programas de retroanálise são sensíveis à localização da camada rígida abaixo da interface subleito/sub-base. No entanto, o SHRP (Strategic Highway Research Program) recomenda (SHRP-P-655, 1993) a indicação da camada rígida a uma profundidade de 50 metros abaixo da superfície, se não houver informação disponível;
- k) O módulo resiliente retroanalizado não é único. Diferentes módulos retroanalizados podem ser obtidos para o mesmo RMS (root mean square).

### **2.7.3 Módulos resilientes de materiais granulares retroanalizados versus ensaio em laboratório**

A diferença entre os módulos resilientes retroanalizados para o subleito e o módulo resiliente medido em laboratório tem sido abordado por muitos pesquisadores.

Não existe uma única relação entre o módulo resiliente retroanalizado e o medido em laboratório. O guia da ASSHTO (1993) sugere um fator de correção onde o módulo retroanalizado seja três vezes o módulo obtido em laboratório. No entanto, a sugestão de fatores de correção é altamente dependente do programa de retroanálise e deve ser utilizado com cuidado.

Segundo Cavalcante (2005), a variação do módulo de resiliência dos materiais do subleito pode ser observada mesmo quando o subleito é composto por um único tipo de material. Essa variação pode ser observada quando o teor de umidade do material varia com a profundidade no interior da camada. Na retroanálise, como também nas sub-rotinas de cálculo de deformações, a hipótese de que a camada do subleito possui um módulo constante com a profundidade é baseada na necessidade de simplificação, já que a maioria dos programas tem limitações quanto ao número de camadas.

Outra razão para a anisotropia no material do subleito é seu melhoramento. É prática comum a compactação do material do subleito ser realizada por camadas durante a construção, com espessuras que podem ser de 10 a 20 cm, baseado no equipamento e material utilizado.

A energia de compactação aplicada para cada camada irá alterar a distribuição de tensões e, conseqüentemente, irá mudar o módulo de elasticidade em ambas as direções, resultando em um estado anisotrópico.

A teoria da elasticidade tem sido utilizada há muitos anos pelos engenheiros para analisar as respostas do pavimento sob as ações do tráfego, devido à sua simplicidade e eficácia. Além disso, os ensaios de campo e de laboratório têm fornecido dados que demonstram que a teoria da elasticidade pode fornecer resultados precisos e podem ser mais práticos do que outros métodos. A teoria da elasticidade foi ainda aplicada em programas de computador para facilitar a análise do sistema pavimento/subleito.

#### **2.7.4 Fatores que influenciam no processo de retroanálise**

Segundo Preussler et al. (2000), os principais fatores que podem influenciar nos deslocamentos medidos e nos módulos determinados são:

- Modelagem matemática;
- Não consideração da elasticidade não-linear dos materiais granulares;
- Espessuras das camadas;
- Oxidação e deterioração das camadas asfálticas;
- Natureza dos materiais constituintes da estrutura;
- Presença e profundidade de camadas rígidas;
- Ponto de aplicação e tipo de carregamento;
- Confinamento das camadas;
- Teor de umidade das camadas granulares;
- Granulometria;

A existência de vários fatores que concorrem para influenciar o processo de retroanálise de módulos de resiliência, torna o papel do engenheiro ainda mais importante, no sentido de estabelecer critérios consistentes que permitam realizar análises esclarecedoras quanto ao comportamento dos materiais e o desempenho da estrutura como um todo.

Alguns dos fatores citados anteriormente merecem algumas considerações, conforme exposto a seguir.

#### **a) Linearidade das camadas**

Geralmente, as interpretações das medidas "in situ" obtidas são baseadas na solução elástica linear, não levando em consideração a possível existência de não linearidade.

Preussler et al. (2000) ressaltaram que no processo de retroanálise pode-se verificar a não linearidade das propriedades elásticas das camadas do pavimento a partir de ensaios de FWD aplicando vários níveis de carga. Nesses casos, as relações constitutivas são importantes para a determinação da linearidade dos materiais. Desta forma, os programas mais modernos apresentam relações que levam em consideração essa não linearidade, fazendo correções dos módulos com base em equações pré-determinadas para representar melhor as condições de campo.

Segundo Chang et al. (1992) apud RESENDE (2003), foi apresentado um estudo com o objetivo de entender a influência do comportamento não linear no ensaio FWD. Foram realizados estudos analíticos tanto com a solução linear como com a não linear. Os resultados mostraram que os efeitos da não linearidade nas deflexões calculadas estão diretamente relacionados com a magnitude do carregamento, tipo de pavimento, rigidez do subleito e com a espessura do revestimento. Os autores indicaram que os efeitos da não linearidade aumentam os deslocamentos máximos em até 50% para um carregamento de 20.000 lb (90,72 kN), mas são desprezíveis para os pontos medidos em distâncias maiores ou iguais a 3 ft (0,91 m) com relação ao ponto de aplicação da carga. Nos casos de ensaios de FWD realizados com cargas abaixo de 2.000 lb (907,2 kg) ou em estruturas onde o subleito é relativamente rígido, não são observados efeitos da não linearidade.

Farias e Monteiro (1996) verificaram as diferenças entre retroanálises lineares e não lineares em função da pressão confinante ( $\sigma_3$ ) para dados obtidos por meio do FWD. A conclusão dos autores é que há maior adequação do modelo não-linear, embora também seja possível uma boa

reprodução da bacia de deflexões a partir do modelo elástico linear. No entanto, observa-se que os parâmetros do modelo linear devem ser interpretados como valores médios representativos apenas para o nível de tensões aplicado na retroanálise.

Levando em consideração a velocidade do programa para determinação da solução do problema, afirma Albernaz et al. (1995) que a consideração de que o sistema é elástico-linear proporciona grandes vantagens, embora Cardoso (1995) admita que ainda não há um consenso quanto à consideração da elasticidade não-linear dos materiais granulares e como usá-lo de forma acurada.

Segundo Macêdo (1996), os procedimentos de retroanálise baseados nos elementos finitos são mais lentos que os demais, entretanto geram resultados mais acurados, além da possibilidade de tratar a elasticidade não-linear, permitindo considerar a variação dos módulos elásticos tanto na direção radial como na vertical.

#### **b) Envelhecimento de camadas asfálticas**

Os materiais asfálticos são termosensíveis, tornando-se mais duros e quebradiços com o envelhecimento do ligante, o que resulta nos processos de retroanálise uma variação modular devido à diferença de idade dos pavimentos ensaiados.

Os pavimentos que apresentam muitas fissuras tendem a ter deformações resilientes de maior magnitude, o que conduz a baixos valores de MR. Revestimentos muito oxidados, ainda não trincados, tendem a apresentar exatamente o contrário, pois se encontram endurecidos, apresentando pequenos valores de deformação e, conseqüentemente, elevados valores de modulo de resiliência (PITTA e BALBO, 1998).

Segundo Renier e Konrad (2002) apud NÓBREGA (2003), em geral, os pavimentos sujeitos à reabilitação ou manutenção corretiva estão trincados e apresentam várias descontinuidades, que devem influenciar na bacia deflectométrica e podem conduzir a erros nos processos convencionais de retroanálise.

Para Nóbrega (2003), quando uma trinca transversal ou uma descontinuidade qualquer aparece no pavimento, a camada de concreto asfáltico não pode ser considerada como semi-infinita, o que torna algumas hipóteses dos métodos inválidas. Neste caso, procedimentos convencionais de interpretação de ensaios FWD podem não ser adequados em pavimentos trincados. Uma solução

para driblar este problema é fazer as medidas de deflexão nas partes sem trincas o que, todavia, não é sempre possível. Outra solução seria desenvolver procedimentos de retroanálise que levem em conta a influência das trincas.

### c) Presença de camada rígida

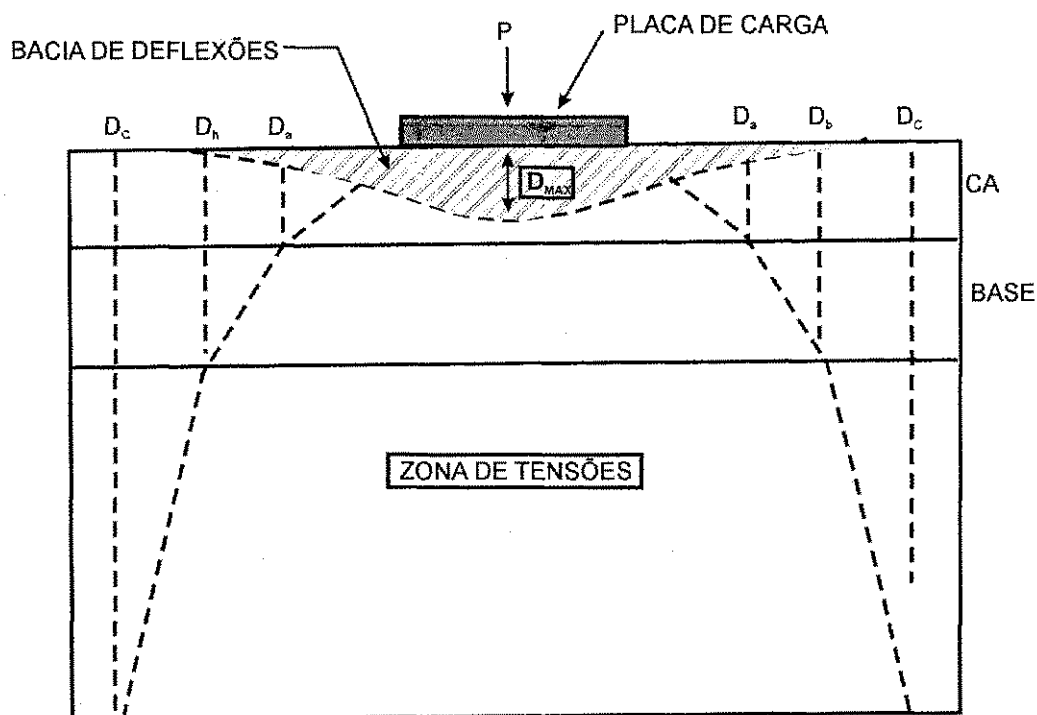
Briggs e Nazarian (1989), apud MACÉDO, (1996), através de análise teórica mostram que sendo a camada rígida ignorada ou mesmo quando admitida a uma profundidade duas vezes superior à real, os módulos retroanalizados para a base e subleito não representam os valores reais normalizados pelos materiais dessas camadas em campo e, que, em alguns casos, pode superestimar a vida restante do pavimento. Conseqüentemente, tem-se uma solução contra à segurança.

Segundo Pitta e Balbo (1998), os subleitos com módulos de resiliência elevados indicam que esta camada pouco influi nos defeitos do tipo afundamento de trilha de roda e/ou ondulações na rodovia, e caso haja defeitos desta ordem nos trechos analisados estes serão devidos a:

- Insuficiência de compactação das camadas de base;
- Elevada espessura das camadas de base;
- Processo de fadiga/envelhecimento do revestimento;
- Processo de deformação plástica do revestimento.

Rohde et al. (1990) apud Cavalcante (2005), propõem um método para a estimativa da profundidade da camada rígida. A hipótese fundamental é que as deflexões medidas na superfície do pavimento devido a um dado carregamento resultam da integração das deformações verificadas nos vários pontos situados no interior da zona de tensões; portanto, a deflexão medida a alguma distância do carregamento está diretamente relacionada ao deslocamento verificado numa profundidade específica da estrutura do pavimento, inserida na zona de tensões. Admite-se também que não ocorre nenhum deslocamento superficial além do "offset" correspondente ao intercepto da zona de tensões com uma camada rígida (geralmente considerada de MR 100 vezes superior ao do subleito). O método proposto para a estimativa admite que a profundidade na qual a deflexão seja nula (provavelmente devido à camada rígida) está relacionada à distância na qual não ocorre deslocamento na superfície conforme Figura 2.14. Mahoney et al. (1989) apud Cavalcante (2005), utilizaram esta mesma metodologia, levantando a possibilidade da influência

da presença do nível d'água (ou saturação por franja capilar) no subleito para a estimativa da profundidade da camada rígida. Esta questão de camada rígida é pouco relevante no Brasil devido ao clima tropical e intemperismo intenso. Grandes profundidades de solo até atingir a rocha são mais comuns no caso de clima temperado.



**Figura 2.14 – Representação Esquemática – Conceito de Deflexão Nula.**

Medina et al. (1994) relatam que para o módulo de uma camada ser obtido de forma adequada, a partir da retroanálise de bacias de deflexão, é preciso que ela tenha uma influência relevante no perfil de deflexão obtido na superfície. Camadas rígidas ou moles, mesmo as de pequena espessura, podem interferir no resultado obtido. Outro fator importante é o comportamento não-linear dos solos e materiais granulares. São observadas variações de grandes proporções nos módulos desses materiais obtidos por retroanálise. Esta variação cresce com o aumento da distância entre o sensor e a área carregada.

### 2.7.5 Métodos clássicos de retroanálise

Albernaz et al. (1995) dividem os métodos de retroanálise em dois grupos: simplificados e iterativos. Métodos simplificados geralmente transformam a estrutura de múltiplas camadas em estruturas equivalentes mais simples, normalmente de duas camadas. Entre os métodos iterativos, Albernaz et Al. (1995) incluem os métodos que procuram obter os módulos de todas as

camadas do conjunto pavimento/subleito. Os autores acima citados dividem ainda os métodos iterativos entre aqueles que calculam as bacias deflectométricas durante o processo de retroanálise, os que utilizam bancos de dados e os que usam equações de regressão estatística.

Dentre os métodos ditos iterativos, segundo a classificação acima, Cividini & Gioda (1994) apud Alkasawneh (2007) dividem duas alternativas bastante diferenciadas de retroanálise: o método direto e o método inverso. O método direto baseia-se na minimização de uma função de erro entre valores medidos e valores previstos. Já o método inverso estabelece uma equação não linear entre parâmetros a serem retroanalizados e valores medidos.

Estes métodos dependem de algumas simplificações que são realizadas no processo de retroanálise. Por exemplo, a espessura de cada camada é considerada constante (uniforme) e, normalmente, é obtida com base em registros da construção ou através de sondagem. As principais etapas do processo de retroanálise consistem em:

I - Definição dos parâmetros de entrada do sistema pavimento/subleito, incluindo: espessura de cada camada, o coeficiente de Poisson, etc ...;

II - Assumir módulos iniciais valores para o sistema de pavimentação. Estes módulos iniciais podem ser determinados com base na experiência ou com base em valores típicos de módulos. Para uma mesma estrutura, os valores dos módulos obtidos por retroanálise podem ser diferentes, devido ao método aplicado na retroanálise;

III - Calcular as deflexões do pavimento, utilizando o programa de análise tensão/deformação, nos pontos de estudo dos geofones do FWD ao longo da superfície;

IV - Comparar as deflexões calculadas com as medidas. Se a diferença entre os valores das deflexões calculadas e medidas é aceitável, assume-se que o módulo das camadas são os módulos reais. Caso contrário, assumindo-se que estes módulos não são os procurados, estes devem passar por um processo de refinamento;

V - Repetição dos passos II a IV, se necessário.

### 2.7.5.1 Métodos Iterativos

Basicamente, nos métodos iterativos determinam-se os módulos resilientes dos materiais a partir da comparação entre valores da bacia de deslocamento medida em campo com uma bacia teórica definida a partir de um programa de retroanálise. Neste processo, objetiva-se o melhor ajuste das bacias por meio da técnica de minimização do erro absoluto ou erro quadrático.

Segundo Medina et al. (1994), existem várias formas de se estabelecer este ajuste, cabendo destacar as seguintes, que são bastante usadas:

- erro relativo em cada sensor;
- soma dos valores absolutos das diferenças entre as deflexões medida e calculada em cada sensor;
- soma das diferenças ao quadrado;
- raiz média quadrática.

Segundo Uzan (1994), os procedimentos iterativos em função do tipo de representação do carregamento (elástico ou dinâmico) e do tipo de comportamento dos materiais (elástico linear, elástico não-linear, visco-elástico e/ou plástico), são divididos em cinco grupos:

- Elástico, estático e linear;
- Elástico, estático e não linear;
- Dinâmico linear usando domínio de frequência ajustada;
- Dinâmico linear usando o tempo de domínio de frequência ajustada;
- Dinâmico não linear.

Segundo Macêdo (1996), para orientar o processo iterativo, a fim de excluir os valores de MR expúrios, são admitidas as seguintes hipóteses, de acordo com a estrutura do pavimento:

- Que os valores de MR decrescem com a profundidade, salvo em pavimentos assentes sobre solos lateríticos;



- Módulo de resiliência do subleito constante;
- Localização de camada rígida;
- Fixação de relações de MR.

Os métodos iterativos podem ser classificados segundo Albernaz et al. (1995), em três grupos:

- Grupo 1 - Métodos que calculam durante o processamento os parâmetros elásticos de estruturas teóricas, cujas bacias deflectométricas são comparadas às bacias medidas em campo;
- Grupo 2 - Métodos que fazem uso de banco de dados das características elásticas e geométricas de uma gama de estruturas teóricas;
- Grupo 3 - Métodos que utilizam equação de regressão estatística.

Uma das desvantagens dos métodos iterativos é o fato de serem lentos, exceto os que utilizam bancos de dados. Estes têm sua velocidade em função do tamanho e detalhamento do banco de dados, que deve conter todas as combinações de parâmetros elásticos e geométricos de estruturas encontradas na prática. Apesar de serem rápidos, os métodos que utilizam equações de regressão estatística não apresentam boa acurácia (NÓBREGA, 2003).

Segundo Cardoso (1995) e Preussler et al. (2000), os resultados obtidos através de métodos iterativos de retroanálise são influenciados pelos seguintes fatores:

- Os valores de MR finais da estrutura em estudo são dependentes dos valores de MR iniciais ou "semente" (*seed moduli*) adotados para as camadas;
- Admitem várias soluções, pois uma bacia de deflexões pode corresponder a uma centena de configurações estruturais diferentes, sendo que o processo de convergência, por sua vez, é função dos valores modulares iniciais adotados;
- As espessuras adotadas para as camadas da estrutura influenciam nos valores dos módulos finais. Quando é adotada para uma determinada camada uma espessura menor do que a sua espessura real, o módulo obtido poderá ser bem maior do que o do pavimento real. Isso ocorre para se compensar o valor da rigidez equivalente de cada camada, que é função do módulo e da espessura. Daí, a necessidade da obtenção das

espessuras, que seria de fácil obtenção se os relatórios de execução de obras (“as built”) fossem um item obrigatório dos contratos de construção e de supervisão de obras;

- A presença e a profundidade de uma camada rígida influenciam nos resultados da retroanálise, assim como a presença de camadas de solos saturados ou até mesmo de lençóis freáticos no subleito.

Como em geral, os programas de retroanálise começam o ajuste a partir do módulo do subleito, então um artifício que pode facilitar o procedimento de retroanálise é a determinação prévia do mesmo. Desta forma, um procedimento que pode ser usado é o modelo da AASHTO (1993) para o cálculo rápido e acurado do módulo do subleito “in situ”, através da Equação 12 indicada a seguir:

$$M_{SUB} = \frac{P}{a \cdot D_a} \cdot S_f \quad (12)$$

Sendo:

$M_{sub}$  – módulo de resiliência do subleito (kgf/cm<sup>2</sup>);

P – carga aplicada (kgf);

a – distância do ponto de aplicação da carga (cm);

$D_a$  – deflexão à distância a (cm);

$S_f$  – fator de correção da carga em função do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

A correção é dada em função da Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Fatores de Correção da Carga em Função do Coeficiente de Poisson (AASHTO, 1993).**

$\nu$	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
$S_f$	0,269	0,279	0,289	0,29	0,297

Segundo Preussler et al. (2000), o modelo da AASHTO (1993) pode ser usado como dado de entrada nos programas de retroanálise, na tentativa de minimizar os erros. Para este cálculo, deve-se levar em conta as deflexões mais distantes do centro da placa, fora do cone de tensões do carregamento, onde só há influência do subleito nas deformações elástica.

De acordo com estudos desenvolvidos por Cardoso (1995), a consideração de faixas de módulos permite obter resultados mais coerentes com as características elásticas dos materiais ensaiados.

As faixas de módulos estabelecidas pelo autor com base na pesquisa encontram-se resumidas na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Faixas de Módulos Retroanalisados (CARDOSO, 1995).**

CAMADA	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Revestimento	2900	1130	5820
Bases (*)	270	100	730
Sub-bases	150	70	300
Reforço de subleito	120	30	300
subleitos	150	80	270

(\*) exceto para bases cimentadas

### 2.7.5.2 – Métodos Simplificados

Nos métodos simplificados, os módulos de resiliência do pavimento são estimados por meio da utilização de equações, tabelas, gráficos e outros processos mais simples gerados a partir da Teoria da Elasticidade, sendo aplicados para meios homogêneos, isotrópicos e elásticos lineares (ALBERNAZ et al., 1995).

Em geral, a estrutura constituída de múltiplas camadas é transformada em estruturas equivalentes mais simples, de duas ou três camadas, incluindo a camada de subleito. Estas muito usadas em análises preliminares e anteprojeto por serem mais rápidas do que os métodos iterativos, porém, usualmente tem menor acurácia.

No Brasil e no exterior os métodos simplificados mais conhecidos são sumarizados a seguir:

### a) Método da AASHTO (1993)

O método da AASHTO (1993) apresenta um procedimento simplificado de retroanálise em que o pavimento real é transformado em uma estrutura de duas camadas: a primeira corresponde ao conjunto de todas as camadas do pavimento (sub-base, base e revestimento) com um módulo efetivo ( $E_p$ ) e a segunda apenas ao subleito.

Para retroanalisar o valor do módulo torna-se imprescindível determinar os seguintes parâmetros:

- Deflexões medidas em determinadas distâncias do ponto de aplicação de carga;
- Carga solicitante (pressão e área de contato);
- Espessura total do pavimento acima do subleito.

O módulo de resiliência do subleito é determinado através da Equação (12).

Deve-se ressaltar que a deflexão e a distância devem ser determinadas em um ponto bem afastado da aplicação da carga, de tal forma que haja apenas influência do subleito. A recomendação feita pela AASHTO (1993) indica que o valor desse ponto deve ser aproximadamente igual a 70% do valor do raio do bulbo de tensões ( $a_e$ ) na interface pavimento-subleito, conforme apresentado na Equação 13.

$$a_e = \sqrt{\left[ a^2 + \left( D \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

Em que:

$a_e$  – raio do bulbo de tensões;

$a$  – raio da área circular de distribuição de carga;

$D$  – espessura total das camadas sobre o subleito;

$E_p$  – módulo de elasticidade efetivo do pavimento;

$M_R$  – módulo resiliente do subleito.

Já o módulo efetivo do pavimento, ( $E_p$ ), é calculado iterativamente através da Equação 14, até que o valor do segundo membro seja igual ao valor da deflexão máxima ( $d_0$ ).

$$d_0 = 1,5.p.a \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}} \right\}}{E_p} \right\} \quad (14)$$

Onde:

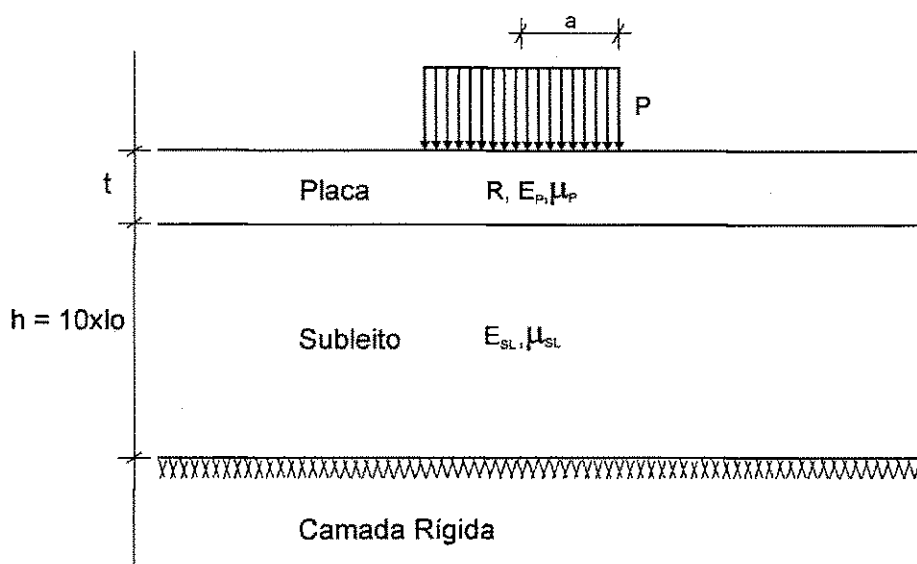
$d_0$  – deflexão máxima;

$p$  – pressão de contato;

O método em discussão ainda estabelece alguns critérios de ajuste dos módulos do subleito e a adoção de uma temperatura de referência (20°C) para a determinação da deflexão máxima. Também propõe uma fórmula de cálculo do reforço a partir destes dois módulos retroanalizados.

#### b) Método FABRÍCIO et al. (1994)

Esse método baseia-se no conceito de pavimento equivalente e no modelo elástico de Hogg. Consiste em uma placa elástica, de espessura  $t$  e largura e comprimentos infinitos, assente num subleito elástico, de espessura  $h$  ( $h \gg t$ ) e, da mesma forma que a placa, de largura e comprimento infinitos. Neste caso, admite-se que o subleito está assente em um horizonte de material perfeitamente rígido, localizado numa profundidade  $h$ , fixada em 10 vezes o comprimento característico ( $l_0$ ). Na Figura 2.15 é ilustrado o modelo de Hogg, e os seus parâmetros são determinados pelas Equações 15 e 16.



**Figura 2.15 – Geometria do Modelo de Hoog (FABRÍCIO et al., 1988).**

$$R = \frac{E_p \times t^3}{12 \times (1 - \nu_p^2)} \quad (15)$$

$$l_o = \sqrt[3]{\frac{R(1 + \nu_{sl}) \times (3 - 4\nu_{sl})}{E_{sl} \times 2(1 - \nu_{sl})}} \quad (16)$$

Sendo:

R – rigidez da placa;

t – espessura da placa;

P – coeficiente de Poisson da placa (igual a 0,40);

lo – comprimento característico;

$E_{sl}$  – módulo de deformação do subleito;

$\nu_{sl}$  – coeficiente de Poisson do subleito (igual a 0,40).

Neste método, tem-se que a estrutura equivalente ao pavimento existente é um pavimento hipotético, formado por uma única camada de espessura  $t$  de CBUQ com módulo  $E1 = 70\text{MPa}$ , sobre o mesmo subleito do pavimento existente e apresentando a mesma bacia deflectométrica.

Os autores obtiveram bacias teóricas de deflexão para diferentes valores de  $l_o$ , tanto para a viga Benkelman quanto para o FWD. Considerando  $l_o$  igual a  $t$  e igualando-se as Equações 15 e 16, determinou-se uma relação modular ( $E_p/E_{sl}$ ) igual a 6,18. A partir daí, tem-se também gráficos

que relacionam  $l_0$  com  $D_{60}/D_0$  e  $l_0$  com  $E_{SL}/D_0$ , onde  $D_0$  e  $D_{60}$  são, respectivamente, a deflexão máxima e a deflexão medida a 60 cm do ponto de aplicação de carga. Pela metodologia apresentada, torna-se possível determinar a espessura do pavimento equivalente (igual à espessura da placa), o módulo de deformação do pavimento equivalente (igual ao módulo da placa), o módulo de deformação do subleito e espessura do subleito acima da camada rígida (Equação 17).

$$h = 10 \times l_0$$

A partir dessa metodologia, Fabrício et al. (1988) concluíram que:

- As bacias deflectométricas medidas na superfície do pavimento viabilizam a obtenção de muito mais informações sobre o estado do pavimento que os métodos usuais de dimensionamento de reforço podem extrair;
- Permite que se faça uma avaliação estrutural a partir da bacia de deflexões de uma forma simplificada, admitindo que o estado do pavimento possa ser traduzido por uma maior ou menor espessura ( $t$ ) determinada.

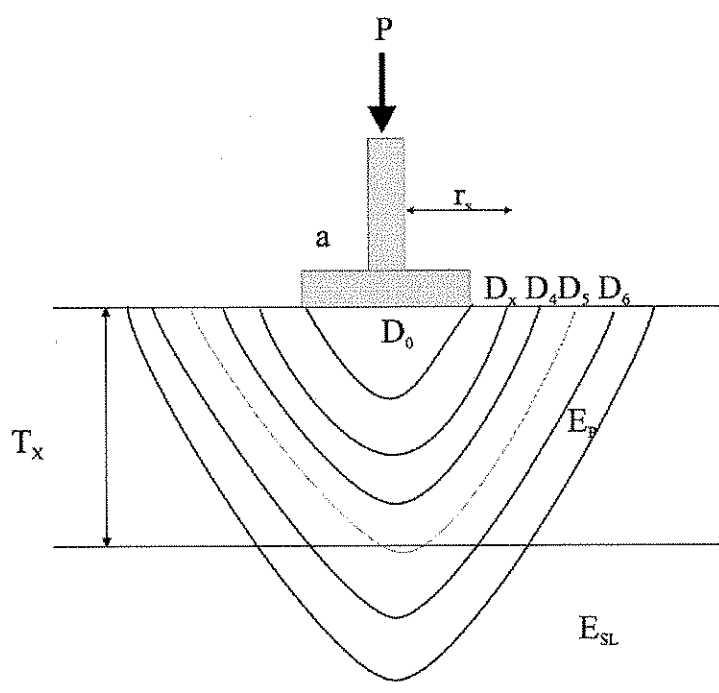
Os autores, além dos gráficos, apresentaram também equações deduzidas no método como alternativa nos cálculos em função do tipo de equipamento utilizado na determinação das deflexões.

#### c) Método de NOURELDIN (1993) e ALBERNAZ (1997)

Esse método possui desenvolvimento teórico baseado nas teorias elásticas de Boussinesq, Barber, Burmister, Odemark e Ullidtz. O pavimento real composto de múltiplas camadas é transformado em pavimento equivalente de duas camadas, da mesma forma que no método da AASHTO (subleito e conjunto revestimento + base + sub-base). Para esse método, não há necessidade de serem definidos valores iniciais dos módulos e nem a profundidade da camada rígida no subleito. Permite ainda a análise de duas situações: a primeira onde as espessuras reais das camadas que compõem o pavimento são conhecidas e outra onde as mesmas espessuras não são conhecidas ou confiáveis.

Esse procedimento é baseado na teoria da elasticidade aplicada a meios semi-infinitos, homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos. Esta teoria era, inicialmente, foi usada no cálculo de módulos elásticos de solos de fundação, através do ensaio de placa, sendo posteriormente adaptada para a análise de pavimentos flexíveis.

O desenvolvimento da metodologia parte do seguinte princípio: existe um ponto na superfície do pavimento, localizado a uma certa distância do ponto onde a carga é aplicada, em que a deflexão depende unicamente do comportamento elástico do subleito, tendo o mesmo valor da deflexão do topo do subleito na vertical que passa pelo centro da área carregada, conforme ilustrado na Figura 2.16.



**Figura 2.16 – Linhas de Iguais Deflexões Verticais no Sistema Pavimento-Subleito (modificado - NOURELDIN, 1993).**

Os valores de módulo do subleito ( $E_{SL}$ ), do módulo efetivo do pavimento ( $E_P$ ), da espessura efetiva ( $T_x$ ) e do número estrutural ( $SN_{EFF}$ ) são calculados através das seguintes equações:

$$E_{SL} = \frac{P(1-\mu^2)}{\pi r_x D_x} \quad (18)$$

$$E_P = \frac{P \left( \frac{1,5}{a} \frac{1-\mu^2}{r_x} \right)}{D_0 - D_x} \quad (19)$$



$$T_x = \sqrt{\frac{2,25 r_x^2}{(1-\mu^2)^2} - a^2} \sqrt[3]{\frac{D_0 - D_x}{D_x \left( \frac{1,5 r_x}{a(1-\mu^2)} - 1 \right)}} \quad (20)$$

$$SN_{EFF} = \frac{1}{\sqrt[3]{M_{AL}}} \sqrt{\frac{2,25 r_x^2 - a^2}{(1-\mu^2)}} \sqrt[3]{\frac{P(1-\mu^2)}{\pi r_x S_x}} \quad (21)$$

$$SN_{EFF} = T_x \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{AL}}} \quad (22)$$

Sendo:

P é a carga aplicada (kgf);

$D_0$  é a deflexão no centro do carregamento (em cm);

$D_x$  é a deflexão assumida como sendo do subleito (em cm);

$T_x$  é a espessura efetiva do pavimento (em polegadas);

$r_x$  é a distância radial assumida como sendo o ponto de localização da deflexão do subleito (em cm);

$SN_{EFF}$  é o número estrutural efetivo do pavimento;

$M_{AL}$  é o módulo de elasticidade do alumínio, que é o material de referência adotado pela AASHTO (1993) para o cálculo do número estrutural ( $M_{AL} = 77.407$  MPa).

Este método permite saber qual camada apresenta um melhor comportamento estrutural: o pavimento ou o subleito (VILLELA e MARCON, 2001).

Segundo Albernaz (1997), se os valores de espessuras efetivas  $T_x$  forem maiores que a espessura real do pavimento,  $T_a$ , o pavimento está em melhores condições do que o subleito, sendo esta, portanto a camada mais fraca da estrutura. Caso contrário, o pavimento é estruturalmente mais fraco que o subleito.

O estudo desenvolvido por Noreldin (1993), baseou-se na determinação de deflexões com FWD, com placa de 15 cm, carga de 40 kN e sete sensores nas distâncias de 0, 20, 30, 60, 90, 120 e 150 cm, para determinar as bacias de deflexão no campo.

Com o intuito de utilizar o expressivo banco de dados existente no Brasil formado a partir de determinações de deflexões com a viga Benkelman, Albernaz (1997) adaptou o método, transformando o carregamento característico dos levantamentos com viga Benkelman, no carregamento equivalente característico dos ensaios com placa. Sendo assim, aquele autor realizou uma análise paramétrica utilizando o programa Elsym5, adotando valor de 0,5 para o coeficiente de Poisson para todas as camadas da estrutura. Foram realizadas várias combinações de carregamento buscando determinar aquela que resultasse em deflexões iguais para as duas situações consideradas, ou seja, de uma carga (placa) e duas cargas (viga Benkelman). O resultado obtido foi de uma carga com 50 kN e raios de 16,8 cm.

Segundo Albernaz (1997), o método em discussão apresenta as seguintes limitações:

- O pavimento é um sistema elástico de duas camadas (pavimento e subleito);
- Os materiais são considerados sem peso, homogêneos e isotrópicos;
- O pavimento tem espessura constante e uma largura infinita em todas as direções;
- O subleito é considerado como de espessura infinita;
- O coeficiente de Poisson é igual para as duas camadas e com valor igual a 0,50;
- O topo da camada de subleito é considerado o topo da camada de menor módulo do sistema pavimento-subleito, quando as espessuras não são conhecidas;
- O uso do método em pavimentos com espessura menor que o raio da placa de carregamento produz resultados não confiáveis.

### **2.7.5.3 Métodos iterativos Inversos**

Cividini & Gioda (1994) apud Huang (1993) descrevem o procedimento de retroanálise conhecido como método inverso, uma vez que ele requer a inversão das equações que governam o problema de análise linear elástica de tensões.

De um modo bastante simplificado, o procedimento consiste em se estabelecer uma relação entre um vetor contendo todos os parâmetros elásticos a serem determinados e os valores medidos, através da matriz de rigidez do sistema global. Mesmo para materiais lineares, a relação final a que se chega é não linear.

O método exige que um programa específico seja criado. O programa deve resolver iterativamente um sistema de equações não lineares e a cada iteração deve-se inverter parte da matriz de rigidez do sistema. O método exige, portanto grande esforço computacional. Apesar disto, pode ser um esquema interessante quando o número de variáveis a se determinar for muito grande. Diversos autores descrevem casos de retroanálises bem sucedidas, usando o método inverso, principalmente em problemas de Mecânica das Rochas.

### **2.7.6 Programas de Retroanálise de Camadas Elásticas**

A maioria dos programas de retroanálise aplica técnica iterativa e inversa sobre a teoria das camadas elásticas para estimar o módulo de elasticidade. No mínimo, os métodos de retroanálise que utilizam a teoria das camadas elásticas necessitam da espessura e do coeficiente de Poisson das camadas constituintes da seção estudada.

#### **2.7.6.1 RETRAN2-CL**

Este programa foi desenvolvido por Albernaz (1995), baseado na metodologia proposta por Noureldin (1993). De acordo com o método, o pavimento real é transformado em uma estrutura de duas camadas: uma estrutura equivalente, composta pelas camadas betuminosas e granulares, e outra representando o subleito.

Dos processos executados pelo programa, podemos destacar quatro tarefas:

- I. Ajuste das bacias de campo;
- II. Retroanálise dos módulos de resiliência;
- III. Armazenamento das bacias deflectométricas e dos resultados da retroanálise;
- IV. Relatório com os dados de entrada e saída do trecho em análise.

Nesse programa, a retroanálise dos módulos de resiliência pode ser realizada a partir de bacias deflectométricas levantadas através de viga Benkelman e FWD. Os dados de entrada necessários para a retroanálise executada pelo RETRAN2-CL são os valores da bacia de deflexões e as configurações do carregamento, uma vez que o programa admite um valor de 0,5 para os coeficientes de Poisson das duas camadas.

#### **2.7.6.2 REPAV e REPAV V2**

O programa REPAV considera o sistema pavimento-subleito como uma estrutura elástico-linear, composto por três camadas, incluindo o subleito, e utiliza um banco de dados calculado com o programa de análise tensão/deformação ELSYM5. O programa realiza retroanálise de bacias deflectométricas determinadas através do FWD ou da viga Benkelman.

Com relação ao coeficiente de Poisson, todo o banco de dados utilizado pelo programa REPAV foi criado utilizando-se a mesma simplificação usada no RETRAN-2CL, adotando o valor 0,5 para todas as camadas do pavimento.

No REPAV, os dados de entrada necessários para a realização da retroanálise são os valores da bacia de deflexão, distâncias radiais e espessuras das camadas. A retroanálise se encerra quando o programa atingir um número de 2000 iterações ou então quando o erro médio absoluto for menor que o erro admitido.

Nóbrega (2003), para evitar a obtenção de valores de módulos excessivamente elevados para a camada de revestimento, sugeriu ao autor do programa que implementasse uma alteração, possibilitando a fixação de faixas de valores modulares. Desta forma, foi criada uma segunda versão do programa, denominada de REPAV V2 (FONSECA, 2002).

#### **2.7.6.3 RETROANA**

O RETROANA foi desenvolvido pela Dynatest, na década de 1990, e utiliza como sub-rotina o programa de análise de tensões e deformações ELASTMCF (RODRIGUES, 1991). Da mesma forma que o REPAV, o RETROANA considera um sistema elástico-linear composto por três camadas, sendo a primeira o somatório das camadas betuminosas, a segunda, das camadas granulares e a terceira, o subleito.

Existem duas sub-rotinas que auxiliam o processo de retroanálise realizado pelo RETROANA, o HOMOGENE, que consiste na divisão do segmento estudado em segmentos homogêneos em função das bacias levantadas com o FWD, e o ESTATIST, que realiza o tratamento estatístico dos dados.

Os parâmetros de entrada, necessários para a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento, através do programa RETROANA, são bacias deflectométricas, espessura de cada camada, coeficiente de Poisson para cada camada, faixa de valores modulares para cada camada, temperatura do ar e do pavimento e os dados sobre o carregamento do ensaio com FWD.

Os critérios de parada adotados pelo RETROANA são dois: o primeiro, é que o erro médio entre a bacia medida e calculada pelo ELASTMCF seja menor que o valor admissível; e o segundo, são as quantidades de iterações realizadas pelo programa, que atinge um máximo de 80.

#### **2.7.6.4 RETRAN5-L**

O RETRAN5-L é um programa de retroanálise que avalia os módulos de um sistema composto por até cinco camadas. O processo de retroanálise é realizado a partir de um banco de dados, gerado pelo programa ELSYM5, considerando a seção-tipo do pavimento e a configuração do carregamento. Devido a esse critério, podem ser analisadas bacias deflectométricas levantadas tanto com FWD como com a viga Benkelman.

Para a retroanálise utilizando o RETRAN-5L, são necessários os seguintes dados de entrada: as bacias deflectométricas, a seção-tipo do pavimento, o coeficiente de Poisson para cada material, a faixa de valores modulares para cada camada e os dados sobre o carregamento de ensaio.

Esse é um programa de uso privativo, não tendo sido ainda disponibilizado pelo seu autor.

### 2.7.6.5 EVERCALC

O EVERCALC foi desenvolvido por J. Mahoney, da Universidade de Washington. O EVERCALC usa como sub-rotina o programa WESLEA, utilizando um algoritmo de Gauss-Newton para otimização da solução. O código do WESLEA é baseado na teoria das camadas elástico-lineares, que é tradicionalmente utilizado para fins de análise de pavimento flexível. O ajuste da bacia medida com a bacia calculada é realizada experimentalmente através de análise iterativa.

O programa pode utilizar até sete sensores e oito levantamentos por seção. Seções de pavimentos flexíveis com até cinco camadas podem ser avaliados. Para iniciar o processo de retroanálise dos módulos, deve ser estimado um inicial, bem como uma faixa de módulos para todas as camadas. Esse recurso evita que o programa produza resultados fora da faixa especificada. No final de cada iteração, as deflexões calculadas pelo WESLEA são comparadas com as medidas em campo. As discrepâncias entre os valores calculados e as deflexões medidas são mensuradas através do erro médio quadrático (RMS). As iterações são encerradas quando uma das três condições seguintes for satisfeita: (I) O RMS cai dentro da tolerância permitida; (II) as determinações dos módulos entre duas iterações sucessivas sai da faixa de tolerância permitida; ou (III) o número de iterações atingiu o limite máximo.

Quando são utilizados dois ou mais conjuntos de dados para a mesma localização, os módulos de saída do primeiro processo de retroanálise alimentam os módulos de entrada do segundo.

Se a seção do pavimento não contiver mais de três camadas, o programa pode atribuir o módulo inicial internamente. Neste caso, um conjunto de equações é utilizado para determinar um conjunto de módulos iniciais a partir do relacionamento entre os módulos das camadas, as deflexões da superfície, a carga aplicada e a espessura da camada.

A camada rígida que possua um módulo conhecido pode ser incluída na análise. Neste caso, a profundidade para a camada rígida será calculada pelo programa. A inclusão da camada rígida na análise normalmente resulta em uma diminuição do módulo do subleito e um aumento do módulo da camada acima da camada do subleito (sub-base ou base).

Uma desvantagem do programa EVERCALC é que os arquivos de saída são armazenados em formato binário, o que dificulta a comunicação dos EVERCALC com qualquer outro programa, quando necessários (tais como uma base de dados externos deflexão bacias, etc.).

O arquivo de dados de deflexão do FWD "bruto" pode ser usado para a entrada direta se o modelo DYNATEST 8000 for utilizado para realizar os levantamentos. Neste caso, o programa irá internamente converter dados para o arquivo de dados de deflexão do EVERCALC. O programa EVERCALC oferece uma excelente visualização dos resultados em uma variedade de gráficos e tabelas. O programa pode processar os resultados no sistema Inglês ou no sistema internacional.

#### **2.7.6.6 ELMOD4**

O ELMOD4 foi desenvolvido pela Dynatest Consulting Inc. Esse programa é utilizado tanto para avaliação do módulo das camadas do pavimento, como para o dimensionamento. O programa aceita o formato de arquivo DYNATEST. Se tal arquivo não existir, não é fornecido pelo programa um meio para a introdução manual dos dados de deflexão. O programa ELMOD4 é capaz de calcular o módulo das camadas do pavimento usando uma dessas duas opções: a transformada aproximada de Odemark-Boussinesq ou a bacia de deflexão calculada por retroanálise.

O primeiro método pode ser utilizado para um pavimento possuindo de uma a quatro camadas. O segundo método pode ser utilizado com até cinco camadas. Em ambos os métodos, a dependência do CBUQ em relação à temperatura é levada em consideração.

Um processo iterativo é usado para determinar o módulo das camadas que resultem na mesma bacia de deflexões, medida por um FWD. Esta abordagem é bastante confiável para sistemas de pavimento flexível que possuem três camadas, entre elas uma camada de base não integrada, mas vinculada, à camada superficial. Um sistema de quatro camadas flexíveis também pode ser avaliado utilizando o processo de Odemark-Boussinesq, desde que a relação modular das camadas seja conhecida.

O programa também inclui um procedimento para o cálculo automático dessa relação para materiais granulares, a partir da espessura das camadas de número dois e três. Para melhor simular as condições em que a abordagem teórica da retroanálise se baseia, os desenvolvedores

do programa sugerem combinar uma camada de asfalto com uma camada de cascalho ou outra camada estabilizada adjacente.

Um total de cinco camadas, incluindo o subleito, pode ser retroanalisado se a opção de retroanálise da "bacia de deformação" for utilizada; No entanto, esse processo não é recomendado para estruturas com muitas camadas, a não ser que para uma ou mais destas camadas sejam atribuídos módulos fixos.

ELMOD4 também pode fornecer uma estimativa teórica da localização da profundidade da camada rígida através das bacias de deflexões. Se esta opção não for escolhida, ELMOD considera um subleito não-linear com espessura infinita. No caso de informada a localização da camada rígida, assume-se que o subleito possua comportamento elástico linear. O ELMOD calcula a profundidade equivalente de uma camada rígida e compara esta com a profundidade máxima informada pelo usuário. Se o valor calculado for menor do que a profundidade informada pelo usuário; ele o utiliza para realizar a análise. Se a profundidade calculada é maior do que a entrada de profundidade, a análise reverte para a consideração de um subleito semi-infinito não-linear.

A retroanálise dos módulos elásticos do ELMOD para até cinco camadas pode ser realizada, desde que sejam cumpridas as seguintes condições:

I. A estrutura deve conter uma camada superior única, rígida. Se uma das camadas inferiores for rígida, deve ser realizada uma análise estrutural em separado para efeitos de avaliação;

II. Os módulos deverão diminuir com a profundidade;

III. A espessura da camada superior deve ser maior do que metade do raio da placa de carga (geralmente > 75 mm ou 3 polegadas);

IV. Para estruturas de três camadas, a espessura da camada superior deve ser menor que o diâmetro da placa de carga e a espessura da primeira camada deve ser inferior à da camada dois;



V. Sempre que os testes forem na junta ou perto dela, ou de uma grande rachadura, a estrutura deve ser tratada como um sistema de duas camadas.

Outra limitação do programa é o fato do coeficiente de Poisson ser considerado igual a 0,35 para todas as camadas. Isso é adequado para camadas asfálticas e granulares, mas diferente dos valores empregados para os solos coesivos (0,42-0,45) e concretos (0,15-0,18).

## Capítulo 3

### 3. Metodologia de Retroanálise de Bacia de Deflexão.

#### 3.1 Introdução

A metodologia proposta nesta pesquisa visa determinar as características estruturais do pavimento, tendo como pressuposto as bacias de deflexão obtidas a partir de ensaios deflectométricos.

Dentre suas características, podem-se destacar as seguintes:

- a) Implementação das configurações de carga do FWD e Viga Benkelman;
- b) Pavimento constituído por no máximo 5 camadas;
- c) O comportamento das camadas constituintes do pavimento é considerado como homogêneo, linear e constituído de materiais elásticos;
- d) Utilizar o programa de camadas elásticas ELSYM5 para o cálculo das deflexões;
- e) As camadas são admitidas com dimensão finita na direção vertical e extensão infinita na direção horizontal;
- f) O subleito é considerado semi-infinito;
- g) A caracterização das camadas é definida pela espessura, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson;

Esta metodologia parte do pressuposto de elaborar um processo computacional, iterativo, que realize a determinação dos módulos resilientes das camadas asfálticas utilizando metodologia diferente dos programas utilizados atualmente. A grande maioria dos programas de retroanálise começam suas iterações a partir da determinação do módulo do subleito, devido a consideração de que a deflexão mais distante levantada é produto unicamente da ação do bulbo de tensões da carga atuante sobre a camada do subleito, tornando possível determinar seu módulo

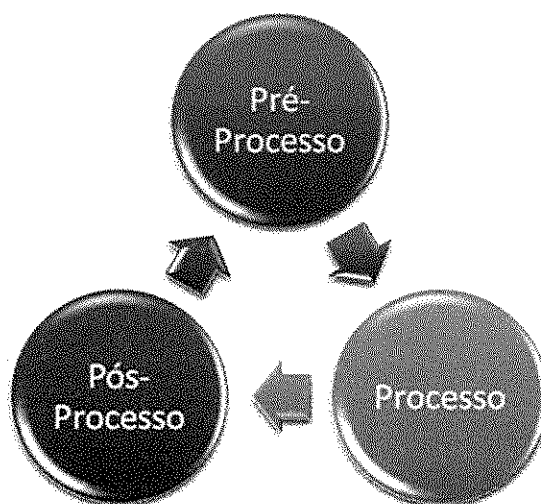
independente do comportamento das demais camadas constituintes do pavimento; e logo após os demais módulos são iterados.

A metodologia desenvolvida foi implementada no programa computacional RETROPAV, utilizando a linguagem de programação C#, possibilitando a utilização deste em microcomputadores com sistema operacional Windows 32-bits. Esta implementação não pôde ser estendida para sistemas operacionais do tipo 64-bits devido às limitações sofridas pelo programa de análise tensões/deformações utilizado.

### 3.2 Procedimentos Gerais

#### 3.2.1 Processos do RETROPAV

Para elaboração do RETROPAV foi utilizado o programa ELSYM5 para o cálculo das tensões e deformações sofridas pelo pavimento a ter os módulos de suas camadas retroanalisadas. Vale destacar que na implementação do ELSYM5, este não sofreu nenhuma modificação em seu algoritmo, uma vez que o RETROPAV foi elaborado seguindo o processo descrito na Figura 4.1.



**Figura 3.1 – Processo de Iteração Realizado pelo RETROPAV para Retroanálise.**

A seguir são descritas as etapas de cada iteração do RETROPAV:

- No Pré-processo o RETROPAV lê os dados disponibilizados pelo usuário, e alimenta o arquivo de entrada para que o ELSYM5 possa determinar as tensões e deformações;
- No Processo está o próprio ELSYM5 que, não sofrendo modificação, é executado tendo como dados de entrada os parâmetros alimentados pelo RETROPAV.
- No Pós-processo o RETROPAV lê os dados de saída do ELSYM5 e mostra a bacia de deflexão calculada; Logo após ele determina o nível de aproximação (RMS), testa os critérios de parada e executa o algoritmo de aproximação, fornecendo para a próxima iteração novos módulos.

### 3.2.2 Algoritmo de Aproximação do RETROPAV

Para realizar a aproximação dos módulos foi utilizado o seguinte algoritmo para realizar a retroanálise dos módulos no RETROPAV:

$$M_{i+1} = M_i x \left( \frac{d_i}{d_m} \right) \quad (23)$$

Sendo:

$M_{i+1}$  – Módulo da nova iteração;

$M_i$  – Módulo adotado para o chute inicial quando  $i = 0$ , ou módulo determinado na iteração  $i$ ;

$d_i$  – Deflexão calculada pelo ELSYM5 na iteração  $i$ ;

$d_m$  – Deflexão medida em campo;

O RETROPAV é então muito dependente do módulo de partida do processo de retroanálise, que contribui tanto para garantir uma boa aproximação quanto um menor número de iterações. De forma a deixar esta ferramenta à disposição do usuário, foi adotado o módulo inicial como sendo a média dos intervalos modulares de cada camada. Desta maneira tanto o intervalo modular, quanto a hipótese inicial ficam a cargo do usuário no momento da utilização do programa.

No desenvolvimento do algoritmo iterativo de retroanálise, a convergência do módulo resiliente de cada camada é dependente unicamente de uma deflexão. Para verificar qual seria a melhor deflexão para reger a convergência de cada camada no processo de retroanálise, foi realizado o estudo experimental ilustrado a seguir.

- Para 1 Camada:

Foi escolhida a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação do método.

- Para 2 Camadas:

Foi escolhida a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação da camada superior;

Foi escolhida a penúltima deflexão ( $d_{90}$ ) como a deflexão que rege a aproximação da camada inferior;

- Para 3 Camadas:

Foi escolhida a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação da camada de revestimento;

Para determinação de qual deflexão seria utilizada para reger a aproximação da camada de base, se a  $d_{20}$  ou a  $d_{30}$ , foi realizado estudo de forma a determinar qual seria a melhor deflexão a reger a aproximação.

Para determinação de qual deflexão seria utilizada para reger a aproximação da camada de subleito, se a  $d_{90}$  ou a  $d_{150}$ , foi realizado estudo de forma a determinar qual seria a melhor deflexão a reger a aproximação.

O estudo baseou-se na realização de retroanálise de bacias deflectométricas com dois métodos distintos:

- Método 1 –  $d_0$  regendo a convergência do revestimento, a deflexão  $d_{20}$  regendo a convergência do módulo da base, e  $d_{90}$  regendo a convergência do módulo do subleito.
- Método 2 –  $d_0$  regendo a convergência do revestimento, a deflexão  $d_{30}$  regendo a convergência do módulo da base, e  $d_{150}$  regendo a convergência do módulo do subleito.

Foi realizada retroanálise dos módulos resilientes dos segmentos homogêneos da estrutura da BR277/PR, do trecho Curitiba – Paranaguá, apresentados por Cavalcante et al. (2007), onde ele

realiza comparação entre os programas de retroanálise REPAV V2, RETROANA, EVERCALC5 e BACKFAA, cujas bacias estão descritas na Tabela 4.1.

**Tabela 3.1 – Segmentos homogêneos da BR277/PR tratados estatisticamente (Cavalcante et al., 2007).**

Segmentos Homogêneos	Estacas		Extensão (m)	Deflexões (x 0,01 mm)						
	Inicial	Final		D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>150</sub>
1	51099	51700	601	47,31	33,17	26,51	19,84	13,99	9,27	4,20
2	51800	52500	700	56,13	40,98	33,00	23,90	16,80	9,95	6,03
3	56599	58800	2201	42,87	28,63	22,04	16,08	11,69	7,67	4,60
4	59198	60700	1502	41,80	31,68	25,21	18,36	12,68	8,32	5,25
5	67799	69200	1401	43,58	30,33	24,32	17,43	12,56	8,20	5,78
6	69303	71198	1895	47,77	33,50	26,38	15,92	12,16	7,86	5,21
7	71300	71900	600	53,19	39,29	31,75	24,48	18,42	11,57	6,21
8	72003	72700	697	56,04	40,62	30,95	21,04	13,07	8,12	4,46
9	72800	73400	600	41,65	29,08	24,16	18,00	12,97	7,83	5,11
10	73499	74000	501	52,35	36,74	29,42	21,66	15,81	9,63	5,15
11	74100	74603	503	41,96	29,47	23,35	17,09	12,74	8,11	5,10
12	74701	75799	1098	54,98	37,17	30,43	22,97	17,31	10,80	6,45
13	76401	77001	600	48,75	33,17	26,65	19,59	14,81	8,93	4,77
14	77100	78001	901	56,45	40,22	31,82	23,81	17,75	11,21	5,86
15	78100	80001	1901	37,46	28,18	23,97	16,74	11,73	7,41	4,26

Os resultados obtidos para os módulos retroanalizados estão apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 3.2 – Resultado da Retroanálise pelos Métodos Avaliados de Convergência para 3 Camadas.**

Segmentos Homogêneos	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)						RMS (%)		ITERAÇÕES	
	Camada 1*		Camada 2**		Camada 3***		Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2				
1	2052	2432	175	124	137	175	11,1	9,5	6,0	13,0
2	1831	1859	123	126	128	124	4,8	4,1	6,0	4,0
3	2500	2129	211	215	164	164	3,7	4,6	3,0	4,0
4	2703	2805	174	195	152	143	4,1	4,9	4,0	3,0
5	2126	2047	187	216	155	131	6,4	7,8	8,0	10,0
6	1944	1987	150	158	163	144	5,9	9,0	8,0	9,0
7	2092	2343	149	125	109	120	5,4	5,4	7,0	12,0
8	1719	1626	117	106	158	166	4,8	4,9	4,0	5,0
9	2244	2590	194	195	162	147	5,9	4,6	7,0	4,0
10	1787	2105	149	123	132	144	5,7	5,1	8,0	13,0
11	2678	2674	206	218	155	148	4,9	4,5	3,0	3,0
12	1719	1844	164	156	117	117	4,8	5,1	5,0	4,0
13	1747	2015	174	141	142	156	6,4	6,2	8,0	11,0
14	1762	1899	142	120	113	127	5,8	6,0	7,0	12,0
15	3000	3224	187	159	172	174	4,5	3,3	6,0	5,0
MÉDIA	2127	2239	167	159	144	145	5,6	5,7	6,0	7,5

\*Camada 1 = revestimento, com 12cm de espessura

\*\*Camada 2 = base de brita graduada + sub-base de brita graduada + reforço com solo estabilizado, com espessura de 40 cm

\*\*\*Camada 3 = subleito de saibro arenoso variegado, adotando-se espessura infinita

**Tabela 3.3 – Análise Estatística dos RMS (%) e Iterações das Soluções Apresentadas para os Métodos 1 e 2 da Retroanálise com 3 Camadas do Programa RETROPAV.**

Método	1	2
Média RMS (%)	5,6	5,5
Média Iterações	6,0	7,5

Após análise estatística, pode-se verificar, de acordo com a Tabela 4.3, que o método 1 foi aquele que melhor aproximou as bacias retroanalizadas com menor número de iterações, sendo então este método implementado no RETROPAV.

Foi escolhida a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação da camada de revestimento;

Foi escolhida a  $d_{20}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de base;

Foi escolhida a  $d_{90}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de subleito.

- Para 4 Camadas

De maneira análoga ao caso de 3 camadas, foram realizados estudos para verificar quais deflexões deveriam reger a convergência de cada camada.

Foram realizados estudos com 4 métodos distintos utilizando as mesmas bacias deflectométricas apresentadas para o estudo com 3 camadas:

Método 1 –  $d_0$  regendo a convergência do revestimento, a deflexão  $d_{20}$  regendo a convergência do módulo da base, a deflexão  $d_{20}$  regendo a convergência do módulo da sub-base e  $d_{90}$  regendo a convergência do módulo do subleito;

Método 2 –  $d_0$  regendo a convergência do revestimento, a deflexão  $d_{20}$  regendo a convergência do módulo da base, a deflexão  $d_{30}$  regendo a convergência do módulo da sub-base e  $d_{90}$  regendo a convergência do módulo do subleito;

Método 3 –  $d_0$  regendo a convergência do revestimento, a deflexão  $d_{30}$  regendo a convergência do módulo da base, a deflexão  $d_{20}$  regendo a convergência do módulo da sub-base e  $d_{90}$  regendo a convergência do módulo do subleito;

Método 4 –  $d_0$  regendo a convergência do revestimento, a deflexão  $d_{20}$  regendo a convergência do módulo da base, a deflexão  $d_{30}$  regendo a convergência do módulo da sub-base e  $d_{150}$  regendo a convergência do módulo do subleito;

Os resultados obtidos para os módulos retroanalizados estão apresentados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

**Tabela 3.4 – Resultado dos Módulos Retroanalizados das Camadas 1 e 2 para os 4 Métodos Avaliados.**

Segmentos Homogêneos	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)					
	Camada 1*				RMS (%)	ITERAÇÕES
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4		
1	1925	1851	1836	1942	10,61	9
2	1863	1839	1807	1878	5,52	5
3	2401	2343	2275	2346	4,92	4
4	2909	2732	2668	2939	5,87	4
5	1966	1949	1999	2436	7,19	12
6	1946	1909	1792	1911	6,81	6
7	2187	2154	2113	2048	4,82	5
8	1805	1681	1620	1671	5,72	4
9	2186	2179	2151	2222	7,01	8
10	1910	1880	1837	1757	5,11	5
11	2435	2390	2329	2681	4,28	5
12	1646	1630	1600	1766	4,63	6
13	1721	1706	1665	1692	5,09	8
14	1872	1761	1712	1707	4,90	5
15	2541	3054	3041	3057	4,66	7
MÉDIA	2087	2071	2030	2137	5,81	6
Segmentos Homogêneos	Camada 2**				RMS (%)	ITERAÇÕES
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4		
	1	206	201	212	164	11,11
2	148	145	153	149	5,70	5
3	249	241	265	240	5,25	4
4	214	195	208	217	4,68	5
5	222	215	225	254	7,13	13
6	175	168	180	188	6,45	7
7	181	177	187	160	5,15	5
8	140	124	137	120	4,21	5
9	227	224	231	251	7,00	8
10	179	175	185	158	5,70	5
11	233	226	242	247	4,32	5
12	195	192	200	195	4,71	6
13	203	197	208	185	5,38	8
14	171	163	174	147	4,93	6
15	198	226	230	224	4,74	5
MÉDIA	196	191	202	193	5,76	7

\*Camada 1 = revestimento, com 12cm de espessura

\*\*Camada 2 = base de brita graduada + sub-base de brita graduada, com espessura de 22 cm

\*\*\*Camada 3 = reforço com solo estabilizado, com espessura de 18 cm

\*\*\*\*Camada 4 = subleito de saibro arenoso variegado, adotando-se espessura infinita



**Tabela 3.5 – Resultado dos Módulos Retroanalizados das Camadas 3 e 4 para os 4 Métodos Avaliados.**

Segmentos Homogêneos	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)					
	Camada 3***				RMS (%)	ITERAÇÕES
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4		
1	155	170	152	130	10,56	11
2	111	119	109	118	6,68	5
3	187	218	190	216	5,54	4
4	160	166	149	184	4,85	5
5	166	180	161	215	7,23	8
6	131	143	127	162	6,78	12
7	136	148	136	132	5,01	5
8	105	112	96	107	4,10	5
9	170	175	166	196	7,02	8
10	134	146	133	131	5,32	5
11	174	194	174	213	4,50	5
12	146	154	144	157	4,61	6
13	152	164	149	152	5,06	8
14	128	140	125	124	4,60	6
15	148	169	165	166	4,90	5
MÉDIA	147	160	145	160	5,78	7
Segmentos Homogêneos	Camada 4****				RMS (%)	ITERAÇÕES
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4		
	1	132	132	132	165	10,96
2	123	123	123	116	3,91	5
3	160	159	160	155	4,35	3
4	148	147	148	136	5,23	4
5	149	149	150	125	9,52	5
6	155	154	155	135	4,71	9
7	106	106	106	114	5,91	6
8	151	149	150	154	4,26	5
9	156	156	157	140	5,45	8
10	127	127	128	135	6,13	8
11	151	151	152	141	4,58	4
12	114	113	114	111	4,32	5
13	137	137	137	147	6,97	9
14	110	109	110	120	6,08	8
15	164	166	166	165	4,35	5
MÉDIA	139	138	139	137	5,78	6

\*Camada 1 = revestimento, com 12cm de espessura  
\*\*Camada 2 = base de brita graduada + sub-base de brita graduada, com espessura de 22 cm  
\*\*\*Camada 3 = reforço com solo estabilizado, com espessura de 18 cm  
\*\*\*\*Camada 4 = subleito de saibro arenoso variegado, adotando-se espessura infinita

**Tabela 3.6 – Análise Estatística dos RMS (%) e Iterações das Soluções Apresentadas para os Métodos 1, 2, 3 e 4 da Retroanálise com 4 Camadas do Programa RETROPAV.**

Método	1	2	3	4
Média RMS (%)	5,81	5,76	5,78	5,78
Média Iterações	6,2	6,5	6,6	6,2

Após análise estatística, pode-se verificar, segundo a Tabela 3.6, que o método 2 foi aquele que melhor aproximou as bacias retroanalizadas, sendo então este método implementado no RETROPAV:

Foi escolhida a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação da camada de revestimento;  $d_{20}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de base;  $d_{30}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de sub-base;  $d_{90}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de subleito.

- 5 Camadas

O programa RETROPAV possui interface para retroanálise com até 5 camadas. Nele foram consideradas a 1ª e 2ª camadas como sendo constituintes do revestimento. Estudos futuros podem ser realizados para verificar outras composições de deflexões para reger a convergência dos módulos.

Foi escolhida a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação da 1ª camada do revestimento; a deflexão máxima ( $d_0$ ) como a deflexão que rege a aproximação da 2ª camada do revestimento; a  $d_{20}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de base; a  $d_{30}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de sub-base; a  $d_{90}$  como a deflexão que rege a aproximação da camada de subleito.

### 3.3 Critérios de Parada Adotados no RETROPAV

Três foram os critérios de parada adotados pelo RETROPAV. São eles:

- RMS (%) menor que o estabelecido pelo usuário;
- Quantidade de iterações alcançou o limite estabelecido pelo usuário;

- O Cálculo do RMS (%) começa a sofrer incrementos lineares.

### 3.3.1 Erro Médio Quadrático Como Critério de Parada

Segundo Macêdo (1996), o processo de retroanálise consiste num procedimento iterativo, que é concluído quando o ajuste entre as bacias medida e calculada atende a um critério pré-estabelecido. Existem vários critérios limitando o erro entre deflexões medida e calculada durante o processo iterativo para o ajuste da bacia; dentre estes foi escolhido para o RETROPAV a Raiz Média Quadrática, RMS, conforme ilustrado na Equação 24.

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{\sum \left[ 100x \left( \frac{d_m - d_c}{d_m} \right) \right]^2}{n}} \quad (24)$$

Onde:

$d_m$  – Deflexão medida em campo com o levantamento deflectométrico;

$d_c$  – Deflexão calculada pelo programa de análise tensão/deformação.

### 3.3.2 Quantidade de Iterações Como Critério de Parada

Uma vez que o programa RETROPAV utiliza iterações para realização do processo de retroanálise, a limitação deste critério é importante, pois tem o objetivo de impedir que o programa entre em algum "loop" iterativo, fazendo com que a solução não possa ser disponibilizada ao usuário, como também para economizar tempo de processamento, uma vez que cada iteração do programa utiliza aproximadamente 5 segundos.

### 3.3.3 Convergência Contínua do RMS (%) Como Critério de Parada

Após vários testes realizados com o RETROPAV, foi evidenciado que, devido à formulação do algoritmo de convergência do programa, em função da configuração da carga e da bacia de deflexão, chega-se a uma quantidade de iterações que alcança sua convergência máxima (menor RMS), e logo depois este critério começa a sofrer incrementos lineares. Com o objetivo de combater este comportamento do programa, foi implementado critério de parada, onde o

programa termina a retroanálise quando a solução começa a apresentar valores de RMS crescentes.

## Capítulo 4

### 4. Retroanálise Com o RETROPAV

Para avaliar os resultados apresentados pelo RETROPAV procedeu-se a retroanálise de várias bacias de deflexão obtida do FWD. Não foi possível a verificação do comportamento do programa RETROPAV em bacias geradas com Viga Benkelman devido à indisponibilidade de dados referentes a este tipo de levantamento.

Os dados disponíveis para este estudo foram obtidos nos trabalhos realizados por Nóbrega (2003) e Cavalcante (2005), que apresentam resultados de ensaios deflectométricos realizados com FWD e de retroanálise realizada por vários programas diferentes. De todos os bancos de dados, foram escolhidos os segmentos homogêneos 01 apresentados pelos autores. Destes bancos de dados pode-se destacar o seguinte:

- Nóbrega (2003) apresenta em seu estudo, retroanálises com os programas REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L, de ensaios deflectométricos realizados com FWD nas Rodovias BR-277/PR e BR-408/MG. Desse banco de dados, escolheu-se o segmento homogêneo 01 de cada rodovia estudada, para verificar a precisão dos módulos retroanalizados pelo RETROPAV e compará-lo aos demais programas estudados por Nóbrega (2003).
  - BR-277/PR – segmento Curitiba – Paranaguá
    - Foi escolhido o segmento homogêneo 01 (SH-01), referente às estacas 51099 a 52500, cujas bacias deflectométricas estão mostradas em Nóbrega (2003).
  - BR-408/MG – segmento Ataléia – Carlos Chagas
    - Foi escolhido o segmento homogêneo 01, referente às estacas 3767 a 5600, cujas bacias deflectométricas estão mostradas em Nóbrega (2003).
- Cavalcante (2005) em seu estudo, apresenta retroanálise com os programas RETROANA, EVERCALC5 e ELMOD, de ensaios deflectométricos realizados com FWD na Rodovia BR-230/PB. Desse banco de dados, escolheu-se o segmento homogêneo 01, lado direito.

- BR-230/PB – Lote II
  - Foi escolhido o segmento homogêneo 01, lado direito, referente às estacas 4002 a 4118, cujas bacias deflectométricas estão ilustradas em Cavalcante (2005).

#### 4.1 Retroanálise Com 3 Camadas

A retroanálise da BR-277/PR foi realizada com o programa RETROPAV para a estrutura apresentada por Nóbrega (2003), que considerou sua estrutura composta por 3 camadas, cujos parâmetros estão mostrados na Figura 4.1. O pavimento da BR-277/PR possui como camadas constituintes um revestimento de concreto betuminoso usinado a quente, a base e sub-base de material granular, nas espessuras de 20,0 cm cada. Para este estudo as camadas granulares de base e sub-base foram consideradas como possuindo o mesmo comportamento, compondo assim a mesma camada, conforme apresentado abaixo.

	Espessura (cm)	Coef. de Poisson	Faixa de Módulos(MPa)	
			Mínimo	Máximo
Revestimento	12	0,25	1000	5000
Base	40	0,35	50	500
Subleito	inf.	0,45	50	500

**Figura 4.1 – Estrutura adotada no Programa RETROPAV, Referente a BR-277/PR (NÓBREGA, 2003).**

Os resultados da retroanálise estão apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Retroanálise dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, das Bacias Deflectométricas da BR-277/PR, com o Programa RETROPAV.**

Estacas	Distâncias Radiais (cm)							Camada 1			Camada 2			Camada 3			RMS %
	0	20	30	45	60	90	150	MR	Poisson	Espessura	MR	Poisson	Espessura	MR	Poisson	Espessura	
	Deflexões (x0,01mm)							MPa	-	cm	MPa	-	cm	MPa	-	cm	
51099	32	21	17	12	9	6	3	3310	0,25	12	266	0,35	40	203	0,45	inf.	7,8
51200	58	39	30	22	15	10	5	1793	0,25	12	136	0,35	40	121	0,45	inf.	6,68
51299	27	19	16	12	9	6	3	4278	0,25	12	305	0,35	40	203	0,45	inf.	9,28
51399	26	16	12	7	4	1	1	2892	0,25	12	195	0,35	40	964	0,45	inf.	20,3
51482	38	29	25	20	15	10	4	3665	0,25	12	230	0,35	40	122	0,45	inf.	17,96
51600	36	25	20	14	9	5	2	2656	0,25	12	184	0,35	40	240	0,45	inf.	17,42
51700	39	29	23	16	10	5	2	3185	0,25	12	128	0,35	40	240	0,45	inf.	16,02
51800	56	40	32	24	17	10	6	1925	0,25	12	130	0,35	40	121	0,45	inf.	4,35
51900	43	31	25	18	13	8	5	2551	0,25	12	170	0,35	40	152	0,45	inf.	3,73
52001	32	22	17	12	8	5	4	2221	0,25	12	353	0,35	40	174	0,45	inf.	9,97
52102	28	20	17	13	8	7	4	3348	0,25	12	395	0,35	40	174	0,45	inf.	9,69
52200	60	46	38	27	18	11	7	1459	0,25	12	128	0,35	40	110	0,45	inf.	9,35
52299	33	22	16	11	7	4	3	2419	0,25	12	208	0,35	40	296	0,45	inf.	9,24
52399	28	20	16	13	9	6	4	3102	0,25	12	345	0,35	40	203	0,45	inf.	6,43
52500	58	41	32	23	17	9	5	1685	0,25	12	120	0,35	40	134	0,45	inf.	6,38

Estão mostrados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 histogramas realizados com os valores de MR retroanalizados das camadas de revestimento, base e subleito, com o programa RETROPAV, em conjunto com os apresentados por Nóbrega (2003) com base na retroanálise realizada pelos programas REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L.

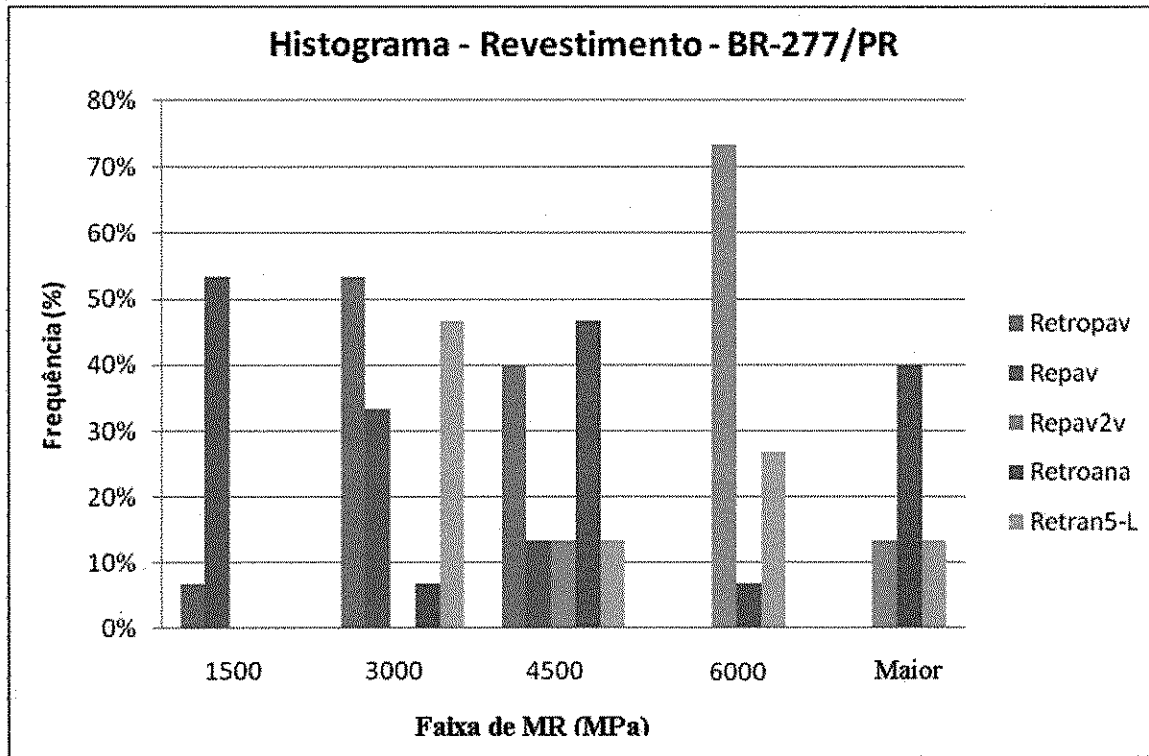


Figura 4.2 – Histograma dos MR Retroanalizados do Revestimento do SH-01 da BR-277/PR.

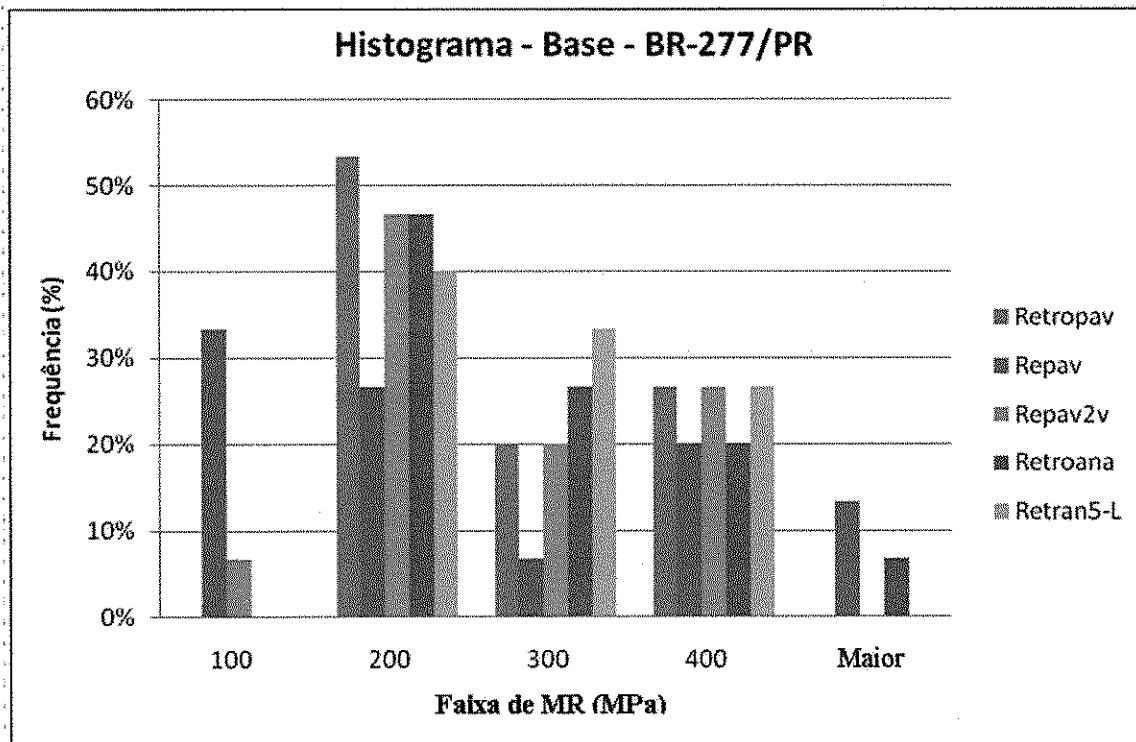
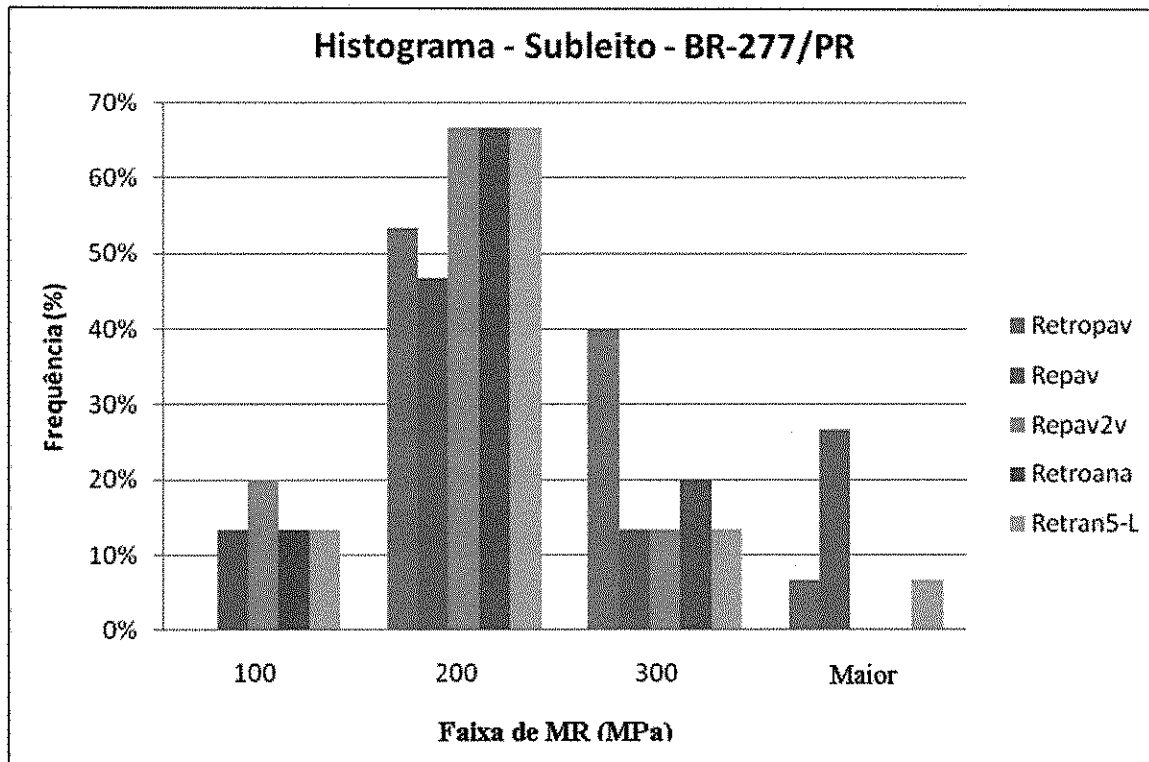


Figura 4.3: Histograma dos MR Retroanalizados da Base do SH-01 da BR-277/PR.





**Figura 4.4 – Histograma dos MR retroanalizados do subleito do SH-01 da BR-277/PR.**

Pode-se verificar nos histogramas apresentados a diversidade do comportamento do SH-01 em relação ao programa utilizado para realizar a retroanálise dos módulos resilientes das camadas. Percebe-se que no revestimento têm-se as maiores diferenças na distribuição dos valores de MR. Os vê-se que os programas RETROPAV e REPAV apresentaram maior quantidade de valores de MR menores que 4.500 MPa. Este comportamento do RETROPAV é atribuído à faixa de MR implementada no programa RETROPAV, no seu processo iterativo, para a determinação dos MR das camadas. Os programas RETROANA e REPAV2V apresentam maior quantidade de módulos com valores maiores que 4.500 MPa. Pode-se atribuir este comportamento ao processo de cada programa, uma vez que o banco de dados do REPAV e REPAV2V é o mesmo, sendo a única diferença entre os programas a implementação realizada por Fonseca (2002), de atribuição de uma faixa de MR para as camadas. Logo, a faixa de valor de MR utilizada pelo programa REPAV2V condicionou suas respostas para essa camada, comportamento análogo ao do programa RETROANA, que possui metodologia iterativa de determinação dos MR retroanalizados, mas inseridos dentro de uma faixa modular pré-estabelecida pelo usuário.

Com relação ao histograma realizado com os valores de MR retroanalizados para a camada de base, observa-se da Fig. 4.3 um comportamento mais aproximado entre os programas RETROPAV, RETROANA e RETRAN5-L. Atribuí-se este comportamento à metodologia iterativa utilizada por estes programas para a determinação dos MRs das camadas estudadas. Já com

relação aos valores de MR da camada do subleito, percebe-se um comportamento relativamente semelhante entre os programas analisados.

Na Tabela 4.2 está mostrado o tratamento estatístico dos dados de MR retroanalisados, demonstrando valores coerentes com os resultados apresentados por Nóbrega (2003), que demonstra que os MR retroanalisados para a camada de base estão na mesma ordem de grandeza, enquanto que o RETROPAV ilustra valor elevado para a camada de subleito. Isto pode ter ocorrido devido ao processo de iteração contínua de todos os valores de MR na retroanálise realizada pelo RETROPAV. Apresenta também valor moderado para o revestimento, embora de ordem de grandeza divergente dos valores apresentados pelos demais programas.

**Tabela 4.2 – Análise Estatística dos MR Retroanalisados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETAN5-L, para o SH-01 da BR-277/PR.**

MR (MPa)	Revestimento	Base	Subleito
<b>Análise Estatística - MR RETROPAV</b>			
Média	2699	219	231
Desvio Padrão	801	93	210
Coefficiente de Variação	30%	42%	91%
Mínimo	1459	1195	1104
Máximo	4278	395	964
<b>Análise Estatística - MR REPAV</b>			
Média	1789	216	219
Desvio Padrão	1252	161	117
Coefficiente de Variação	70%	75%	53%
Mínimo	393	32	97
Máximo	4311	551	415
<b>Análise Estatística - MR REPAV V2</b>			
Média	5245	213	153
Desvio Padrão	888	98	54
Coefficiente de Variação	17%	46%	35%
Mínimo	3823	82	84
Máximo	7691	369	280
<b>Análise Estatística - MR RETROANA</b>			
Média	4863	229	160
Desvio Padrão	1576	96	46
Coefficiente de Variação	32%	42%	29%
Mínimo	2499	106	95
Máximo	7000	426	236
<b>Análise Estatística - MR RETRAN5-L</b>			
Média	3900	249	179
Desvio Padrão	1780	95	77
Coefficiente de Variação	46%	38%	43%
Mínimo	1750	110	100
Máximo	7000	380	400

Podemos então destacar que os valores de MR para a camada do revestimento apresentaram valores distintos, enquanto que os valores de MR da camada de base foram bem aproximados, voltando a diferir quando da determinação dos valores de MR para o subleito. Este comportamento diferenciado com relação a camada de revestimento e subleito pode ser atribuído as metodologias utilizadas por cada programa durante o processo de retroanálise, devendo estes valores serem validados através de ensaios de laboratório para verificação de sua acurácia.

A retroanálise da BR-418/MG foi também realizada usando-se o programa RETROPAV para a estrutura apresentada por Nóbrega (2003), que considerou sua estrutura como sendo composta por 3 camadas, cujos parâmetros estão apresentados na Figura 4.5. O pavimento desta rodovia é constituído de um revestimento em tratamento superficial duplo, com uma base de material granular de 15,0 cm e uma sub-base de material granular de 20,cm. Para este estudo, Nóbrega (2003) considerou o TSD e a camada de base como uma única camada, com espessura de 18,0 cm.

	Espessura (cm)	Coef. de Poisson	Faixa de Módulos(MPa)	
			Mínimo	Máximo
Revestimento	18	0,25	1000	5000
Base	20	0,35	50	500
Subleito	inf.	0,45	50	500

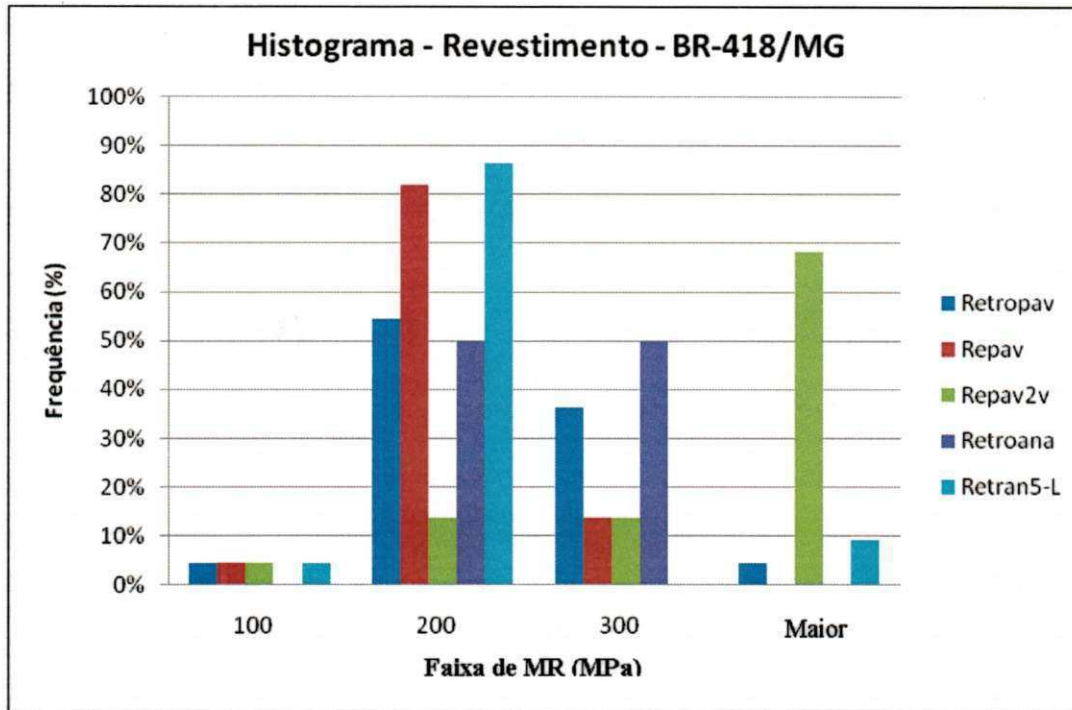
**Figura 4.5 – Estrutura adotada no Programa RETROPAV, Referente à BR-418/MG.**

Os resultados da retroanálise estão apresentados na Tabela 4.3.

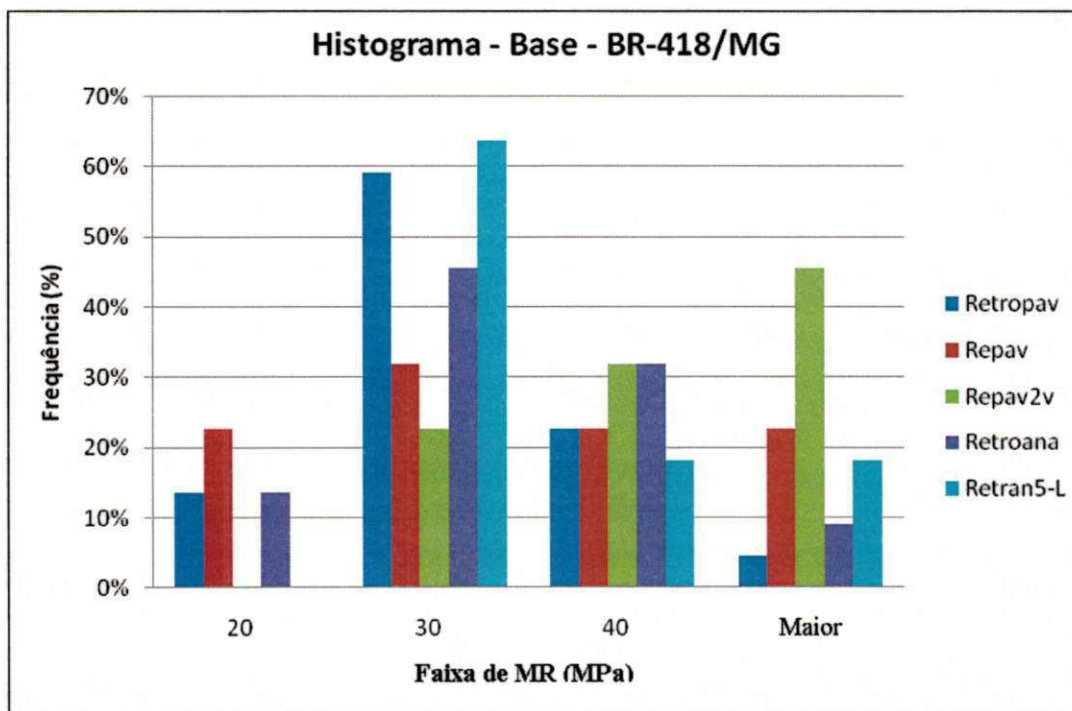
**Tabela 4.3 – Retroanálise dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, das Bacias Deflectométricas da BR-418/MG, com o Programa RETROPAV.**

Estacas	Distâncias Radiais (cm)							Camada 1			Camada 2			Camada 3			RMS
	0	20	30	45	60	90	150	MR	Poisson	Espessura	MR	Poisson	Espessura	MR	Poisson	Espessura	
	Deflexões (x0,01mm)							MPa	-	cm	MPa	-	cm	MPa	-	cm	%
3767	114	67	36	13	5	4	3	213	0,35	18	34	0,35	20	245	0,45	inf.	21,21
3840	116	67	38	15	5	4	3	209	0,35	18	34	0,35	20	245	0,45	inf.	20,7
3921	143	91	54	21	8	3	2	231	0,35	18	18	0,35	20	253	0,45	inf.	15,56
4000	159	95	58	25	9	4	3	166	0,35	18	22	0,35	20	183	0,45	inf.	11,6
4081	166	104	64	25	9	5	4	161	0,35	18	19	0,35	20	178	0,45	inf.	12,79
4160	170	110	67	29	11	6	4	163	0,35	18	18	0,35	20	155	0,45	inf.	10,73
4240	134	69	37	18	5	2	3	180	0,35	18	29	0,35	20	286	0,45	inf.	12,77
4320	153	86	43	17	6	5	4	153	0,35	18	27	0,35	20	192	0,45	inf.	21
4402	244	80	44	16	5	4	4	69	0,35	18	32	0,35	20	240	0,45	inf.	16,74
4480	122	69	40	18	10	7	5	224	0,35	18	38	0,35	20	152	0,45	inf.	14,58
4560	90	45	24	7	3	3	3	376	0,35	18	50	0,35	20	325	0,45	inf.	44,38
4640	151	86	49	22	11	8	7	195	0,35	18	27	0,35	20	130	0,45	inf.	20,88
4811	160	83	44	14	4	2	2	158	0,35	18	22	0,35	20	323	0,45	inf.	16,35
4883	187	94	52	19	7	4	4	126	0,35	18	22	0,35	20	216	0,45	inf.	12,11
5040	156	107	78	48	30	18	12	240	0,35	18	29	0,35	20	64	0,45	inf.	7,02
5122	135	79	45	19	8	6	5	189	0,35	18	30	0,35	20	168	0,45	inf.	20,21
5204	143	81	50	23	9	6	4	188	0,35	18	28	0,35	20	167	0,45	inf.	12,26
5281	119	64	34	12	4	3	2	194	0,35	18	33	0,35	20	299	0,45	inf.	15,76
5360	137	82	52	25	12	7	6	210	0,35	18	28	0,35	20	147	0,45	inf.	11,19
5441	126	71	40	16	6	3	3	205	0,35	18	28	0,35	20	285	0,45	inf.	11
5520	138	88	53	22	10	6	5	190	0,35	18	26	0,35	20	165	0,45	inf.	12,92
5600	113	65	36	12	4	2	2	231	0,35	18	29	0,35	20	384	0,45	inf.	16,43

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 estão mostrados os histogramas obtidos com os valores de MR retroanalizados das camadas de revestimento, base e subleito, com o programa RETROPAV, em conjunto com os MR apresentados por Nóbrega (2003), para a retroanálise realizada pelos programas REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L.

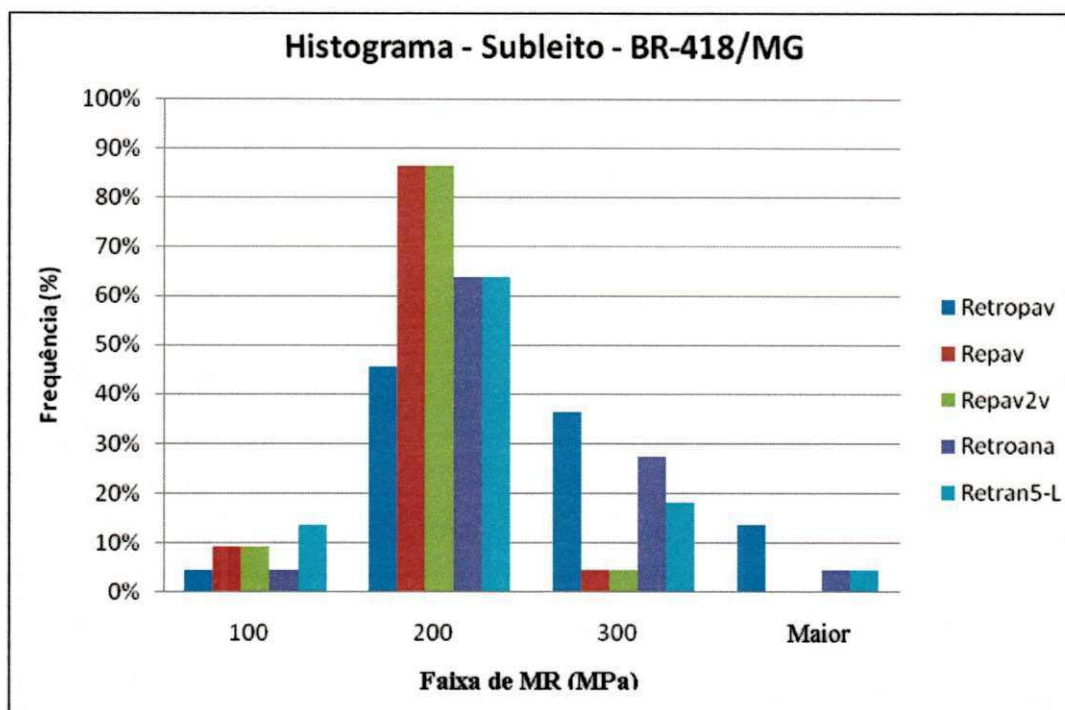


**Figura 4.6 – Histograma dos Valores do MR Retroanalizados do Revestimento do SH-01 da BR-418/MG.**



**Figura 4.7 – Histograma dos Valores do MR Retroanalizados da Base do SH-01 da BR-418/MG.**





**Figura 4.8 – Histograma dos Valores de MR Retroanalizados do Subleito do SH-01 da BR-418/MG.**

Da figura 4.8 se pode destacar que no histograma dos módulos do revestimento a maior quantidade de módulos retroanalizados foi pelos programas RETROPAV, RETROANA, RETRAN5-L e REPAV, se concentramos na faixa de 200 MPa, enquanto que o REPAV2V apresentou maior quantidade de valores fora da faixa de estudo. Este comportamento do REPAV2V pode ser atribuído, à faixa de valores de MR adotado neste programa para a retroanálise dos módulos resilientes desta camada.

Na camada de base vê-se que os programas RETROPAV, RETROANA e RETRAN5-L apresentam quantidades de valores de MR aproximados, denotando comportamento semelhantes, enquanto o REPAV e REPAV2V apresentaram maior quantidade de valores maiores que 30 MPa, estes resultados apresentados pelo REPAV e REPAV2V podem ser atribuídos ao banco de dados utilizado no caso em estudo, uma vez que a única diferença entre as versões deste programa é a possibilidade de adotar faixas de módulos na 2ª versão. Com relação ao histograma dos módulos da camada de subleito pode-se perceber certo comportamento uniforme entre os programas RETROPAV, RETROANA e RETRAN5-L. Pode-se atribuir o comportamento aproximado destes programas a metodologia aplicada para a determinação dos valores de MR, uma vez que o RETROPAV, o RETROANA e o RETRAN5L determinam os módulos através de métodos iterativos.

Na Tabela 4.4 é apresentado o tratamento estatístico dos módulos retroanalizados, demonstrando módulos coerentes com os resultados apresentados por Nóbrega (2003), que demonstra que os

módulos retroanalizados para a camada de base estão na mesma ordem de grandeza, enquanto que o RETROPAV ilustra valor elevado para a camada de subleito, que como discutido anteriormente, é devido ao processo iterativo contínuo de todas as camadas do pavimento realizado pelo RETROPAV.

Com relação à camada de revestimento, os valores de MR apresentados estão na mesma ordem de grandeza dos programas RETROANA e RETRAN5-L, destoando com relação aos MR apresentados pelos programas REPAV e REPAV2V. Isto pode ser atribuído ao método de retroanálise utilizado, vez que o RETROPAV, o RETROANA e o RETRAN5-L são programas iterativos, enquanto que o fundamento de funcionamento do RETRAN e RETAN2V é baseado em banco de dados.

**Tabela 4.4 – Análise Estatística dos Valores de MR Retroanalizados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETAN5-L, para o SH-01 da BR-418/MG.**

MR (MPa)	Revestimento	Base	Subleito
<b>Análise Estatística - MR RETROPAV</b>			
Média	194	28	218
Desvio Padrão	56	7	77
Coefficiente de Variação	29%	26%	35%
Mínimo	69	18	64
Máximo	376	50	384
<b>Análise Estatística - MR REPAV</b>			
Média	159	30	138
Desvio Padrão	41	12	36
Coefficiente de Variação	26%	38%	26%
Mínimo	89	16	54
Máximo	268	61	204
<b>Análise Estatística - MR REPAV V2</b>			
Média	314	39	145
Desvio Padrão	115	11	39
Coefficiente de Variação	36%	28%	27%
Mínimo	60	23	60
Máximo	497	65	228
<b>Análise Estatística - MR RETROANA</b>			
Média	202	30	182
Desvio Padrão	28	9	66
Coefficiente de Variação	14%	31%	36%
Mínimo	132	18	58
Máximo	267	57	383
<b>Análise Estatística - MR RETRAN5-L</b>			
Média	207	33	178
Desvio Padrão	56	12	73
Coefficiente de Variação	27%	37%	41%
Mínimo	50	25	60
Máximo	350	70	320

## 4.2 Retroanálise Com 4 Camadas

A retroanálise da BR-230/PB foi realizada com o programa RETROPAV para a estrutura apresentada por Cavalcante (2005), que considerou sua estrutura composta por 3 e 4 camadas, cujos parâmetros estão mostrados nas Figuras 4.9 para 3 camadas e 4.10 para 4 camadas. Sendo o pavimento constituído de um revestimento em CBUQ, uma base de 20,0cm de brita graduada simples, uma sub-base de material granular.

	Espessura (cm)	Coef. de Poisson	Faixa de Módulos(MPa)	
			Mínimo	Máximo
Revestimento	12	0,25	1000	7000
Base	40	0,35	50	500
Subleito	inf.	0,45	50	500

**Figura 4.9 – Estrutura Adotada no Programa RETROPAV, Referente a BR-230/PB, Composta por 3 Camadas.**

	Espessura (cm)	Coef. de Poisson	Faixa de Módulos(MPa)	
			Mínimo	Máximo
Revestimento	12	0,25	1000	7000
Base	20	0,35	50	500
Sub-base	20	0,35	50	500
Subleito	inf.	0,45	50	500

**Figura 4.10 – Estrutura Adotada no Programa RETROPAV, Referente a BR-230/PB, Composta por 4 Camadas.**

Os resultados da retroanálise estão apresentados na Tabela 4.5 e 4.6.



**Tabela 4.5 – Retroanálise com 3 Camadas dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, Lado Direito, das Bacias Deflectométricas da BR-230/PB, Lote II.**

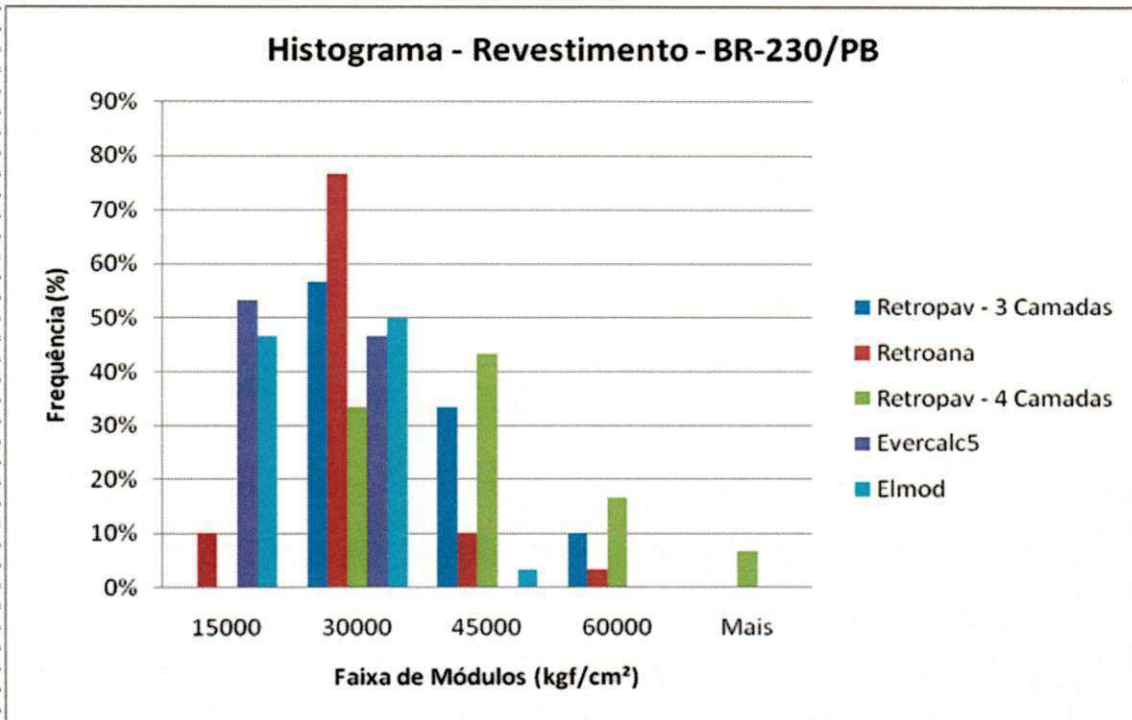
Estacas	Distâncias Radiais (cm)							Camada 1			Camada 2			Camada 3			RMS
	0	20	30	45	60	90	150	MR	Poisson	Espessura	MR	Poisson	Espessura	MR	Poisson	Espessura	
	Deflexões (x0,01mm)							MPa	-	cm	MPa	-	cm	MPa	-	cm	%
4002	53,2	36,5	28,4	18,1	12,8	6,3	3,2	3490	0,25	12	78	0,35	40	205	0,45	inf.	5,59
4006	48,7	35,2	26,4	15,3	10,0	4,1	2,0	3247	0,25	12	71	0,35	40	300	0,45	inf.	7,38
4010	28,5	19,0	13,9	8,0	5,4	2,5	1,3	5572	0,25	12	143	0,35	40	498	0,45	inf.	7,8
4014	34,4	21,8	15,6	8,9	6,2	2,9	1,2	4517	0,25	12	126	0,35	40	440	0,45	inf.	12,32
4018	46,5	32,3	24,1	13,5	8,4	2,9	0,9	2614	0,25	12	88	0,35	40	388	0,45	inf.	27,74
4022	47,1	31,1	22,9	12,7	7,9	2,8	1,2	2413	0,25	12	93	0,35	40	392	0,45	inf.	12,37
4026	54,2	33,5	25,1	14,7	10,2	4,4	2,1	2173	0,25	12	93	0,35	40	264	0,45	inf.	7,15
4030	43,2	28,2	20,1	11,1	7,3	3,2	1,5	2766	0,25	12	106	0,35	40	359	0,45	inf.	7,82
4034	43,7	32,3	24,5	14,8	9,9	4,6	2,1	3161	0,25	12	97	0,35	40	262	0,45	inf.	6,99
4038	44,3	32,7	24,8	14,5	9,6	4,0	2,0	2992	0,25	12	92	0,35	40	296	0,45	inf.	5,83
4042	56,0	37,6	28,0	16,4	11,0	4,9	2,3	2277	0,25	12	83	0,35	40	245	0,45	inf.	6,14
4046	47,4	31,5	22,8	12,3	7,6	2,9	1,2	2452	0,25	12	90	0,35	40	385	0,45	inf.	13,6
4050	40,2	29,0	22,0	13,1	8,9	4,0	2,0	3350	0,25	12	107	0,35	40	299	0,45	inf.	3,95
4054	44,1	31,4	24,6	15,2	10,4	4,6	2,2	3049	0,25	12	101	0,35	40	261	0,45	inf.	6,25
4058	52,6	35,8	26,7	15,9	10,9	5,1	2,5	2459	0,25	12	89	0,35	40	233	0,45	inf.	4,89
4062	44,7	34,0	26,8	16,7	11,6	5,3	2,7	3191	0,25	12	94	0,35	40	226	0,45	inf.	4,19
4066	51,0	31,0	22,0	11,5	7,0	2,9	1,5	2111	0,25	12	91	0,35	40	368	0,45	inf.	9,4
4070	28,7	14,9	9,7	5,3	3,5	1,9	1,0	2132	0,25	12	271	0,35	40	590	0,45	inf.	8,64
4074	41,9	30,7	23,5	14,7	10,6	5,6	3,0	3484	0,25	12	111	0,35	40	222	0,45	inf.	5,93
4078	35,2	27,1	21,9	14,0	9,9	5,0	2,8	4255	0,25	12	124	0,35	40	246	0,45	inf.	4,52
4082	36,5	25,2	18,9	11,6	8,3	4,3	2,4	3706	0,25	12	132	0,35	40	275	0,45	inf.	6,11
4086	26,6	18,9	15,5	10,5	7,9	4,4	2,2	5829	0,25	12	201	0,35	40	294	0,45	inf.	9,38
4090	54,4	35,7	24,2	14,1	10,0	5,7	3,0	1998	0,25	12	103	0,35	40	207	0,45	inf.	9,75
4094	56,1	33,1	21,4	12,2	8,3	4,6	2,2	2078	0,25	12	98	0,35	40	253	0,45	inf.	14,29
4098	46,7	32,4	24,1	14,2	10,0	5,1	2,7	2868	0,25	12	101	0,35	40	236	0,45	inf.	5,21
4102	51,2	32,9	23,9	15,1	11,1	6,2	3,2	2444	0,25	12	113	0,35	40	191	0,45	inf.	8,51
4106	49,7	36,1	26,6	15,8	11,0	4,9	2,4	2727	0,25	12	87	0,35	40	249	0,45	inf.	5,5
4110	52,3	32,7	22,6	11,5	7,3	3,7	2,2	2222	0,25	12	92	0,35	40	309	0,45	inf.	10,73
4114	48,0	31,9	22,7	12,6	8,3	3,8	2,2	2544	0,25	12	95	0,35	40	298	0,45	inf.	6,68
4118	43,7	31,3	23,8	14,5	10,1	4,9	2,4	3161	0,25	12	105	0,35	40	246	0,45	inf.	4,97

**Tabela 4.6 – Retroanálise com 4 Camadas dos Módulos de Resiliência do Segmento Homogêneo 1, Lado Direito, das Bacias Deflectométricas da BR-230/PB, Lote II.**

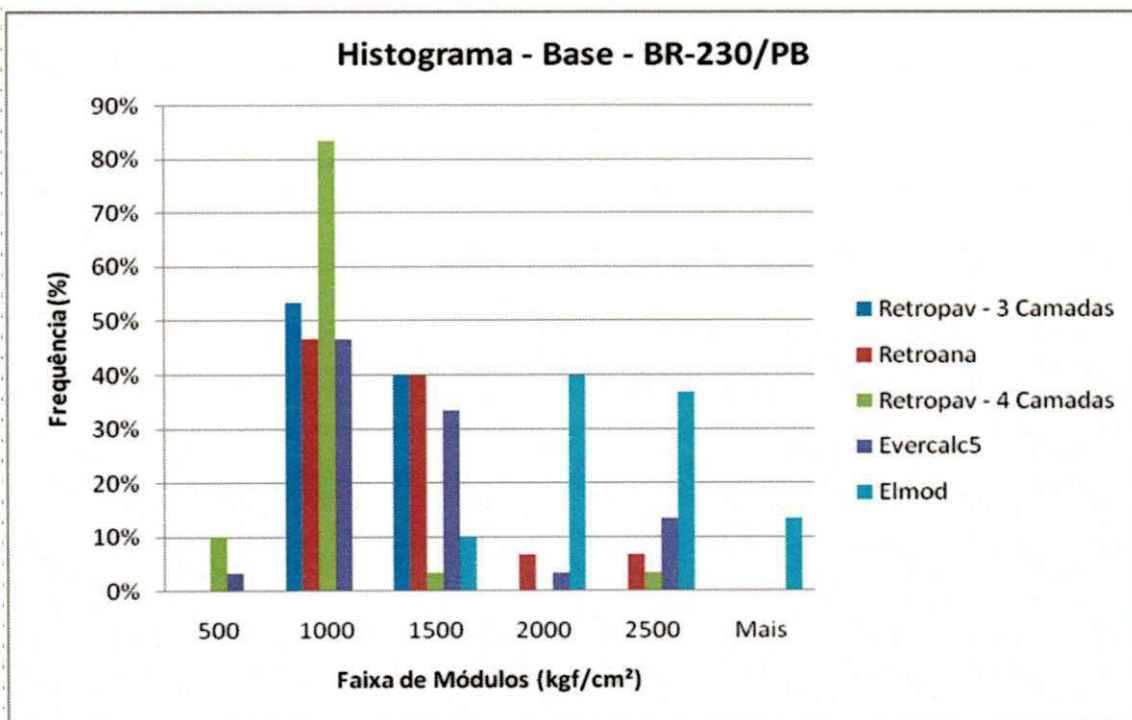
Estacas	Distâncias Radiais (cm)							Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4			RMS %
	0	20	30	45	60	90	150	MR MPa	Poisson -	Espessura cm	MR MPa	Poisson -	Espessura cm	MR MPa	Poisson -	Espessura cm	MR MPa	Poisson -	Espessura cm	
	Deflexões (x0,01mm)																			
4002	53,2	36,5	28,4	18,1	12,8	6,3	3,2	3492	0,25	12	53	0,35	20	106	0,45	20	199	0,45	inf.	5,59
4006	48,7	35,2	26,4	15,3	10,0	4,1	2,0	3526	0,25	12	48	0,35	20	96	0,45	20	294	0,45	inf.	7,38
4010	28,5	19,0	13,9	8,0	5,4	2,5	1,3	6066	0,25	12	97	0,35	20	193	0,45	20	488	0,45	inf.	7,8
4014	34,4	21,8	15,6	8,9	6,2	2,9	1,2	4923	0,25	12	86	0,35	20	171	0,45	20	430	0,45	inf.	12,32
4018	46,5	32,3	24,1	13,5	8,4	2,9	0,9	3584	0,25	12	52	0,35	20	104	0,45	20	409	0,45	inf.	27,74
4022	47,1	31,1	22,9	12,7	7,9	2,8	1,2	3440	0,25	12	55	0,35	20	110	0,45	20	416	0,45	inf.	12,37
4026	54,2	33,5	25,1	14,7	10,2	4,4	2,1	2992	0,25	12	55	0,35	20	110	0,45	20	271	0,45	inf.	7,15
4030	43,2	28,2	20,1	11,1	7,3	3,2	1,5	3798	0,25	12	62	0,35	20	124	0,45	20	373	0,45	inf.	7,82
4034	43,7	32,3	24,5	14,8	9,9	4,6	2,1	4314	0,25	12	57	0,35	20	113	0,45	20	274	0,45	inf.	6,99
4038	44,3	32,7	24,8	14,5	9,6	4,0	2,0	4087	0,25	12	54	0,35	20	108	0,45	20	312	0,45	inf.	5,83
4042	56,0	37,6	28,0	16,4	11,0	4,9	2,3	3415	0,25	12	48	0,35	20	97	0,45	20	264	0,45	inf.	6,14
4046	47,4	31,5	22,8	12,3	7,6	2,9	1,2	3367	0,25	12	53	0,35	20	106	0,45	20	403	0,45	inf.	13,6
4050	40,2	29,0	22,0	13,1	8,9	4,0	2,0	4577	0,25	12	63	0,35	20	125	0,45	20	313	0,45	inf.	3,95
4054	44,1	31,4	24,6	15,2	10,4	4,6	2,2	4167	0,25	12	59	0,35	20	118	0,45	20	272	0,45	inf.	6,25
4058	52,6	35,8	26,7	15,9	10,9	5,1	2,5	3583	0,25	12	50	0,35	20	10	0,45	20	249	0,45	inf.	4,89
4062	44,7	34,0	26,8	16,7	11,6	5,3	2,7	4214	0,25	12	53	0,35	20	105	0,45	20	235	0,45	inf.	4,19
4066	51,0	31,0	22,0	11,5	7,0	2,9	1,5	2911	0,25	12	54	0,35	20	108	0,45	20	378	0,45	inf.	9,4
4070	28,7	14,9	9,7	5,3	3,5	1,9	1,0	2275	0,25	12	212	0,35	20	424	0,45	20	580	0,45	inf.	8,64
4074	41,9	30,7	23,5	14,7	10,6	5,6	3,0	4723	0,25	12	67	0,35	20	135	0,45	20	230	0,45	inf.	5,93
4078	35,2	27,1	21,9	14,0	9,9	5,0	2,8	5796	0,25	12	72	0,35	20	143	0,45	20	258	0,45	inf.	4,52
4082	36,5	25,2	18,9	11,6	8,3	4,3	2,4	4895	0,25	12	82	0,35	20	164	0,45	20	281	0,45	inf.	6,11
4086	26,6	18,9	15,5	10,5	7,9	4,4	2,2	7924	0,25	12	127	0,35	20	254	0,45	20	302	0,45	inf.	9,38
4090	54,4	35,7	24,2	14,1	10,0	5,7	3,0	2427	0,25	12	74	0,35	20	148	0,45	20	204	0,45	inf.	9,75
4094	56,1	33,1	21,4	12,2	8,3	4,6	2,2	2101	0,25	12	77	0,35	20	155	0,45	20	245	0,45	inf.	14,29
4098	46,7	32,4	24,1	14,2	10,0	5,1	2,7	2904	0,25	12	80	0,35	20	160	0,45	20	229	0,45	inf.	5,21
4102	51,2	32,9	23,9	15,1	11,1	6,2	3,2	2648	0,25	12	86	0,35	20	171	0,45	20	187	0,45	inf.	8,51
4106	49,7	36,1	26,6	15,8	11,0	4,9	2,4	2747	0,25	12	69	0,35	20	137	0,45	20	240	0,45	inf.	5,5
4110	52,3	32,7	22,6	11,5	7,3	3,7	2,2	2231	0,25	12	73	0,35	20	145	0,45	20	297	0,45	inf.	10,73
4114	48,0	31,9	22,7	12,6	8,3	3,8	2,2	2557	0,25	12	75	0,35	20	149	0,45	20	288	0,45	inf.	6,68
4118	43,7	31,3	23,8	14,5	10,1	4,9	2,4	3200	0,25	12	83	0,35	20	166	0,45	20	239	0,45	inf.	4,97



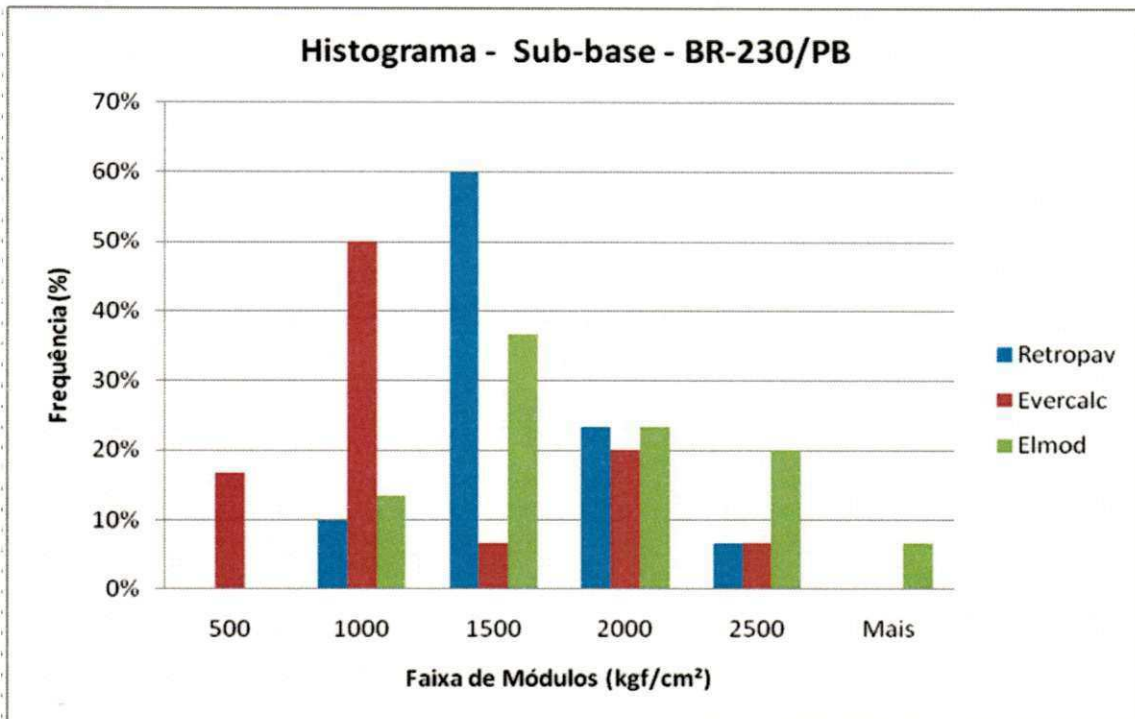
Nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 são mostrados histogramas realizados com os MR retroanalizados das camadas de revestimento, base, sub-base e subleito, com o programa RETROPAV, comparado com os MR apresentados por Cavalcante (2005), na retroanálise realizada pelos programas RETROANA, EVERCALC5 e ELMOD4.



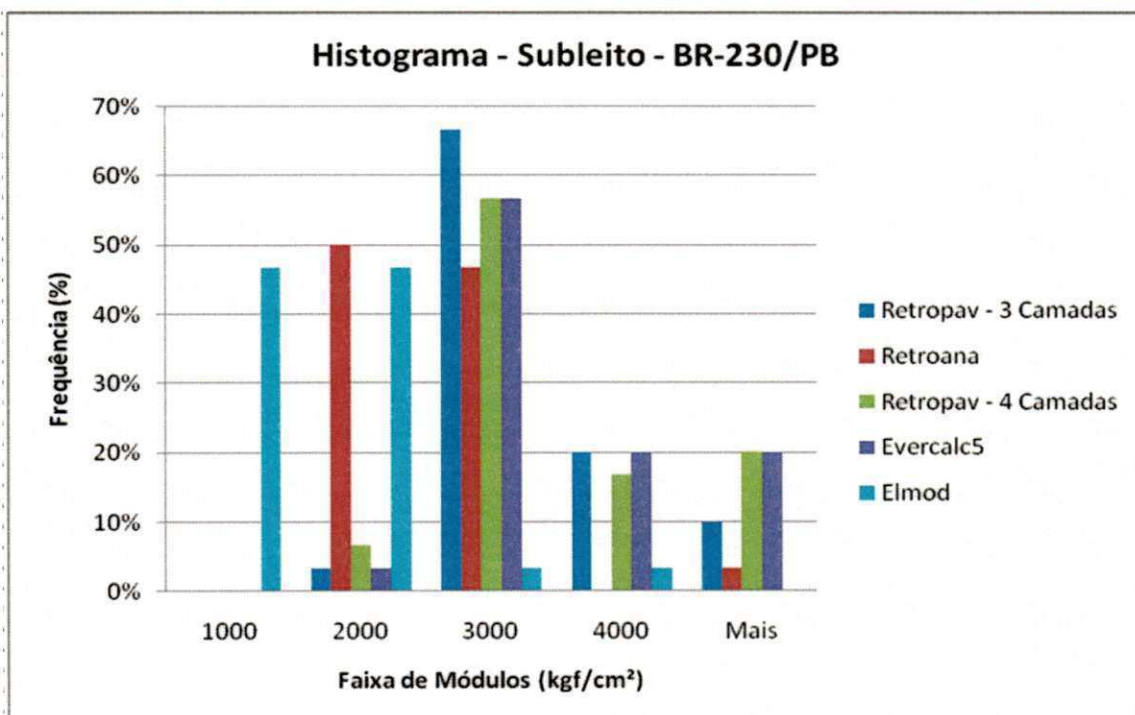
**Figura 4.11 – Histograma dos MR Retroanalizados do Revestimento do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.**



**Figura 4.12 – Histograma dos MR Retroanalizados da Base do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.**



**Figura 4.13 – Histograma dos MR Retroanalizados da Sub-base do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.**



**Figura 4.14 – Histograma dos MR Retroanalizados do Subleito do SH-01 do Lado Direito da BR-230/PB, Lote II.**

Com relação ao histograma realizado com os módulos retroanalizados do revestimento da BR-230, da figura 4.11 pode-se perceber que a quantidade de valores apresentados pelo RETROPAV maiores que 4.500 MPa se destaca, enquanto que o EVERCALC5 e o ELMOD4, apresentaram uma maior quantidade, de valores menores que 4.500 MPa. Este comportamento ocorre em parte devido a utilização, pelo RETROPAV, das faixas de MR apresentadas nas figuras 4.9 e 4.10 para a realização da retroanálise, que diferem daquelas utilizadas por Cavalcante (2005) em seu estudo, como também devido ao processo iterativo contínuo que o RETROPAV adota durante o processo de determinação dos valores de MR de todas as camadas constituintes do pavimento.

Com relação aos MR da base, pode-se destacar que o ELMOD4 superestima este material, apresentando grande quantidade de módulos com valores maiores que 150 MPa. Já para os demais programas, é observado comportamento análogo com relação aos valores de MR para esta camada. Este comportamento do ELMOD4 é esperado, vez que em seu algoritmo interno foi implementado um fator de correção determinado através da relação experimental entre valores apresentados pelo ELMOD4 e valores determinados em laboratório para os módulos do subleito, com a finalidade de adequar os resultados apresentados pelo programa aos solos típicos dos EUA.

No que se refere à sub-base, é perceptível como os programas consideram de forma diferenciada a contribuição desta camada. Enquanto o RETROPAV concentra os valores em torno de 150 MPa, o EVERCALC5 concentra mais valores na faixa de 100 MPa, enquanto que o ELMOD4 superestima o comportamento desta camada, apresentando maior quantidade de módulos acima de 150 MPa. Este comportamento do ELMOD4 é esperado, tendo por fundamento este programa adotar fator de correção para adequar os valores de MR calculados para o subleito, logo ao utilizar este programa com em estruturas de pavimento brasileiras, o fator implementado não se adéqua a nossa realidade, subestimando desta maneira os valores de MR apresentados para o subleito. Com relação à diferença apresentada entre o RETROPAV e o EVERCALC5, ela é decorrente da metodologia para a determinação do valor do MR em ambos os programas. No RETROPAV ela é iterativa e dependente da deflexão que rege sua convergência, enquanto que no EVERCALC5 ela é dependente de uma relação modular com relação ao MR calculado para o subleito.

No histograma dos módulos retroanalizados do subleito, pode-se perceber da figura 4.14 como se comportam distintos alguns dos programas. O ELMOD4 subestima o módulo da camada de subleito, apresentando grande quantidade de valores abaixo de 200 MPa, fator este esperado, conforme comentado anteriormente; o RETROANA apresenta quase a totalidade dos módulos do subleito entre os valores 200 MPa e 300 MPa, o que pode ser decorrente da faixa de valores

adotada por este programa para a retroanálise dos MR do subleito; enquanto que os programas RETROPAV e EVERCALC5 demonstraram comportamento muito parecido.

Na Tabela 4.7 é apresentado o tratamento estatístico dos valores de MR retroanalizados. Com base neste tratamento, são destacadas as seguintes considerações:

- Da retroanálise realizada com 3 camadas, pode-se verificar que o MR da base do RETROPAV é da mesma ordem de grandeza que o apresentado pelo RETROANA, embora os valores de MR do revestimento e do subleito tenham sido diversos, comportamento esperado uma vez que o processo de retroanálise do RETROANA considera a aproximação camada a camada, diferente do RETROPAV que permite uma variabilidade contínua dos valores de MR de todas as camadas por iteração.
- Com relação à retroanálise realizada com 4 camadas, pode-se verificar que o valor do MR do subleito é muito próximo ao valor apresentado pelo EVERCALC5, divergindo com relação aos valores apresentados pelo ELMOD4, uma vez que o ELMOD4 utiliza fator de correção implementado para os subleitos dos EUA e que quando utilizado nos subleitos brasileiros apresenta valores considerados subestimados, como também do RETROANA, uma vez que a faixa de valores utilizada para a realização da análise do RETROANA difere da utilizada por este autor no presente estudo.

**Tabela 4.7 – Análise Estatística dos Valores de MR Retroanalizados pelos Programas RETROPAV – 3 Camadas, RETROANA, RETROPAV – 4 camadas, EVERCALC5 e ELMOD4, para o SH-01 da BR-230/PB, Lote II.**

Análise Estatística - MR RETROPAV - 3 Camadas				
Média	3043	109	-	301
Desvio Padrão	959	39	-	92
Coeficiente de Variação	32%	36%	-	30%
Mínimo	1998	71	-	191
Máximo	5829	271	-	590
Análise Estatística - MR REANA				
Média	2419	119	-	212
Desvio Padrão	807	69	-	62
Coeficiente de Variação	33%	58%	-	29%
Mínimo	1086	52	-	144
Máximo	4973	407	-	480
Análise Estatística - MR RETROPAV - 4 Camadas				
Média	3763	72	145	305
Desvio Padrão	1280	32	63	91
Coeficiente de Variação	34%	44%	44%	30%
Mínimo	2101	48	96	187
Máximo	7924	212	424	580
Análise Estatística - EVERCALC5				
Média	1680	121	109	319
Desvio Padrão	325	78	79	96
Coeficiente de Variação	19%	64%	73%	30%
Mínimo	1500	44	34	200
Máximo	2815	401	350	500
Análise Estatística - ELMOD4				
Média	1711	220	159	122
Desvio Padrão	682	105	60	52
Coeficiente de Variação	40%	48%	38%	43%
Mínimo	760	114	54	76
Máximo	3778	607	298	317

### 4.3 Análise Crítica dos Resultados Obtidos

Levando-se em consideração que os erros associados aos critérios de parada dos diversos programas aqui estudados são diferentes, podendo citar como exemplo, o REPAV, que utiliza o erro médio absoluto, enquanto o RETROANA utiliza a média dos erros relativos, e o RETROPAV e RETRAN5-L utilizam a raiz média quadrática, como também, que cada programa utiliza rotinas distintas para o cálculo das tensões e deformações durante as iterações associadas aos métodos de retroanálise, para avaliar os valores retroanalizados pelos programas estudados, elegeu-se o programa JULEA como balizador.

O programa JULEA foi escolhido para realizar a reconstituição das bacias deflectométricas por ser programa de fácil utilização, de disponibilidade gratuita, que realiza o cálculo das tensões e deformações utilizando o método das diferenças finitas, adotando o meio contínuo. Não foi utilizado o ELSYM5 com o intuito de evitar condicionamento das respostas apresentadas pelo programa RETROPAV, uma vez que este utiliza o ELSYM5 como sub-rotina. Outros programas poderiam ter sido utilizados, como o Kenlayer, ou o Fepave 2V, tendo-se o cuidado de levar em consideração as vantagens e limitações de cada programa.

Todos os valores de MR retroanalizados foram então utilizados para reconstituir as bacias de deflexão em suas respectivas estruturas, e a partir daí, calculou-se o RMS de cada resultado, avaliando-se assim a aproximação realizada por cada programa pelo mesmo critério, o RMS(%).

Os resultados estão apresentados nos Anexos 2, 3, e 4, donde se pode destacar os resultados apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10.



**Tabela 4.8 – Análise Estatística dos RMS(%) Obtidos com a Reconstituição das Bacias Deflectométricas do Segmento Homogêneo 01, da BR-277/PR, com o Programa JULEA, Utilizando os Valores de MR Retroanalisados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L.**

Estacas	RETROPAV %	REPAV %	REPAV2V %	RETROANA %	RETRAN5-L %
51099	26,4	52,4	56,3	40,4	48,2
51200	24,1	51,6	54,5	40,1	39,1
51299	22,0	86,1	87,8	57,2	73,6
51399	59,2	64,2	69,5	26,6	26,2
51482	16,5	44,3	64,5	26,4	78,6
51600	16,2	35,2	50,2	29,8	75,4
51700	24,5	147,7	120,4	82,2	21,7
51800	27,9	88,8	63,1	26,9	45,6
51900	14,2	228,3	267,7	33,5	95,6
52001	15,3	13,0	18,6	31,5	13,0
52102	53,1	93,3	81,3	36,8	41,4
52200	20,1	23,6	20,2	18,6	17,3
52299	27,8	187,7	199,4	76,2	148,6
52399	11,5	85,4	92,5	49,1	94,3
52500	5,5	30,7	9,6	13,0	11,3
Média	24,3	82,2	83,7	39,2	55,3
Desvio Padrão	14,5	61,9	68,8	19,7	38,6
Coefficiente de Variação	0,6	0,8	0,8	0,5	0,7
Mínimo	5,5	13,0	9,6	13,0	11,3
Máximo	59,2	228,3	267,7	82,2	148,6

Como pode ser percebido, para os dados em estudo referentes à BR-277/PR, reconstituídos com o programa JULEA, o valor da média do RMS(%) apresentado pelo RETROPAV é o menor entre os apresentados na Tabela 4.8. Com relação aos programas REPAV e o REPAV2V, sabe-se que eles trabalham a partir de banco de dados, gerando soluções aproximadas, utilizando os dados existentes, sem a possibilidade de ir além do seu campo amostral. Já com relação ao RETROANA e RETRAN5-L, esta diferença deve-se em parte à implementação de método diferenciado de aproximação no RETROPAV, como também da diversidade dos critérios de parada adotado pelos programas.

Tanto o RETROANA quanto o RETRAN5-L começam suas iterações primeiramente verificando o MR da camada do subleito, para, a partir deste valor, procurar pelos MR das demais camadas, com objetivo de minimizar o critério de parada; enquanto que no RETROPAV esta aproximação é feita iterativamente em todas as camadas desde o início da retroanálise, fator este que pode ter contribuído para a diferença apresentada.

Vale também salientar que esses valores de RMS também sofrem influência direta dos critérios de parada adotados pelos programas, podemos verificar este comportamento numa melhor aproximação no RMS médio do RETRAN5-L em relação ao RMS médio do RETROANA. Esse comportamento é atribuído ao critério de parada, vez que no RETROANA é a média dos erros relativos, enquanto que no RETRAN5-L é a raiz da média da soma das diferenças absolutas entre as deflexões, enquanto que o critério adotado no RETROPAV é e o da raiz da média da soma dos erros relativos entre as deflexões. Assim, por possuírem critérios de parada diferentes, os valores de MR retroanalizados, independente dos algoritmos utilizados para realizar a retroanálise, podem parar de avançar na sua convergência por ter atendido a esse critério. Cavalcante (2005) afirma ser a raiz da média da soma dos erros relativos o melhor critério para corresponder os valores dos módulos das camadas retroanalizados aos valores que as camadas efetivamente possuem quando solicitadas "in situ".

O mesmo caso acontece nos dados obtidos pela reconstituição das bacias deflectométricas do segmento homogêneo 01 da BR-418/MG, apresentados na Tabela 4.9. Percebe-se que o RMS do RETROPAV apresenta melhores valores, sendo que neste caso o RETROANA apresenta melhor aproximação que o RETRAN5-L, segundo a modelagem realizada com o JULEA. Pode-se verificar que é uma repetição da aproximação realizada no segmento homogêneo 01 da BR-277/PR.

**Tabela 4.9 – Análise Estatística dos RMS(%) Obtidos com a Reconstituição das Bacias Deflectométricas do Segmento Homogêneo 01, da BR-418/PR, com o Programa JULEA, Utilizando os Valores de MR Retroanalisados pelos Programas RETROPAV, REPAV, REPAV2V, RETROANA e RETRAN5-L.**

Estacas	RETROPAV %	REPAV %	REPAV2V %	RETROANA %	RETRAN5-L %
3767	26,4	52,4	56,3	40,4	48,2
3840	24,1	51,6	54,5	40,1	39,1
3921	22,0	86,1	87,8	57,2	73,6
4000	59,2	64,2	69,5	26,6	26,2
4081	16,5	44,3	64,5	26,4	78,6
4160	16,2	35,2	50,2	29,8	75,4
4240	24,5	147,7	120,4	82,2	21,7
4320	27,9	88,8	63,1	26,9	45,6
4402	14,2	228,3	267,7	33,5	95,6
4480	15,3	13,0	18,6	31,5	13,0
4560	53,1	93,3	81,3	36,8	41,4
4640	20,1	23,6	20,2	18,6	17,3
4811	27,8	187,7	199,4	76,2	148,6
4883	11,5	85,4	92,5	49,1	94,3
5040	5,5	30,7	9,6	13,0	11,3
5122	19,6	31,9	26,4	23,6	17,1
5204	15,9	25,6	36,4	26,5	19,3
5281	27,6	103,7	102,1	55,1	22,2
5360	47,8	13,1	20,7	20,1	19,3
5441	10,8	60,8	71,8	43,3	9,3
5520	12,4	30,3	31,0	21,5	13,2
5600	19,9	115,6	117,6	52,7	74,6
Média	23,6	73,3	75,5	37,8	45,7
Desvio Padrão	13,7	56,5	61,2	18,1	36,7
Coefficiente de Variação	0,6	0,8	0,8	0,5	0,8
Mínimo	5,5	13,0	9,6	13,0	9,3
Máximo	59,2	228,3	267,7	82,2	148,6

Com relação aos dados referentes ao segmento homogêneo 01, lado direito da BR-230/PB, Lote II, apresentados na Tabela 4.10, pode-se verificar que a retroanálise com 3 camadas com o RETROPAV apresentou melhores resultados, seguido pelo RETROPAV com 4 camadas, o EVERCAL5, o RETROANA e o ELMOD4. A aproximação realizada pelo ELMOD4 era esperada, vez que esse programa possui internamente um fator de correção para o módulo do subleito, subestimando seu valor, com o objetivo de adequar aos valores de módulos resilientes apresentados por essa camada nos Estados Unidos, onde ele é mais difundido.

**Tabela 4.10 – Análise Estatística dos RMS(%) Obtidos com a Reconstituição das Bacias Deflectométricas do Segmento Homogêneo 01 Lado Direito, da BR-230, Lote II, com o Programa JULEA, Utilizando os Valores de MR Retroanalisados pelos Programas RETROPAV, RETROANA EVERCALC5 e ELMOD.**

Estacas	RETROPAV	RETROANA	RETROPAV	RETROANA	RETRANS-L
	3 Camadas		4 Camadas		
	%	%	%	%	%
4002	4,4	15,7	6,7	12,5	86,9
4006	3,5	26,2	6,9	15,5	186,0
4010	7,6	112,7	10,7	11,9	61,4
4014	13,3	100,9	16,2	13,4	132,0
4018	29,7	106,4	22,0	20,4	396,6
4022	13,2	41,7	10,1	16,4	265,6
4026	6,1	34,5	21,9	13,7	149,7
4030	6,8	69,7	13,0	13,0	171,2
4034	5,6	15,1	7,7	15,0	124,3
4038	3,6	48,4	6,5	15,4	177,2
4042	5,7	36,0	7,8	12,8	155,8
4046	13,0	104,5	14,0	15,6	241,9
4050	3,0	78,1	7,2	14,2	110,5
4054	5,3	56,5	5,0	33,3	141,7
4058	5,3	29,0	9,3	13,7	118,7
4062	5,1	11,1	6,5	14,6	107,6
4066	7,0	66,1	14,2	13,4	198,4
4070	6,7	160,5	6,1	16,0	114,3
4074	3,5	23,7	7,9	11,2	40,5
4078	9,6	33,7	7,1	17,9	66,3
4082	4,6	44,2	9,3	10,3	43,7
4086	3,5	66,5	4,4	12,2	67,2
4090	8,7	6,4	10,6	15,0	13,2
4094	13,8	38,4	14,4	15,3	35,6
4098	4,4	13,1	3,6	11,1	68,5
4102	7,1	9,7	8,1	9,1	39,8
4106	5,7	10,6	7,2	14,8	148,7
4110	10,5	62,9	9,0	12,3	56,8
4114	6,3	50,4	4,7	16,2	90,5
4118	4,0	21,9	5,2	13,8	97,4
Média	7,5	49,8	9,4	14,7	123,6
Desvio Padrão	5,3	37,4	4,7	4,2	80,5
Coefficiente de Variação	0,7	0,8	0,5	0,3	0,7
Mínimo	3,0	6,4	3,6	9,1	13,2
Máximo	29,7	160,5	22,0	33,3	396,6

Com relação ao RETROANA, é possível relacionar o elevado valor da média do RMS tanto ao seu critério de parada quanto ao seu algoritmo interno de retroanálise, conforme discutido anteriormente. Com relação ao valor apresentado para a média do RMS obtido pelo EVERCALC5, associou-se este elevado valor diretamente aos valores de MR atribuídos ao revestimento.

Em pesquisa realizada, Cavalcante (2005) propôs a correção da temperatura nos valores de MR da camada do revestimento, demonstrando que estes apresentam valores compatíveis com os valores apresentados pelo RETROPAV.

#### **4.4 Avaliação do Erro Médio Quadrático Como Critério de Parada**

Segundo Alkasawneh (2007), o módulo de resiliência é uma das características mais importantes dos materiais que compõem o pavimento. Vários métodos têm sido propostos para estimar o MR; desde métodos com base em ensaios de flexão em laboratório, métodos baseados em equações empíricas, métodos de propagação de ondas, até determinações através de ensaios deflectométricos, com auxílio da Viga Benkelman ou do (FWD).

Mesmo existindo equações empíricas para a determinação do módulo de resiliência dos materiais constituintes dos pavimentos, estes ainda não podem ser determinados com precisão para as reais condições de campo, devido principalmente à grande variabilidade das condições de carga e das condições do tráfego. Além disso, alguns dos parâmetros de entrada das equações empíricas não podem ser determinados para um pavimento existente. Assim, para efeitos práticos, o módulo resiliente deve ser determinado utilizando métodos indiretos, para que os efeitos dos diferentes fatores de campo sejam levados em consideração.

A análise de levantamentos deflectométricos através da retroanálise é, atualmente, o método não-destrutivo mais amplamente utilizado na engenharia de pavimentos. O levantamento de dados envolve a aplicação de cargas quase estáticas (Viga Benkelman) ou por impacto (FWD), e de medição do deslocamento vertical da superfície do pavimento em diferentes locais, usando extensômetro ou sensores LVDT's. Esse método, porém, sofre as várias limitações da retroanálise. Sabe-se que o processo de retroanálise dos módulos resilientes não fornece uma solução única e, em muitos casos, é diretamente dependente do usuário.

#### 4.4.1 Erro Médio Quadrático

Os módulos de elasticidade retroanalizados são comumente determinados a partir de um conjunto de módulos iniciais, faixa de valores que o material constituinte do pavimento apresenta, em uma metodologia que tem como objetivo reproduzir a bacia de deformação medida a partir do ensaio com FWD. A fim de minimizar o erro entre as deflexões medidas e calculadas, a relação erro médio quadrático (RMS) é utilizada para controlar a convergência dos MR retroanalizados e avaliar a aceitação ou rejeição do conjunto final dos MR do pavimento.

Quando o valor do RMS diminui, considera-se que a precisão do módulo de resiliência retroanalizado aumenta, à medida que o erro entre as deflexões medidas e calculadas diminui.

No Brasil, devido ao controle de qualidade efetuado na fase construtiva dos pavimentos menos rigoroso em comparação aos países desenvolvidos, um RMS de 5% é utilizado como um erro aceitável. Em geral, os resultados indicaram que valores de RMS inferiores a 3% têm pouco efeito sobre a média dos módulos retroanalizados. Na prática, valores de RMS superiores a 1% podem ser alcançados rapidamente. No entanto, acredita-se que quanto menor o RMS atingido, melhores serão os valores retroanalizados e, portanto, resultados mais precisos podem ser obtidos.

#### 4.4.2 Estudo de Retroanálise

Segundo Alkasawneh (2007), a maioria das pesquisas disponíveis investiga a diferença entre os valores de RMS para diferentes programas retroanalizados, o efeito de fatores externos sobre a qualidade dos dados de deflexão, o efeito da escolha de bons módulos iniciais sobre os valores de RMS, e os efeitos de fatores externos sobre os dados do FWD. No entanto, o efeito do módulo de resiliência retroanalizado, associados aos seus respectivos RMS, sobre o diagnóstico aplicado à estrutura em avaliação é pouco discutido.

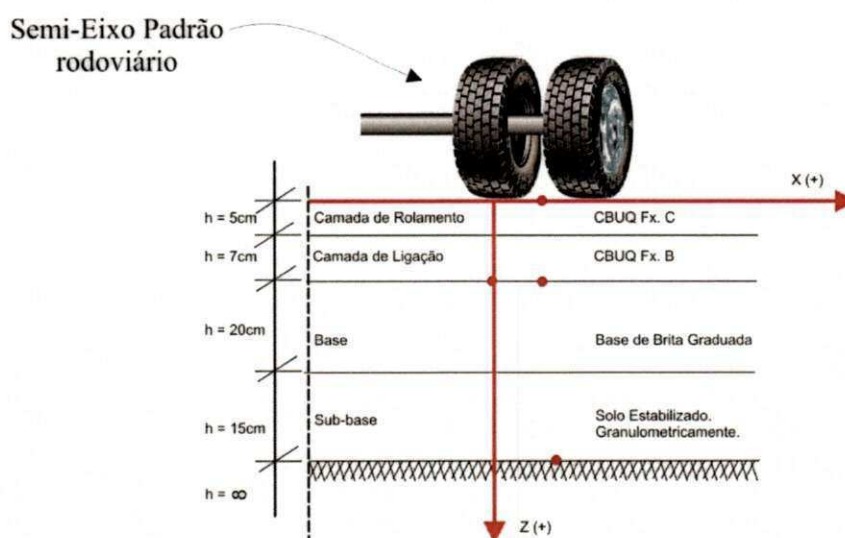
Para se estudar o efeito do RMS sobre o diagnóstico aplicado ao avaliar mecanisticamente o comportamento das camadas constituintes do pavimento, foi utilizado como exemplo a estrutura da rodovia federal BR-230, lote III, avaliada inicialmente por Cavalcante (2005), cuja seção está definida na Figura 4.15, para um tráfego com  $N=4,5 \times 10^7$ .





**Figura 4.15 – Seção do Pavimento da Rodovias BR-230PB, Lote III, Dimensionada para um Número de Repetições de Eixo Padrão de  $N = 4.50 \times 10^7$  (Cavalcante, 2005).**

Para a análise mecânica das tensões e deformações, foram utilizados os módulos resilientes obtidos através da retroanálise utilizando o programa RETROPAV, das bacias deflectométricas obtidas ente as estacas 4002 e 4118, do lado direito da rodovia, referentes ao segmento homogêneo 01, estudado por Cavalcante (2005). O resumo estatístico está na Tabela 4.11, para um carregamento de um eixo simples, de rodas duplas, carregado com 8,2tf, conforme mostrado na Figura 4.16.



**Figura 4.16 – Estrutura Utilizada para Computo de Tensões e Deformações (Cavalcante, 2005).**

**Tabela 4.11 – Resumo Estatístico das Bacias Deflectométricas Medidas entre as Estacas 4002 e 4118, na BR-230/PB, Lote III, Lado Direito.**

Segmentos Homogêneos	Carga	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Temperatura	
									Superfície	Ar
Dist. Radial (cm)	(kN)	0	20	30	45	60	90	150		
Quant. de valores	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Média	40	45	31	23	13	9	4	2	34	26
Desvio Padrão	0	8	6	4	3	2	1	1	0	0
Coef. de Variação (%)	1	18	18	19	21	22	26	30	0	0
Mínimo	39	27	15	10	5	3	2	1	34	26
Máximo	41	56	38	28	17	12	6	3	34	26

#### 4.4.3 Avaliação da Influência do Critério de Parada no Diagnóstico da Rodovia.

Foram realizadas sete retroanálises distintas para o mesmo conjunto de valores de MR, alimentando o programa RETROPAV com faixas de módulos distintos, o que resultou em sete conjuntos de módulos distintos que são apresentados nas Tabelas 4.12 a 4.18.

**Tabela 4.12 – Resumo Estatístico da Retroanálise 1.**

Camadas	Retroanálise 1				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2029	1000	7000	RMS adm. (%)	5
Base	117	50	500	Iterações max.	10
Sub-base	117	50	500	RMS (%)	5,89
Subleito	285	10	100	Iterações	10

No primeiro estudo de retroanálise foi utilizada faixa de módulos bastante abrangente para as camadas granulares, variando de 50MPa a 500MPa, fazendo com que a camada de base e sub-base tivessem seus valores dentro de um campo amostral bastante amplo.

**Tabela 4.13 – Resumo Estatístico da Retroanálise 2.**

Camadas	Retroanálise 2				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2479	1000	7000	RMS adm. (%)	5
Base	107	50	200	Iterações max.	10
Sub-base	107	50	200	RMS (%)	6
Subleito	289	10	100	Iterações	5



No segundo estudo de retroanálise foi utilizada faixa de módulos mais restrita aos valores apresentados pelo primeiro estudo, variando de 50MPa a 200MPa, fazendo com que a camada de base e sub-base tivessem seus valores dentro de um campo amostral bem mais restrito.

**Tabela 4.14 – Resumo Estatístico da Retroanálise 3.**

Camadas	Retroanálise 3				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2218	1000	4000	RMS adm. (%)	5
Base	113	50	200	Iterações max.	10
Sub-base	113	50	200	RMS (%)	7
Subleito	286	10	100	Iterações	10

No terceiro estudo procurou-se restringir mais o campo de variação do módulo do revestimento, adotando faixa de MR de 1000MPa a 4000MPa.

**Tabela 4.15 – Resumo Estatístico da Retroanálise 4.**

Camadas	Retroanálise 4				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2117	1000	7000	RMS adm. (%)	5
Base	115	10	500	Iterações max.	10
Sub-base	115	10	500	RMS (%)	7,48
Subleito	285	10	100	Iterações	10

No quarto estudo procurou-se aumentar a faixa de variação das camadas de base e sub-base da primeira retroanálise, diminuindo o menor valor de MR da faixa adotada, variando agora de 10MPa a 500MPa.

**Tabela 4.16 – Resumo Estatístico da Retroanálise 5.**

Camadas	Retroanálise 5				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2353	1000	7000	RMS adm. (%)	5
Base	113	50	500	Iterações max.	50
Sub-base	105	10	500	RMS (%)	6,09
Subleito	288	10	100	Iterações	34

A quinta retroanálise foi realizada adotando as condições iniciais aumentando a variabilidade unicamente da camada de sub-base, adotando a faixa de 10MPa a 500MPa.

**Tabela 4.17 – Resumo Estatístico da Retroanálise 6.**

Camadas	Retroanálise 6				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2353	1000	7000	RMS adm. (%)	5
Base	113	10	500	Iterações max.	50
Sub-base	105	50	500	RMS (%)	6,09
Subleito	288	10	100	Iterações	34

A sexta retroanálise foi realizada adotando as condições iniciais aumentando a variabilidade unicamente da camada da base, adotando a faixa de 10MPa a 500MPa.

**Tabela 4.18 – Resumo Estatístico da Retroanálise 7.**

Camadas	Retroanálise 7				
	MR (MPa)	Faixa de MR (MPa)		Critérios de Parada	
		Mod. mim.	Mod. Max.		
Revestimento	2455	1000	4000	RMS adm. (%)	5
Base	90,4	50	100	Iterações max.	10
Sub-base	150,8	50	200	RMS (%)	7,76
Subleito	282,6	10	100	Iterações	4

A sétima retroanálise foi realizada restringindo os valores das faixas de MR das camadas do revestimento, base e sub-base, para valores aproximados aos valores médios das retroanálises anteriores.

Conforme ilustrado na Tabela 4.19, utilizando o programa computacional ELSYM5 para o cálculo das tensões e deformações atuantes na estrutura, conjuntamente com o modelo proposto por Heukelom e Klomp (1962).

**Tabela 4.19 – Tensões Admissíveis e Efetivas no Topo do Subleito, Utilizando os Módulos Retroanalísados e o Modelo de Heukelom e Klomp (1962).**

Retroanálise	$\sigma_{adm}$ (MPa)	$\sigma_{ef}$ (MPa)	RMS Retroanálise (%)
1	0,269	0,051	5,89
2	0,272	0,049	6,00
3	0,270	0,050	7,00
4	0,269	0,051	7,48
5	0,272	0,050	6,09
6	0,272	0,050	6,09
7	0,267	0,050	7,76

Pode-se verificar que as tensões verticais no topo do subleito são sempre inferiores que a admissível, comportamento este esperado, uma vez que o método de dimensionamento utilizado foi o do DNER, que garante a integridade das camadas do pavimento com relação ao critério da deformabilidade.

Mas, conforme mostrado na Tabela 4.20, as deformações de tração na fibra inferior do revestimento são todas superiores à deformação de tração admissível, obtida a partir do modelo de Pinto (1991).

**Tabela 4.20 – Deformações de Tração Admissíveis e Efetivas na Fibra Inferior do Revestimento, Utilizando os Módulos Retroanalísados e o Modelo de Pinto (1991).**

Retroanálise	$\varepsilon_{adm}$ (mm/mm)	$\varepsilon_{ef}$ (mm/mm)	RMS Retroanálise (%)
1	1,04E-04	3,67E-04	5,89
2	1,04E-04	3,42E-04	6,00
3	1,04E-04	3,56E-04	7,00
4	1,04E-04	3,62E-04	7,48
5	1,04E-04	3,45E-04	6,09
6	1,04E-04	3,49E-04	6,09
7	1,04E-04	3,55E-04	7,76

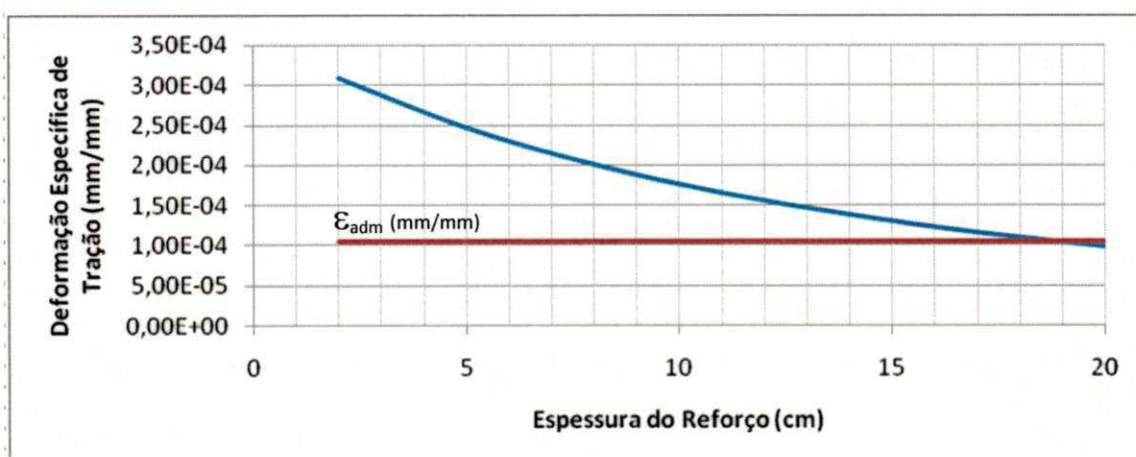
Uma vez avaliado o pavimento, é possível diagnosticar que existe uma incompatibilidade no comportamento mecânico da estrutura, verificado através da relação modular entre as camadas de revestimento e base, conforme identificado por Cavalcante (2005). Neste caso, o RMS não refletiu em diversidade de identificação do problema a que o pavimento está submetido. Na

perspectiva de verificar se o RMS pode refletir de alguma forma no diagnóstico, realizou-se o dimensionamento do reforço pelo método proposto pelo DNER PRO-11/79, pelo DNER PRO-269/94 e pelo método mecanístico, para cada conjunto de módulos retroanalizados.

O método mecanístico foi realizado modelando-se a estrutura do pavimento recebendo várias espessuras de reforço distintas, com módulo resiliente constante, de 3.000 MPa, sendo avaliada a deformação de tração na fibra inferior do revestimento, com o objetivo de determinar a espessura de revestimento necessária a garantir a vida de fadiga do pavimento durante o período de projeto. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.21, e são mostrados graficamente nas Figuras 4.17 a 4.23, para determinação da espessura de reforço necessário para garantir, com relação ao critério de fadiga, a vida útil do pavimento, conforme apresentado na Tabela 4.22.

**Tabela 4.21 – Deformações de Tração Determinada para Várias Espessuras de Reforço para os Sete Conjuntos de Módulos Retroanalizados.**

Retroanálise	Espessura do Reforço (cm)						
	2	5	8	11	14	17	20
	Deformação de tração (mm/mm)						
1	3,09E-04	2,47E-04	2,01E-04	1,65E-04	1,37E-04	1,16E-04	9,82E-05
2	2,88E-04	2,30E-04	1,86E-04	1,54E-04	1,28E-04	1,08E-04	9,19E-05
3	2,99E-04	2,39E-04	1,94E-04	1,60E-04	1,33E-04	1,11E-04	9,54E-05
4	3,04E-04	2,43E-04	1,98E-04	1,63E-04	1,35E-04	1,14E-04	9,69E-05
5	2,92E-04	2,33E-04	1,89E-04	1,56E-04	1,30E-04	1,10E-04	9,34E-05
6	2,93E-04	2,33E-04	1,89E-04	1,56E-04	1,30E-04	1,09E-04	9,31E-05
7	2,97E-04	2,35E-04	1,90E-04	1,56E-04	1,30E-04	1,09E-04	9,31E-05



**Figura 4.17 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 1.**





Figura 4.18 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 2.



Figura 4.19 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 3.



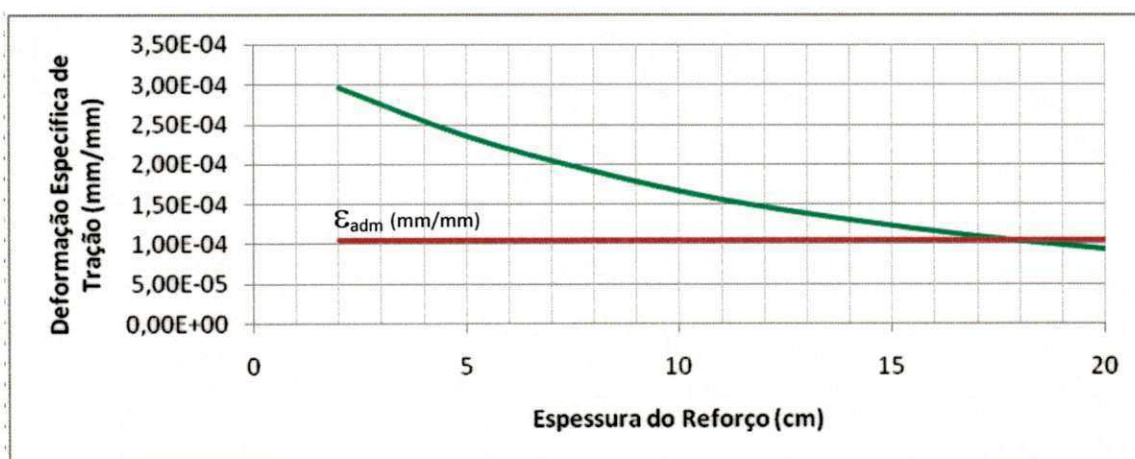
Figura 4.20 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 4.



**Figura 4.21 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 5.**



**Figura 4.22 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 6.**



**Figura 4.23 – Determinação da Espessura de Reforço Necessário para Garantir a Vida de Fadiga, Utilizando o Conjunto de Módulos Resultante da Retroanálise 7.**

Tem-se então, as seguintes espessuras de reforço, ilustradas na Tabela 4.22.

**Tabela 4.22 – Espessuras de Reforços pelos Métodos de DNER e pelo Método Mecanístico.**

Solução	Hr (cm)	RMS (%)	R\$/km	Relação Solução/Convivência
DNER PRO-11/79	7,50		178.966,92	65%
DNER PRO-269/94	6,50		157.679,98	57%
RETROANALISE 1	19,00	5,89	448.783,41	163%
RETROANALISE 2	17,50	6,00	412.576,65	150%
RETROANALISE 3	18,00	7,00	424.645,57	154%
RETROANALISE 4	18,50	7,48	436.714,49	158%
RETROANALISE 5	18,00	6,09	424.645,57	154%
RETROANALISE 6	18,00	6,09	424.645,57	154%
RETROANALISE 7	18,00	7,76	424.645,57	154%

Pode-se destacar que as espessuras determinadas pelos métodos convencionais, segundo a modelagem mecanística, não garantiriam a vida útil do pavimento; além disso, as espessuras de reforço são demasiadamente elevadas, tornando inviável sua aplicação. A correta solução seria a indicada por Cavalcante (2005), que consiste na mudança da rigidez da base da estrutura, compatibilizando os módulos de resiliência da estrutura.

Com relação às espessuras de reforço indicadas pelo método mecanístico, pode-se verificar que estas não são correlatas aos RMS obtidos com a retroanálise da bacia de deflexões, conforme ilustrado na Tabela 5.22. O custo das soluções de reforço foram calculadas utilizando como base os valores apresentados por Cavalcante (2005), que avalia a solução mais vantajosa para sanar o problema de trincamento prematuro sofrido pela rodovia. Cavalcante (2005) afirma que a solução seria a convivência com o problema, executando de 4 em 4 anos, durante a vida de projeto, um TSD com polímero na pista de rolamento. Utilizando por base o custo da solução de convivência com o problema, são determinados as relações percentuais entre a solução proposta e a solução de convivência elencada por Cavalcante (2005). Com base nestes dados, verificou-se que o diagnóstico dado pelo engenheiro pode sofrer influência direta do processo de retroanálise utilizado, sofrendo variação de até 13% em seu valor.

Este estudo mostra que a utilização do RMS não é suficiente para assegurar uma rigorosa retroanálise do módulo resiliente do pavimento. Principalmente, devido às grandes discrepâncias que podem existir no cálculo das tensões e deformações a partir dos valores retroanalizados. Como resultado, mesmo para valores de RMS próximos, os MR retroanalizados podem afetar

significativamente no diagnóstico da estimativa da vida de fadiga e deformação permanente em pavimentos flexíveis.

Pode-se então concluir, como afirmado por Alkasawne (2007), que o efeito do RMS é adequado unicamente para controlar a condição física da bacia de deflexão retroanalizada da medida no campo, não sendo este o único parâmetro para afirmação de bons MR retroanalizados. O principal parâmetro para a obtenção de valores acurados de MR está no engenheiro, agente do processo de retroanálise, da sua experiência e conhecimento, dos limites e critérios adotados pelos métodos de retroanálise utilizados, como também do comportamento dos materiais, validados em estudos realizados por outros pesquisadores ou verificados em estudos de laboratório.



## Capítulo 5

### 5. Conclusões e Sugestões

#### 5.1 Conclusões

1. A análise do processo de determinação dos módulos de resiliência das camadas constituintes do pavimento através da interpretação de ensaios defletoométricos, demonstraram que a avaliação estrutural de pavimentos tendo por base ensaios não-destrutivos é muito vantajosa.
2. Observou-se que a complexidade do espaço de soluções para os MR retroanalizados, mostraram que várias soluções podem ser indicadas para solucionar o mesmo problema, que tem por fundamento a aproximação, através de um algoritmo iterador, de uma bacia defletoométrica medida em campo e uma calculada por um programa de análise tensão/deformação.
3. É proposta nova metodologia para realização de retroanálise, implementando um algoritmo de aproximação que vincula a convergência do módulo de cada camada a uma deflexão.
4. Com relação ao critério de convergência, foi realizado estudo sobre o efeito do erro médio quadrático no processo de retroanálise dos módulos de resiliência do pavimento, demonstrando que não pode ser utilizado unicamente este critério para assegurar uma refinada retroanálise.
5. Verificou-se que a obtenção de valores acurados de MR depende em grande parte da participação do engenheiro, agente do processo de retroanálise, com base na sua experiência e conhecimento, dos limites e critérios adotados pelos métodos de retroanálise utilizados, como também do comportamento dos materiais, validados em estudos realizados por outros pesquisadores ou verificados em estudos de laboratório.

6. A avaliação do desempenho e da precisão da metodologia de retroanálise proposta com os resultados obtidos por metodologias existentes revelam que a análise de dados desta pesquisa é satisfatória.
7. Por fim, a implantação do método é feita através do programa de retroanálise RETROPAV, cuja elaboração está inserida no escopo da presente dissertação, cujo programa possui interface amigável ao usuário.

## **5.2 Sugestões para Continuidade desta Pesquisa**

1. A implementação de método de cálculo de deformações no próprio RETROPAV, alterando a sua estrutura, tornando-o mais célere, sem a necessidade de utilizar rotina externa, como também implementação de análise tensorial da estrutura utilizando os módulos resilientes indicados como solução do problema pelo RETROPAV.
2. Utilização de sub-rotina diferente, possibilitando realizar a retroanálise com programas que realizem a determinação das tensões e deformações através de métodos diferentes da usada pelo ELSYM5.
3. Implementação de interface onde o usuário possa escolher qual deflexão irá reger a convergência de cada camada constituinte do pavimento, tornando o método proposto flexível, em função da experiência do usuário.
4. Realizar retroanálise com o RETROPAV utilizando levantamentos deflectométricos obtidos com Viga Benkelman e comparar aos valores de outros programas, com a finalidade de avaliar a convergência do programa, como também a realização de estudo da convergência e acurácia do RETROPAV utilizando outros bancos de dados.
5. Possibilitar o RETROPAV a ler arquivos de saída do FWD, sem a necessidade de alimentar as deflexões bacia a bacia, como também implementar um arquivo de saída, que possua as soluções propostas pelo RETROPAV.

6. Implementar no RETROPAV a possibilidade de normalizar as bacias medidas com FWD, como também realizar o ajuste das bacias medidas por Viga Benkelman, utilizando a metodologia proposta por Albernaz (2005, apud FRITZEN, 2005).
7. Na visualização gráfica do RETROPAV, colocar grandezas dos eixos e as unidades.
8. Realizar comparação entre resultados apresentados pelo RETROPAV com amostras ensaiadas em laboratório para verificação da acurácia do programa.

## Referências Bibliográficas

AASHTO T 256-77 – “Standard Recommended Practice for Pavement Deflection Measurements”, 1977.

AASHTO. Guide for Design of Pavement structures. Washington, 1993.

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

ALBERNAZ, C.A.V., MOTTA, L.M.G., MEDINA, J. “Retroanálise: Uma Útil Ferramenta na Avaliação Estrutural de Pavimentos”. In: 29a Reunião Anual de Pavimentação. V.1, pp. 399-417, Cuiabá, MG, Brasil, 1995.

ALKASAWNEH, W.: Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms, PhD Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, USA, 2007.

ASTM - "AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 4695/1987" – General Pavement Deflection Measurements , ASTM, EUA, 1987.

ASTM - "AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D 5858/1996" – "Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory" , ASTM, EUA, 1996

ASTM - "AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS D5340/1993" – Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys , ASTM, EUA, 1992.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. E 206-72: standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data. USA, 1979.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B., Pavimentação Asfáltica – Formação Básica Para Engenheiros, Rio de Janeiro – RJ, 2007.

BODARE, A. and ORRJE, O. "Impulse Load on a Circular Surface in an Infinite Elastic Body- Closed Solution According to the Theory of Elasticity", Report No. 19, Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 1985.

BRIGGS, R. C. & NAZARIAN, S., "Effects of Unknown Rigid Subgrade Layers on Backcalculation of Pavement Moduli and Projections of Pavement Performance", 68th Annual TRB Meeting, Washington DC, 1989.

BURMISTER, DONALD M. "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems". Journal of Applied Physics, 1945.

CARDOSO, S.H. "Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos". In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. V. 2, pp. 377-401, Curitiba, MG, Brasil, 1995.

CARNEIRO, F.B.L. "Benkelman Beam – Auxiliary Instrument of the Maintenance Engineer". HRR 129. Highway Research Record, pp. 28-59, Washington, 1966.

CAVALCANTE, C.M.B., CAVALCANTE, F.B., MACÊDO, J.A.G., ARAÚJO, J.L., MACÊDO, R.M., "Estudo Comparativo entre Programas de Retroanálise". In: 38ª Reunião Anual de Pavimentação. Manaus, AM, Brasil, 2007.

CAVALCANTE, F. P., "Avaliação das Características Funcionais e Estruturais da Rodovia BR-230/PB - Lote III", Tese de Mestrado, UFPE, Recife, 2005.

CERATTI, J. A. P. Curso de extensão: mecânica dos pavimentos rodoviários flexíveis. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, p 87, 1997. (Caderno Técnico)

CHANG, D. KANG, Y.V., ROESSET, J.M. & STOKOE II, K.H., "Deflection Basins Obtained with Dynaflect and Falling Weight Deflectometer Tests", Transportation Research Board, TRR- 1355, 1992.

DAROUS, J. "Estudo Comparativo entre Sistemas de Cálculo de Tensões e Deformações Utilizados em Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Novos". Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

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

DNER ME - 024/94 Método de Ensaio – Pavimento – Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

DNER ME - 061/94. Pavimento - delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman, 1994.

DNER PRO – 11/79 Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B. Rio de Janeiro, 1979.

DNER PRO - 164/94 (DNER,1994a). "A calibração e Controle de Sistemas Medidores da Irregularidade de Superfície de Pavimentos". Rio de Janeiro. 1994.

DNER PRO - 269/94 Procedimento - Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV (Método da Resiliência). Rio de Janeiro, 1994.

DNER PRO - 273/96. Determinação das deflexões utilizando deflectômetro de impacto do tipo " Fallinig Weight Deflectometer (FWD). Rio de Janeiro, 1996.

FABRÍCIO, J. M., GONÇALVES, E.A., FABRÍCIO, O. F. "Metodologia Não Destrutiva para Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis Através da Interpretação das Bacias de Deformação". In: 23 a Reunião Anual de Pavimentação. V. 3, pp. 1415-1446, Florianópolis, SC, Brasil, 1988.

FABRÍCIO, J.M., SILVA, G.A., GONÇALVES, E.A., et. al. "Método Simplificado de Retroanálise em Pavimentos Flexíveis". In: 28a Reunião Anual de Pavimentação. V.1,pp. 658-682, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1994.

FARIAS, M.M. & MONTEIRO, S.A. "Utilização de modelos elásticos lineares e não lineares na retroanálise de propriedades de pavimentos". In: 30a Reunião Anual de Pavimentação. V.2, pp. 791-809., Salvador, BA, Brasil, 1996.

FONSECA, J.L.G., "Um Método de Retroanálise de Bacias de Deflexão de Pavimentos". Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

FRANCO, F.A.C.P. Um Sistema para Análise de Pavimentos Asfálticos. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

HEUKELOM, W., and KLOMP, A.J.G. "Dynamic testing as a means of controlling pavement during and after construction," Proceedings of the 1st international conference on the structural design of asphalt pavement, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1962.

HOFFMAN, M.S. "Loading Mode Effects on Pavement Deflections". Journal of Transportation Engineering, Vol. 109, 1983.

HUANG, Y.H. Pavement analysis and design. I Title. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

MACÊDO, J. A. G. Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

MAHONEY, J.P.; COETZEE, N.F.; STUBSTAD, R.N. & LEE, S.W., "A Performance Comparison of Selected Backcalculation Computer Programs", Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, A.J.Bush III & Y. Baladi Eds., American Society for Testing and Materials, 1989.

MARCON, A. F., BASÍLIO, R. "Caracterização do Comportamento Mecânico das Camadas de Pavimentos de Rodovias Estaduais de Goiás". Anais da 34a Reunião Anual de Pavimentação, Campinas, SP, Brasil, 2003.

MEDINA, J. Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997.

MEDINA, J., MACEDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., et. al. "Utilização de Ensaio Deflectométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos". In: 28a Reunião Anual de Pavimentação. V. 1, pp. 595-625, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1994.

MOTTA, L.M.G. Método de dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

MOTTA, L.M.G., e MEDINA, J. Curso Básico de Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro, 2003.

NÓBREGA, E. S. Comparação entre Métodos de Retroanálise em Pavimentos Asfálticos. Dissertação de Mestrado. COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

NORELDIN, A.S. A New Scenario for Backcalculation of layer Moduli of Flexible Pavement. TRR 1384. Transportation Research Record. Washington, 1993.

NUÑES, W.P., NAKAHARA, S.M., RODRÍGUES, M.R., et. Al. "A Influência da Sucção no Módulo de Resiliência de um Subleito Típico de Pavimentos com Baixo Volume de Tráfego a Partir de Medidas" "in situ". In: 10 Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. V.2., pp.437-454, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

PINTO, S. Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/ufrj, Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, S., PREUSSLER, E. S. Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, Copiarte, Copiadora e Artes Gráficas, 2002.

PITTA, D.M., BALBO, J.T. "Estudo de Caso de Retroanálise de Superfícies Deformadas em Pavimentação". V.2 pp.815-834, São Paulo, SP, Brasil, 1998.

PREUSSLER, E.S., VALE, A.F., CARVALHO, R.L.E. & PINTO, I.E. "Retroanálise – Processos para avaliação estrutural de pavimentos. 32 a Reunião Anual de Pavimentação", ABPv, Brasília, DF, 1:337-346, 2000.

REZENDE, L. R., Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado. UNB/DF, Brasília, 2003.

RICCI, A.E.; MEYER, A.H.; HUDSON, W.R. & STOKOE II, R.K., "The Falling Weight Deflectometer for Nondestructive Evaluation of Rigid Pavements", Technical Report, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas, 1985.

ROCHA FILHO, N.R., RODRIGUES, R.M. . "A Avaliação Estrutural dos Pavimentos por Meio de Levantamento Deflectométricos". In: 30a Reunião Anual de Pavimentação. V. 3 pp.1119-1146, Salvador, BA, Brasil, 1996.

RODRIGUES, R.M. Estudo dos Trincamentos dos Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

ROSENBLUETH, E., "Point Estimates for Probability Moments. Proceedings of the Nacional Academy of Sciences of the United States of America", USA, 1975.

TRB, 78th, Washington D.C., jan. 1999. YODER, E.J. & WITCZAK, M. W. "Principles of Pavement Design". John Wiley & Sons, Inc. New York , Second Edition, 1975.

ULLIDTZ, P. "Pavement Analysis"; Elsevier Science Publishing Company Inc., Amsterdam, 1987.

UZAN, J. "Advanced backcalculation techniques. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli (second volume)". ASTM STP 1198, Harold L. Von Quintus, Albert J. Bush III and Gilbert Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

VILLELA, A.R.A., MARCON, A.F. "Avaliação Estrutural de Pavimentos Utilizando um Método Simplificado de Retroanálise – Retran-2CL". In: 33 a Reunião Anual de Pavimentação. pp. 622-633, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.



## Anexo I - Programa de Retroanálise de Pavimentos - RETROPAV.

O programa RETROPAV foi desenvolvido em C#, utilizando o Visual Studio, com o objetivo de propiciar o mesmo a funcionar em qualquer microcomputador com sistema operacional Windows 32-bits. É aconselhável para otimizar o uso do programa que o sistema operacional possua o Windows Service Pack 2.0 ou superior e o Framework 3.5, sendo ambos disponibilizados gratuitamente, de fácil utilização e instalação. Na Figura A.1 é apresentada a tela inicial do programa RETROPAV.

The screenshot displays the RETROPAV software interface, which is divided into several sections for data entry and processing:

- Dados - Levantamento Deflectométrico:** Includes fields for 'Nome', 'Tipo de Carregamento' (set to 'Viga'), 'Carregamento (kgf)', 'Raio de Aplicação da Carga (cm)', and 'Localização das Medidas de Deflexão' with 'Distancias (cm)'.
- Caracterização da Estruturado Pavimento:** Features a dropdown for 'Numeros da Camada (Max 5)' set to 5, and five sections for 'Camada 1' through 'Camada 5'. Each section contains input fields for 'Faixa de Módulos (kgf/cm²)' (Mínimo and Máximo), 'Coeficiente de Poisson', and 'Espessura (cm)'.
- Retroanálise:** Contains 'Bacia Medida (x 0,01mm)' and 'Bacia Calculada (x 0,01mm)' with input boxes for D0 through D6. It also includes 'Critérios de Parada' with 'Interações', 'Int Max.', 'RMS (%)', and 'RMSadm (%)'. A large 'Retroanálise' button is present.
- Módulos Retroanalizados (kgf/cm²):** Includes input fields for 'Camada 1' through 'Camada 5'.
- Gráfico:** A large empty area reserved for graphical output.

Figura A.1: Tela Inicial do RETROPAV.

Os dados a serem alimentados no RETROPAV para realização do processo de retroanálise são dividido em três classes:

- Dados – Levantamento Deflectométrico;

- Caracterização da Estrutura do Pavimento;
- Retroanálise.

Na fase inicial, nos dados do Levantamento Deflectométrico, devem ser informados as características associadas ao levantamento deflectométrico realizado com os quais se objetiva realizar a retroanálise. No campo 1 está localizado o identificador do levantamento realizado. No campo 2 o usuário irá informar qual o tipo de levantamento foi realizado, se Viga Benkelman ou FWD. No campo 3 deve-se informar o carregamento, em kgf, uma vez que o programa ELSYM trabalha nesta unidade, em valor arredondado sem casas decimais, conforme ilustrado na Figura A.2, e no campo 4 deve informar o raio de aplicação da carga em cm, com no máximo uma casa decimal. O campo 5 está reservado para informar os pontos onde foram realizadas as medidas das deflexões; deve ser informado valores arredondados sem casas decimais, como mostrado na Figura A.2.

Dados - Levantamento Deflectométrico

1  
Nome: SH-01 da BR-230/PB - Lote 2 - Lado Direito

2  
Tipo de Carregamento: FWD

3  
Carregamento (kgf): 4000

4  
Raio de Aplicação da Carga (cm): 15,0

5  
Localização das Medidas de Deflexão:  
Distancias (cm): 0 20 30 45 60 90 150

**Figura A.2 – Detalhe da Caracterização do Levantamento Deflectométrico a ser Retroanalizado pelo RETROPAV.**

A próxima etapa é informar ao RETROPAV as características do pavimento que está sendo analisado através da Caracterização da Estrutura do Pavimento, onde, no campo 6, conforme mostrado na Figura A.3, deve ser informado o número de camadas que constituem a estrutura, sendo no mínimo 1 camada e no máximo 5 camadas.



**Caracterização da Estrutura do Pavimento**

Numero da Camada (Max 5)

**Camada 1**

Faixa de Módulos (kgf/cm <sup>2</sup> )		Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Mínimo	Máximo		
<input type="text" value="10000"/>	<input type="text" value="70000"/>	<input type="text" value="0,25"/>	<input type="text" value="5,0"/>

**Camada 2**

Faixa de Módulos (kgf/cm <sup>2</sup> )		Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Mínimo	Máximo		
<input type="text" value="10000"/>	<input type="text" value="70000"/>	<input type="text" value="0,25"/>	<input type="text" value="7,0"/>

**Camada 3**

Faixa de Módulos (kgf/cm <sup>2</sup> )		Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Mínimo	Máximo		
<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="5000"/>	<input type="text" value="0,35"/>	<input type="text" value="20,0"/>

**Camada 4**

Faixa de Módulos (kgf/cm <sup>2</sup> )		Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Mínimo	Máximo		
<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="4000"/>	<input type="text" value="0,35"/>	<input type="text" value="20,0"/>

**Camada 5**

Faixa de Módulos (kgf/cm <sup>2</sup> )		Coeficiente de Poisson
Mínimo	Máximo	
<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="4000"/>	<input type="text" value="0,45"/>

**Figura A.3 – Detalhe de Caracterização da Estrutura do Pavimento do RETROPAV.**

Para a camada 1, no campo 7, deve ser informado o valor mínimo da faixa de módulos em kgf/cm<sup>2</sup> a ser empregado na retroanálise; já no campo 8 deve ser o valor máximo da faixa de módulos em kgf/cm<sup>2</sup>. No campo 9 deve ser informado o valor do coeficiente de Poisson a ser adotado e no campo 10 a espessura da camada, devendo esta ser informada com precisão de uma casa decimal.

O mesmo deve ser informado para as demais camadas, preenchendo-se os campos de 11 a 25. Vale salientar que a espessura da última camada não necessita ser informada, pois o programa a considera como sendo semi-infinita.

Por fim, devem ser inseridos os dados referentes à retroanálise propriamente dita. Devem ser preenchidos os campos de A a G, conforme ilustrado na Figura A.4, com as deflexões obtidas no levantamento deflectométrico. Os campos I e K também devem ser preenchidos pelo usuário, implementando assim os critérios de parada a serem adotados pelo RETROPAV.

**Retroanálise**

Bacia Medida (x 0,01mm)

A	D0	B	D1	C	D2	D	D3	E	D4	F	D5	G	D6
	48,0		31,9		22,7		12,6		8,3		3,2		2,2

Bacia Calculada (x 0,01mm)

Q	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6						
	48,51		32,05		22,39		12,68		7,29		3,206		1,885

Critérios de Parada

H	I
Interações	Int Max.
20	30
J	K
RMS (%)	RMSadm (%)
7,13	5

**Retroanálise**

Módulos Retroanalizados (kgf/cm<sup>2</sup>)

Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
26897	14775	1015	998	3429
L	M	N	O	P

Gráfico

Figura A.4 – Dados Referentes à Retroanálise Realizada pelo RETROPAV.



Após ter inseridos estes parâmetros, o usuário deve acionar o botão "Retroanálise", indicado pela seta vermelha em destaque na Figura A.4, de forma que os campos H, J e Q comecem então a serem preenchidos pelo RETROPAV, iteração a iteração. Ademais, os campos de L a P começam também a serem preenchidos, ilustrando a solução encontrada pelo RETROPAV para o conjunto de módulos resilientes da estrutura analisada. Quando uma camada não for utilizada, o RETROPAV preenche o campo referente àquela camada com o valor zero.

Vemos então na Figura A.5 como fica apresentado o RETROPAV durante seu funcionamento.

**RETROPAV**

Dados - Levantamento Deflectométrico

Nome: SH-01 da BR-230/PB - Lote 2 - Lado Direito

Tipo de Carregamento: FWD

Carregamento (kgf): 4000 Raio de Aplicação da Carga (cm): 15,0

Localização das Medidas de Deflexão:

Distancias (cm): 0 20 30 45 60 90 150

Caracterização da Estrutura do Pavimento

Numero da Camada (Max 5) 5

Camada	Faixa de Módulos (kgf/cm <sup>2</sup> ) Mínimo Máximo	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
Camada 1	10000 70000	0,25	5,0
Camada 2	10000 70000	0,25	7,0
Camada 3	500 5000	0,35	20,0
Camada 4	500 4000	0,35	20,0
Camada 5	100 4000	0,45	

Retroanálise

Bacia Medida ( x 0,01mm)

D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
48,0	31,9	22,7	12,6	8,3	3,2	2,2

Bacia Calculada ( x 0,01mm)

D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
48,51	32,05	22,39	12,68	7,29	3,206	1,885

Critérios de Parada

Interações	Int. Max	RMS (%)	RMSadm (%)
20	30	7,13	5

Módulos Retroanalizados (kgf/cm<sup>2</sup>)

Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
26897	14775	1015	998	3429

Gráfico

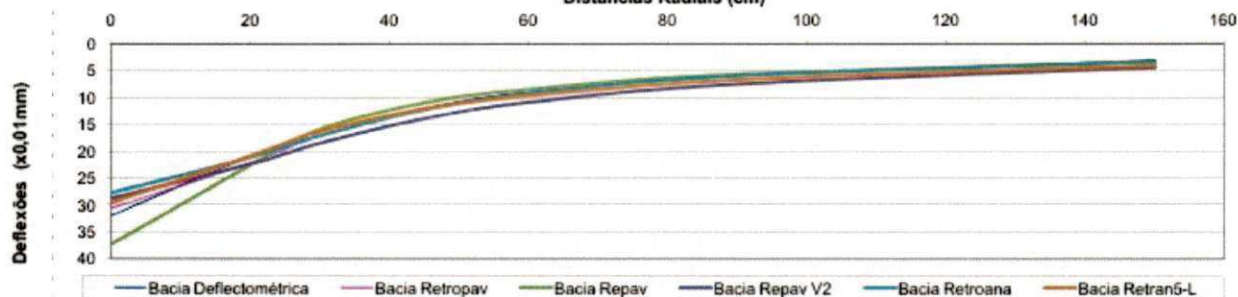
Figura A.5 – RETOPAV Durante Realização de Retroanálise.

**Anexo II – Reconstituição das Bacias Deflectométricas dos  
Módulos Retroanalisados para o SH-01 da BR-277/PR**

Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Repav, Repav 2V, Retroana e Retran5-L.

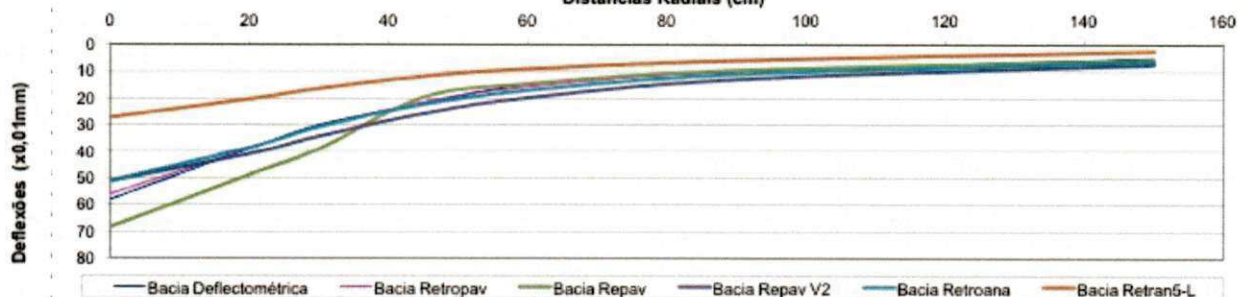
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 51099	Bacia Deflectométrica	32	21	17	12	9	6	3	-	-	-	-
	Bacia Repav	30,7	22,2	17,2	12,2	9,2	5,9	3,4	33097	2656	2026	6
	Bacia Repav V2	37,3	22,6	15,9	11,0	8,5	5,7	3,3	10600	3180	2120	9
	Bacia Retroana	28,8	22,4	18,5	13,9	10,9	7,5	4,4	49957	3007	1626	23
	Bacia Retran5-L	27,8	21,2	17,1	12,3	9,3	6,0	3,4	50565	2569	2036	7
	Bacia Retran5-L	29,6	20,9	16,3	12,1	9,7	6,7	4,0	25000	3800	1800	14

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



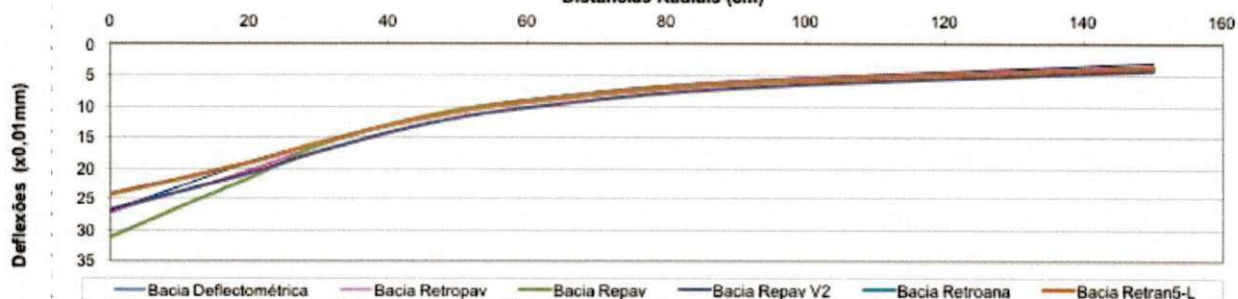
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 51200	Bacia Deflectométrica	58	39	30	22	15	10	5	-	-	-	-
	Bacia Repav	56,1	39,0	30,7	21,3	15,7	9,9	5,7	17929	1358	1213	6
	Bacia Repav V2	68,4	48,8	39,0	19,6	14,6	9,6	5,6	6271	1568	1254	13
	Bacia Retroana	51,1	40,9	34,2	25,7	19,8	12,9	7,3	38230	1279	961	26
	Bacia Retran5-L	51,1	38,5	30,6	22,3	17,0	11,0	6,4	24994	1515	1097	13
	Bacia Retran5-L	27,2	20,3	16,3	11,8	9,0	5,9	2,4	17500	1600	1200	47

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 51299	Bacia Deflectométrica	27	19	16	12	9	6	3	-	-	-	-
	Bacia Repav	27,3	20,3	16,3	11,8	9,0	5,9	3,4	42783	3048	2032	6
	Bacia Repav V2	31,1	21,5	16,3	11,7	9,1	6,1	3,6	22948	3278	1967	11
	Bacia Retroana	26,8	20,8	17,3	13,0	10,3	7,1	4,2	52172	3369	1701	18
	Bacia Retran5-L	24,2	19,1	15,9	12,0	9,4	6,4	3,7	65954	3360	1910	10
	Bacia Retran5-L	24,3	19,1	15,9	12,0	9,4	6,4	3,7	65000	3400	1900	10

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

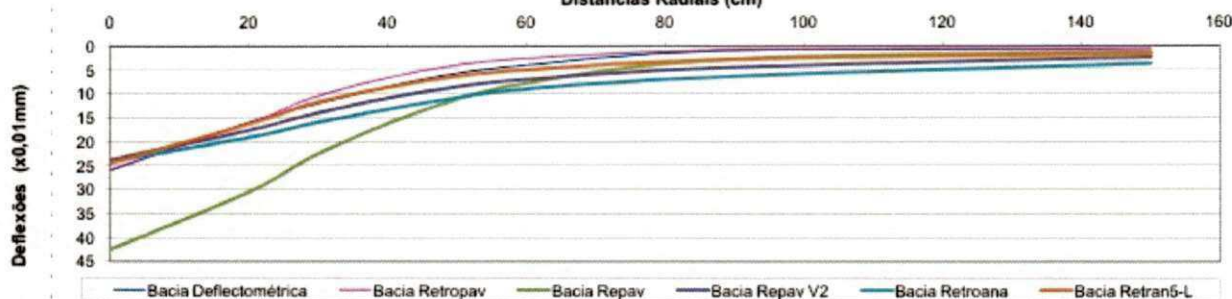




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

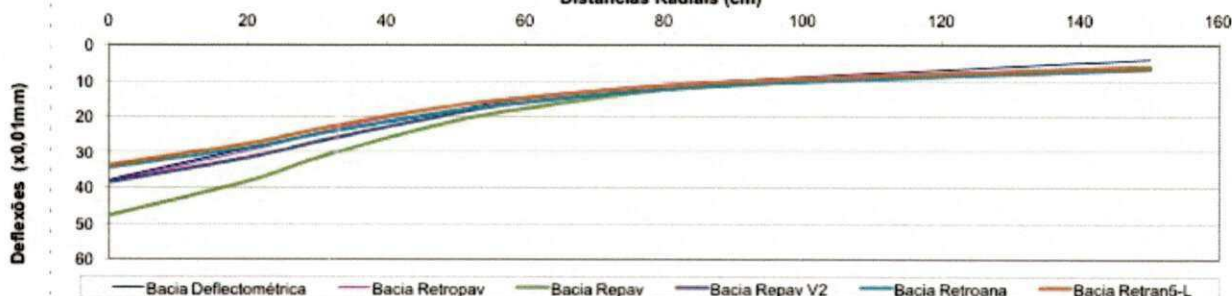
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 51399	Bacia Deflectométrica	26	16	12	7	4	1	1	-	-	-	-
	Bacia Retropav	25,9	16,1	10,4	5,2	2,6	0,9	0,6	28918	1951	9644	23
	Bacia Repav	42,5	30,5	22,5	13,5	7,8	2,8	1,4	33193	830	4149	101
	Bacia Repav V2	23,8	17,6	13,9	9,6	7,0	4,5	2,4	52772	2812	2796	146
	Bacia Retroana	24,2	19,1	15,9	12,0	9,0	6,4	3,7	65954	3360	1910	235
	Bacia Retran5-L	24,5	16,3	11,7	7,4	5,0	2,9	1,7	32500	2800	4000	77

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



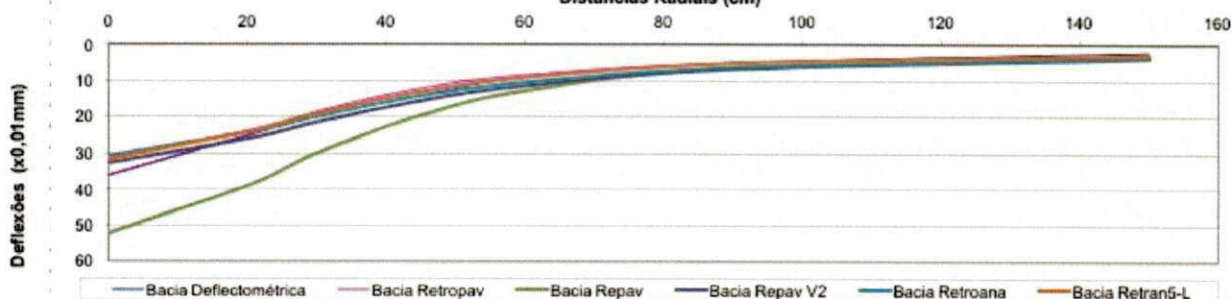
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 51482	Bacia Deflectométrica	38	29	25	20	15	10	4	-	-	-	-
	Bacia Retropav	38,3	29,7	24,5	18,4	14,5	9,9	5,8	36652	2299	1221	17
	Bacia Repav	47,8	38,2	31,7	23,4	17,7	10,9	6,0	43105	1149	1149	28
	Bacia Repav V2	38,6	31,7	27,0	21,0	16,0	11,0	6,6	57758	1863	1088	25
	Bacia Retroana	34,5	28,7	24,8	19,7	16,0	11,2	6,6	70000	2282	1096	25
	Bacia Retran5-L	33,8	27,6	23,5	18,3	14,7	10,2	6,0	60000	2400	1200	20

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 51600	Bacia Deflectométrica	36	25	20	14	9	5	2	-	-	-	-
	Bacia Retropav	36,0	25,0	18,5	12,1	8,4	4,9	2,8	26564	1837	2397	16
	Bacia Repav	52,2	38,9	29,8	19,5	12,7	6,2	3,2	29691	792	1979	46
	Bacia Repav V2	32,6	25,9	21,4	15,5	11,4	6,7	3,6	64560	1455	1896	35
	Bacia Retroana	30,6	24,0	19,7	14,1	10,4	6,2	3,3	62408	1689	2025	27
	Bacia Retran5-L	31,5	23,9	19,0	13,0	9,1	5,1	2,8	50000	1600	2400	16

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

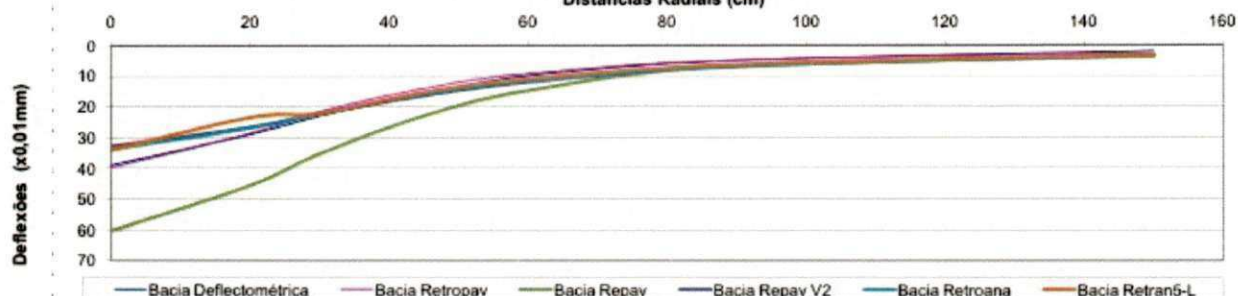




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Repav, Repav 2V, Retroana e Retran5-L.

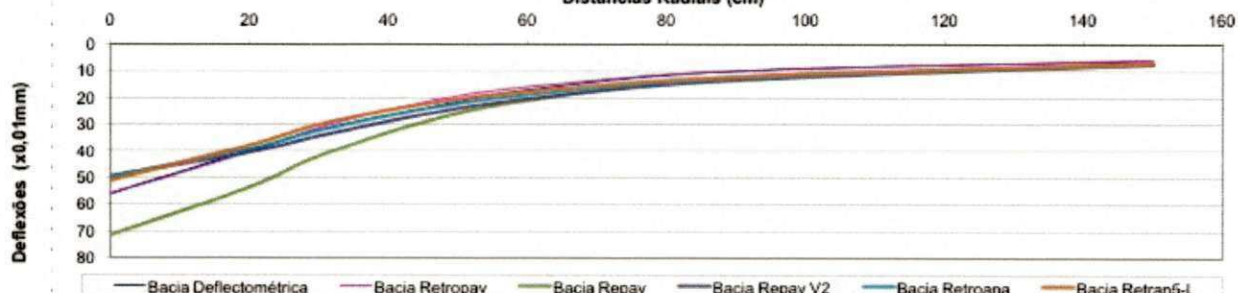
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 51700	Bacia Deflectométrica	39	29	23	16	10	5	2	-	-	-	-
	Bacia Repav	39,8	28,7	21,6	14,1	9,3	4,9	2,7	31848	1280	2402	14
	Bacia Repav V2	60,2	45,5	35,2	23,0	14,8	6,6	3,2	29030	581	1935	50
	Bacia Retroana	32,9	26,7	22,3	16,4	12,1	6,9	3,4	76908	1173	1929	32
	Bacia Retran5-L	33,9	26,9	22,1	16,0	11,7	6,8	3,6	62408	1348	1887	34
	Bacia Retran5-L	34,1	23,6	22,3	15,3	11,0	6,3	3,3	55000	1400	2000	28

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



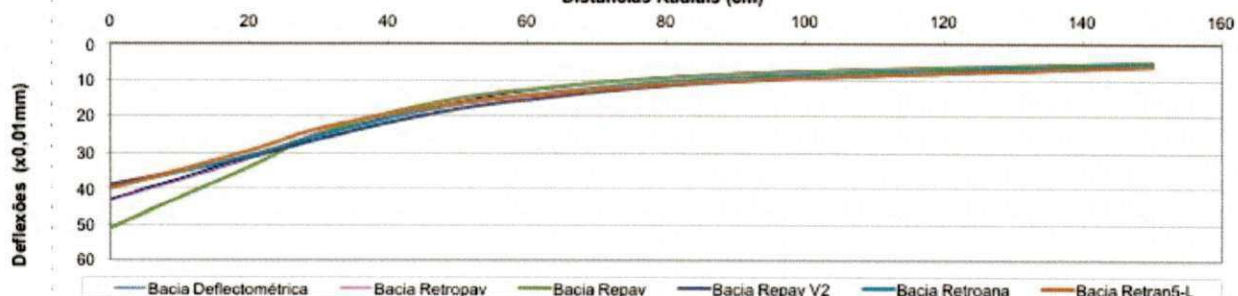
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 51800	Bacia Deflectométrica	56	40	32	24	17	10	6	-	-	-	-
	Bacia Repav	56,0	40,5	31,2	21,7	15,9	9,9	5,7	19253	1300	1213	5
	Bacia Repav V2	71,5	53,5	41,9	29,1	20,9	12,4	6,9	19708	821	985	26
	Bacia Retroana	49,6	40,6	34,4	26,4	20,5	13,4	7,5	47184	1218	937	19
	Bacia Retran5-L	49,8	39,2	32,2	24,3	18,8	12,5	7,2	33652	1485	984	13
	Bacia Retran5-L	51,2	37,9	30,1	22,5	17,7	12,1	7,1	20000	1900	1000	12

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 51900	Bacia Deflectométrica	43	31	25	18	13	8	5	-	-	-	-
	Bacia Repav	43,3	31,6	24,4	17,1	12,6	7,9	4,6	25507	1698	1519	4
	Bacia Repav V2	50,9	33,8	24,8	16,9	12,6	8,2	4,8	12783	1826	1461	8
	Bacia Retroana	38,9	31,2	26,2	19,8	15,4	10,2	5,8	49980	1771	1214	15
	Bacia Retran5-L	39,7	30,7	25,2	18,5	14,2	9,2	5,3	38107	1852	1320	8
	Bacia Retran5-L	40,0	29,4	23,4	17,8	14,3	10,0	6,0	22500	2800	1200	13

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

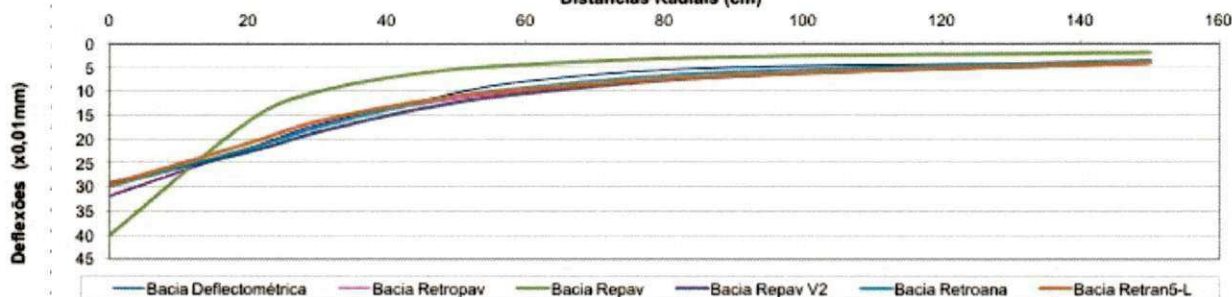




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

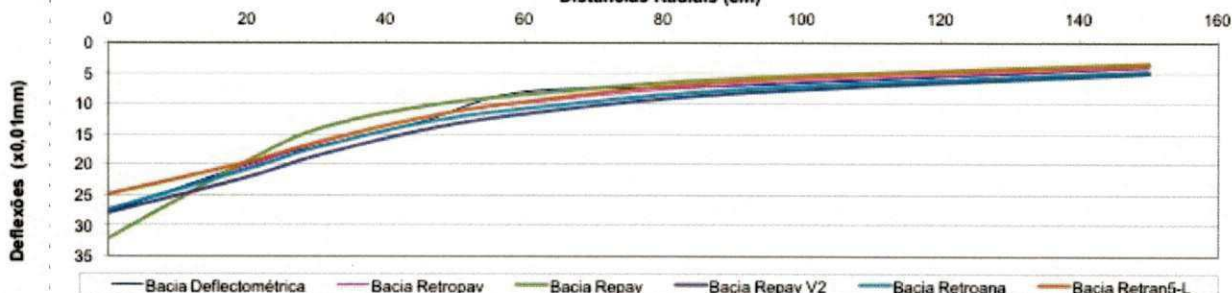
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 52001	Bacia Deflectométrica	32	22	17	12	8	5	4	-	-	-	-
	Bacia Retropav	31,8	22,2	17,1	12,7	10,0	6,9	4,1	22207	3527	1741	17
	Bacia Repav	40,0	16,3	10,1	6,2	4,4	2,8	1,9	4149	3734	4149	41
	Bacia Repav V2	29,3	22,7	18,6	13,7	10,5	6,9	4,0	51995	2537	1767	20
	Bacia Retroana	29,9	22,0	17,5	12,4	9,3	6,0	3,5	38107	2628	1997	11
	Bacia Retran5-L	29,6	20,9	16,3	12,1	9,7	6,7	4,0	25000	3800	1800	16

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



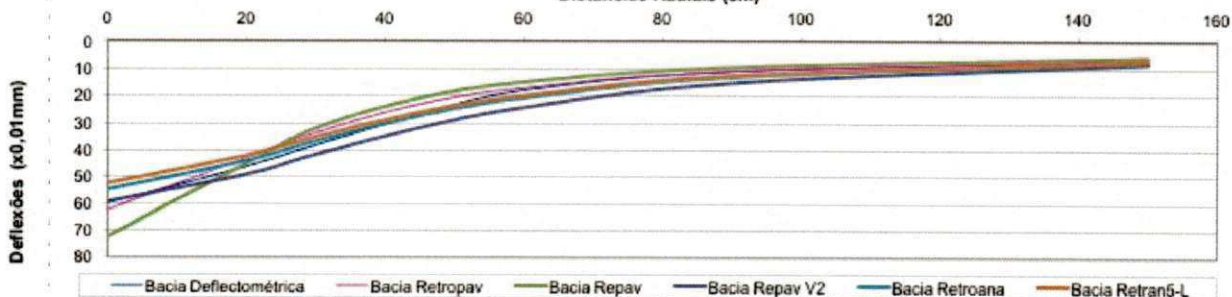
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 52102	Bacia Deflectométrica	28	20	17	13	8	7	4	-	-	-	-
	Bacia Retropav	27,7	20,4	16,6	12,4	9,9	6,9	4,1	33479	3953	1737	9
	Bacia Repav	32,1	19,5	14,2	10,5	8,5	5,9	3,4	10338	4652	2068	14
	Bacia Repav V2	28,0	22,1	18,6	14,4	11,7	8,3	5,0	50493	3692	1443	22
	Bacia Retroana	27,4	20,8	17,2	13,2	10,8	7,7	4,7	38107	4264	1555	15
	Bacia Retran5-L	24,9	19,7	16,4	12,4	9,7	6,4	3,7	70000	3000	1900	10

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 52200	Bacia Deflectométrica	60	46	38	27	18	11	7	-	-	-	-
	Bacia Retropav	62,6	42,8	33,5	23,2	17,1	10,9	6,3	14590	1276	1104	9
	Bacia Repav	72,4	44,9	31,9	20,9	15,0	9,5	5,5	7512	1252	1252	17
	Bacia Repav V2	59,4	49,0	41,6	31,8	24,4	15,3	8,2	44772	819	844	22
	Bacia Retroana	54,6	43,8	36,5	27,3	20,8	13,1	7,3	38107	1063	954	10
	Bacia Retran5-L	52,3	41,9	35,0	26,1	19,9	12,5	6,9	40000	1100	1000	9

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

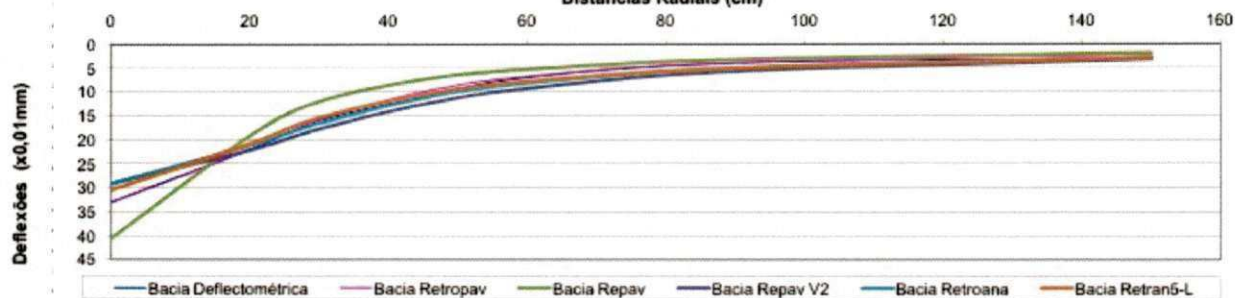




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

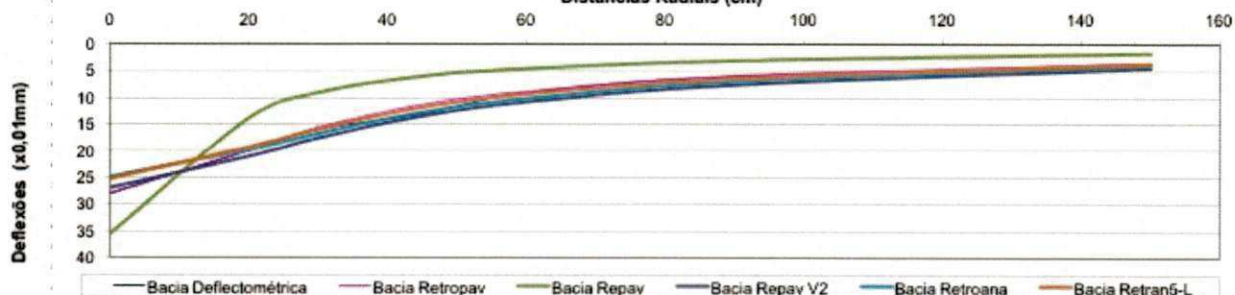
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	Dist. Radial (cm)											
Estaca 52299	Bacia Deflectométrica	33	22	16	11	7	4	3	-	-	-	-
	Bacia Retropav	33,1	22,1	15,8	10,0	6,8	3,9	2,3	24194	2076	2955	10
	Bacia Repav	40,5	19,2	12,0	7,4	5,3	3,3	1,9	5897	2949	3538	26
	Bacia Repav V2	29,2	22,2	17,8	12,6	9,3	5,7	3,2	50411	2150	2144	22
	Bacia Retroana	29,2	21,2	18,6	11,3	8,2	5,1	2,9	38107	2406	2358	13
	Bacia Retran5-L	30,5	20,8	15,4	10,5	7,8	5,0	2,9	25000	2800	2400	11

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



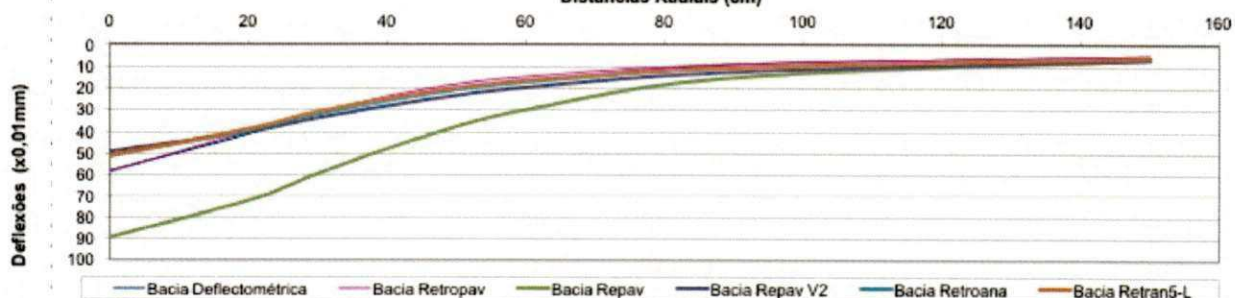
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	Dist. Radial (cm)											
Estaca 52399	Bacia Deflectométrica	28	20	16	13	9	6	4	-	-	-	-
	Bacia Retropav	28,0	20,0	15,6	11,3	8,8	5,9	3,5	31017	3453	2030	7
	Bacia Repav	35,5	13,8	9,0	6,0	4,6	3,1	1,7	3934	5507	3934	46
	Bacia Repav V2	27,0	21,1	17,6	13,5	10,8	7,6	4,5	51641	3615	1586	14
	Bacia Retroana	24,9	19,8	16,7	12,7	10,1	6,9	4,0	70000	3297	1762	9
	Bacia Retran5-L	25,3	19,3	15,9	11,8	9,3	6,4	3,7	50000	3600	1900	7

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	Dist. Radial (cm)											
Estaca 52500	Bacia Deflectométrica	58	41	32	23	17	9	5	-	-	-	-
	Bacia Retropav	58,3	39,9	31,0	20,7	14,7	8,9	5,1	16851	1195	1338	7
	Bacia Repav	89,3	72,1	59,2	42,5	29,8	14,9	6,5	29110	323	970	70
	Bacia Repav V2	49,0	39,9	33,6	25,5	19,5	12,4	6,8	47920	1114	1024	22
	Bacia Retroana	50,9	39,5	31,8	23,1	17,2	10,6	5,9	33026	1178	1166	11
	Bacia Retran5-L	51,1	38,7	30,7	22,0	16,3	10,2	5,8	27500	1300	1200	10

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



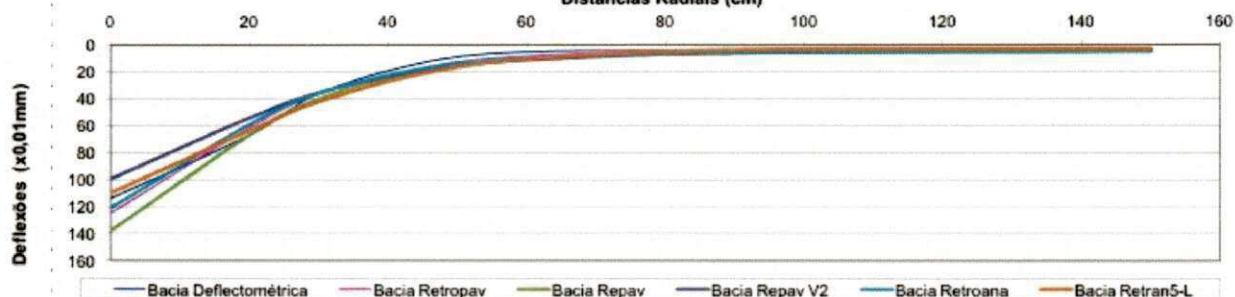
**Anexo III – Reconstituição das Bacias Deflectométricas dos  
Módulos Retroanalisados para o SH-01 da BR-418/MG.**



Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

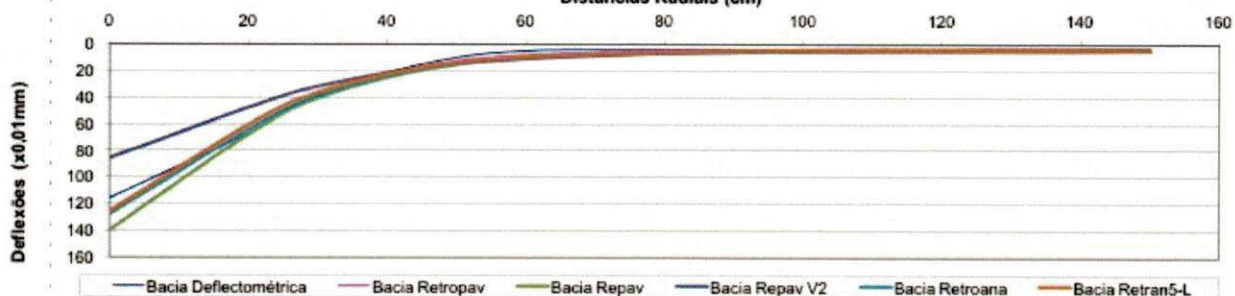
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 3767	Bacia Deflectométrica	114	67	36	13	5	4	3				
	Bacia Retropav	125,0	61,6	36,6	16,7	8,1	3,9	3,3	2130	342	2449	26
	Bacia Repav	138,0	66,8	40,0	19,3	10,5	5,6	4,5	1822	364	1822	52
	Bacia Repav V2	99,6	54,5	35,7	19,1	11,1	5,9	4,5	3130	445	1823	56
	Bacia Retroana	121,0	59,2	35,7	17,4	9,5	5,1	4,1	2110	411	2015	40
Bacia Retran5-L	110,0	63,7	42,2	21,3	10,4	3,5	2,8	3500	250	2600	48	

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



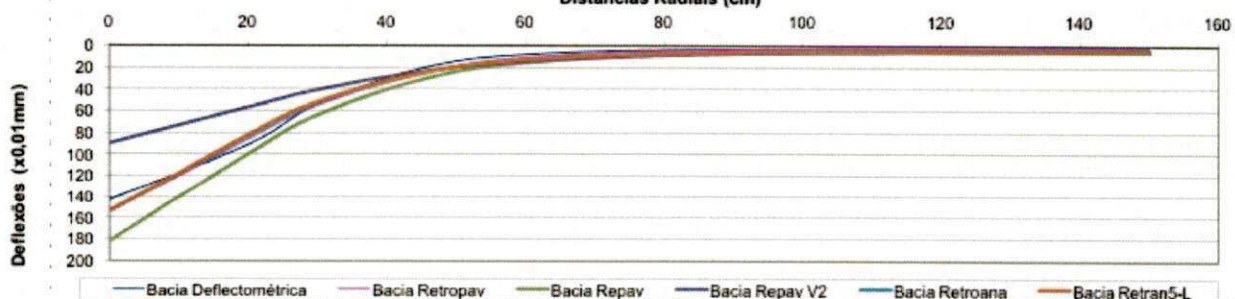
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 3840	Bacia Deflectométrica	116	67	38	15	5	4	3				
	Bacia Retropav	126,0	61,8	36,6	16,6	8,1	3,9	3,3	2093	342	2449	24
	Bacia Repav	140,0	67,9	40,7	19,6	10,6	5,7	4,6	1791	358	1791	52
	Bacia Repav V2	85,9	47,9	32,0	17,9	10,9	5,9	4,5	3689	547	1848	55
	Bacia Retroana	128,0	64,4	39,1	18,7	9,7	4,9	4,0	2110	346	2031	40
Bacia Retran5-L	126,0	60,8	36,5	17,6	9,5	5,1	4,1	2000	400	2000	39	

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 3921	Bacia Deflectométrica	143	91	54	21	8	3	2				
	Bacia Retropav	155,0	86,2	55,0	25,8	11,2	3,1	2,7	2305	178	2525	22
	Bacia Repav	182,0	99,9	63,9	31,5	15,7	6,4	5,2	1838	184	1470	86
	Bacia Repav V2	90,0	56,8	40,8	24,2	14,8	7,2	5,1	4965	356	1567	88
	Bacia Retroana	154,0	83,9	53,1	25,9	12,7	5,2	4,3	2110	221	1787	57
Bacia Retran5-L	154,0	82,0	51,7	25,6	13,2	6,2	5,0	2000	250	1600	74	

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

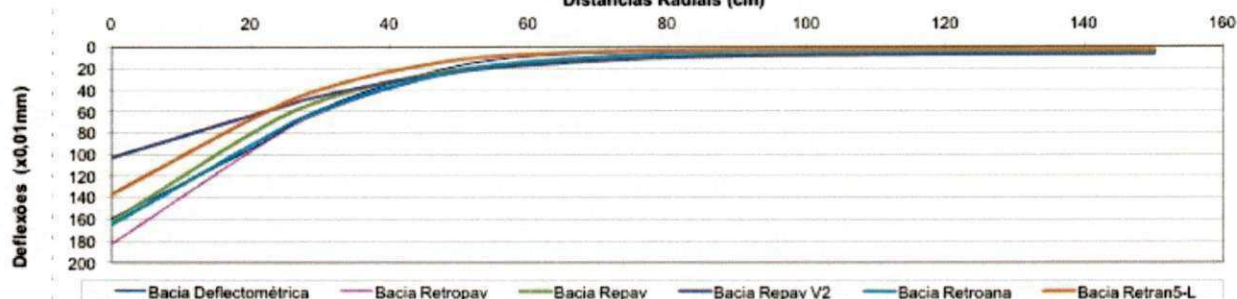




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

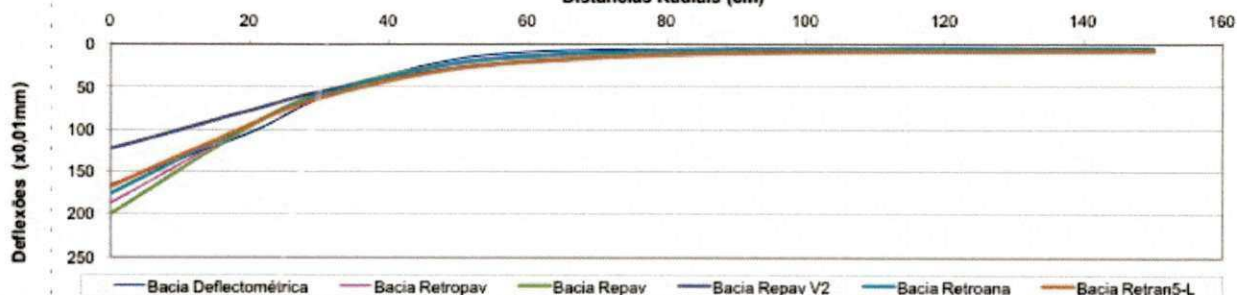
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 4000	Bacia Deflectométrica	159	95	58	25	9	4	3				
	Bacia Retropav	183,0	97,1	61,2	30,4	15,9	7,5	6,0	1661	215	1831	59
	Bacia Repav	162,0	80,9	50,2	25,8	14,9	8,2	6,4	1653	165	1322	64
	Bacia Repav V2	103,0	64,1	45,7	27,2	16,8	8,5	6,1	4137	343	1409	69
	Bacia Retroana	165,0	91,7	58,8	28,7	13,7	5,0	4,1	2110	186	1801	27
	Bacia Retran5-L	137,0	67,6	39,6	16,8	7,0	2,7	2,6	2000	275	1500	26

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



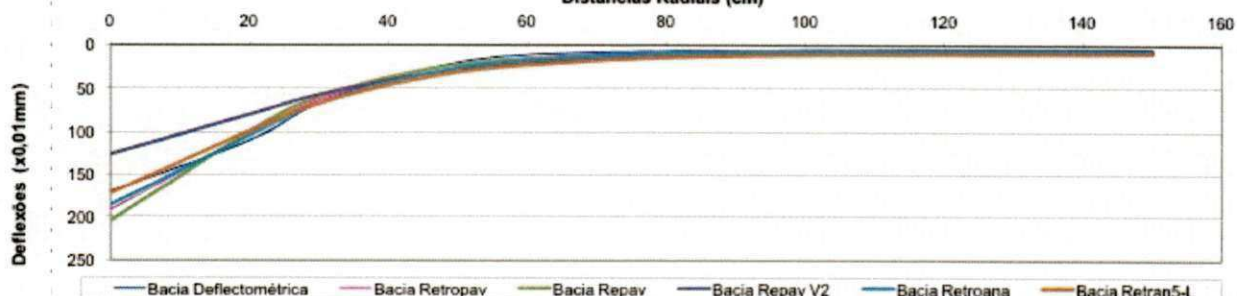
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 4081	Bacia Deflectométrica	166	104	64	25	9	5	4				
	Bacia Retropav	187,0	97,1	59,4	27,2	12,5	5,0	4,3	1614	190	1778	17
	Bacia Repav	200,0	97,1	58,3	28,1	15,2	8,2	6,6	1252	250	1252	44
	Bacia Repav V2	123,0	78,0	55,9	33,1	19,9	9,4	6,6	3724	246	1193	64
	Bacia Retroana	176,0	95,5	60,5	29,4	14,4	5,9	4,9	1844	194	1577	26
	Bacia Retran5-L	168,0	94,9	63,5	35,2	20,8	10,8	8,2	2000	250	1000	79

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 4160	Bacia Deflectométrica	170	110	67	29	11	6	4				
	Bacia Retropav	192,0	102,0	63,4	30,0	14,4	6,0	5,0	1625	184	1545	16
	Bacia Repav	205,0	99,5	59,7	28,8	15,6	8,4	6,7	1222	244	1222	35
	Bacia Repav V2	126,0	79,9	57,3	33,9	20,4	9,6	6,8	3636	240	1165	50
	Bacia Retroana	186,0	104,0	67,0	33,9	17,3	7,3	5,8	1844	180	1327	30
	Bacia Retran5-L	172,0	98,7	66,9	38,0	23,0	12,1	9,1	2000	250	900	75

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

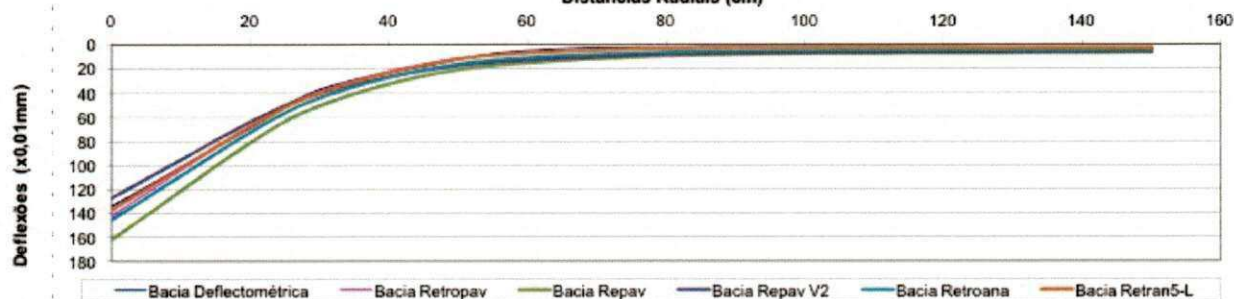




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

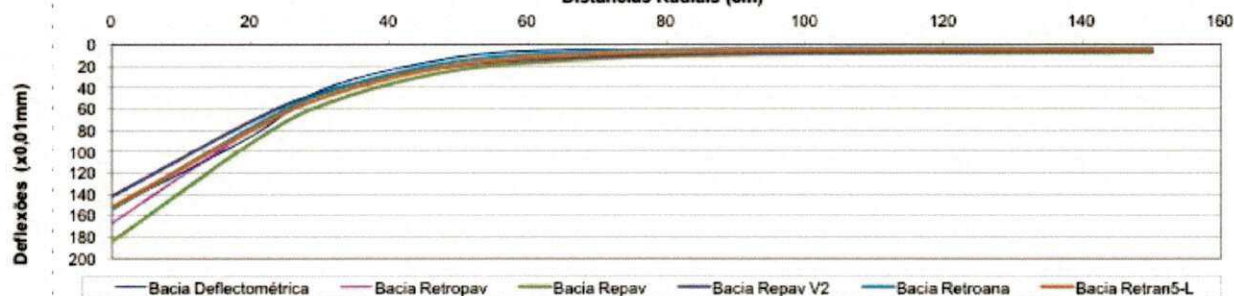
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 4240	Bacia Deflectométrica	134	69	37	18	5	2	3				
	Bacia Retropav	142,0	67,3	38,5	16,0	6,9	3,0	2,8	1796	294	2861	24
	Bacia Repav	162,0	80,9	50,2	25,8	14,9	8,2	6,4	1613	323	1290	148
	Bacia Repav V2	127,0	63,9	40,1	21,4	12,8	7,3	5,6	2048	439	1492	120
	Bacia Retroana	145,0	72,3	43,8	20,9	10,9	5,5	4,5	1858	309	1815	82
	Bacia Retran5-L	137,0	67,6	39,6	16,8	7,0	2,7	2,6	2000	275	3000	22

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



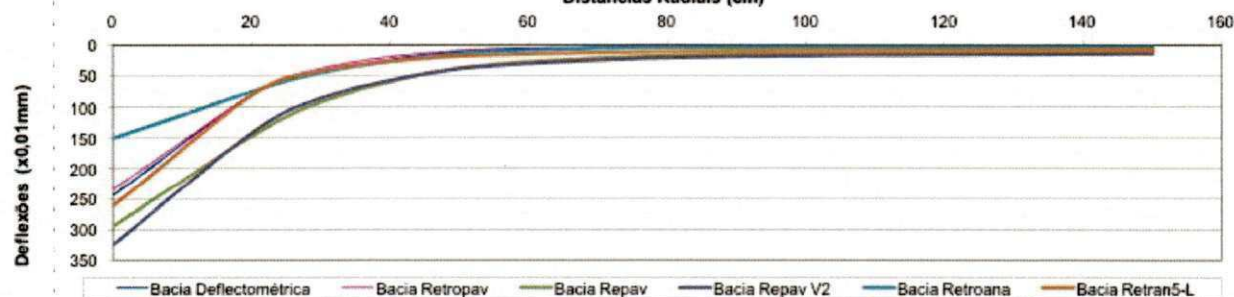
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 4320	Bacia Deflectométrica	153	86	43	17	6	5	4				
	Bacia Retropav	167,0	80,6	47,2	21,0	10,1	4,9	4,2	1528	265	1922	28
	Bacia Repav	184,0	92,4	57,3	29,4	17,0	9,4	7,3	1413	283	1130	89
	Bacia Repav V2	142,0	72,0	45,3	24,0	14,3	8,0	6,2	1844	382	1343	63
	Bacia Retroana	154,0	78,0	47,0	21,2	9,7	4,1	3,6	1858	216	2178	27
	Bacia Retran5-L	152,0	80,6	50,5	24,6	12,5	5,7	4,7	2000	250	1700	46

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Estaca 4402	Bacia Deflectométrica	244	80	44	16	5	4	4				
	Bacia Retropav	234,0	81,3	38,3	13,6	6,4	4,1	3,5	693	323	2395	14
	Bacia Repav	295,0	147,0	91,5	47,0	27,1	15,0	11,7	886	177	709	228
	Bacia Repav V2	326,0	142,0	85,7	46,6	30,1	18,6	14,1	604	257	604	268
	Bacia Retroana	150,0	75,1	44,6	19,5	8,6	3,6	3,2	1858	253	2434	33
	Bacia Retran5-L	262,0	80,7	41,0	21,5	14,7	9,5	7,1	500	600	1200	96

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

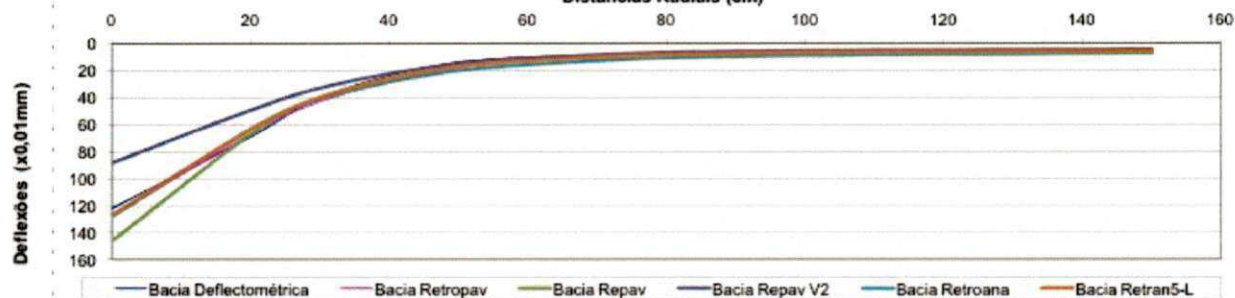




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Repav, Repav 2V, Retroana e Retran5-L.

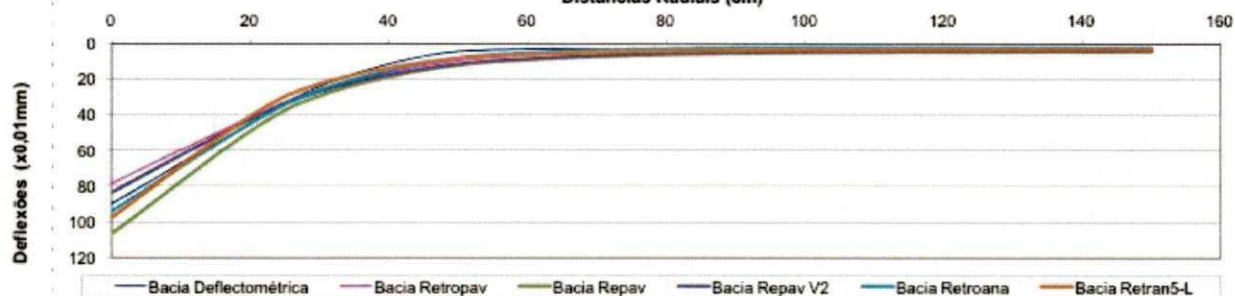
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 4480	Bacia Deflectométrica	122	69	40	18	10	7	5				
	Bacia Repav	128,0	66,8	42,7	22,4	13,0	7,0	5,4	2237	376	1521	15
	Bacia Repav V2	146,0	66,7	39,7	20,3	12,2	7,2	5,6	1505	451	1505	13
	Bacia Retroana	88,2	49,2	32,8	18,1	10,8	5,8	4,4	3632	512	1873	19
	Bacia Retran5-L	128,0	63,6	40,9	23,6	15,5	9,4	7,1	1858	573	1206	31
	Bacia Retran5-L	127,0	63,4	39,6	21,0	12,6	7,2	5,6	2000	450	1500	13

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



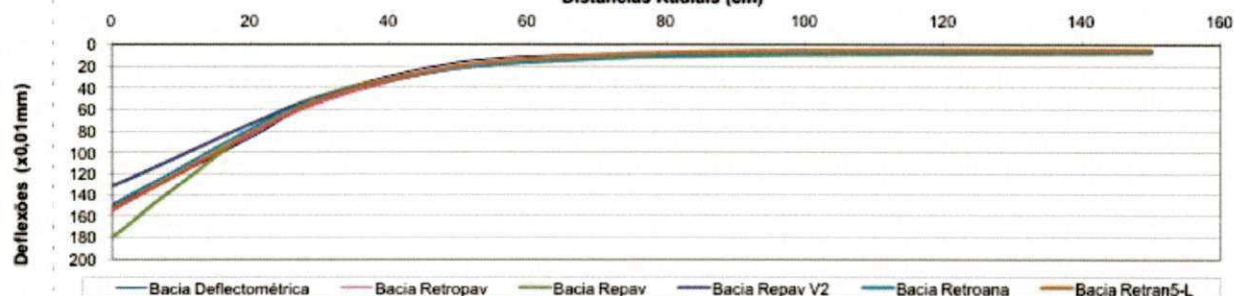
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 4560	Bacia Deflectométrica	90	45	24	7	3	3	3				
	Bacia Repav	78,9	41,4	25,9	12,5	6,4	3,0	2,5	3762	501	3247	53
	Bacia Repav V2	107,0	49,2	29,2	15,0	9,0	5,3	4,1	2040	612	2040	93
	Bacia Retroana	83,9	42,5	26,8	14,1	8,4	4,7	3,7	3134	650	2282	81
	Bacia Retran5-L	94,4	44,9	26,0	11,1	5,0	2,4	2,1	2665	464	3830	37
	Bacia Retran5-L	97,7	40,7	22,5	10,4	5,9	3,5	2,8	2000	700	3000	41

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 4640	Bacia Deflectométrica	151	86	49	22	11	8	7				
	Bacia Repav	156,0	83,9	53,9	28,1	15,7	8,0	6,2	1948	273	1302	20
	Bacia Repav V2	180,0	79,4	47,5	25,6	16,4	10,1	7,6	1112	445	1112	24
	Bacia Retroana	132,0	73,5	48,8	26,8	15,8	8,3	6,3	2449	331	1295	20
	Bacia Retran5-L	150,0	78,3	49,9	26,6	15,7	8,6	6,6	1866	335	1247	19
	Bacia Retran5-L	154,0	82,0	51,7	25,6	13,2	6,2	5,0	2000	250	1600	17

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

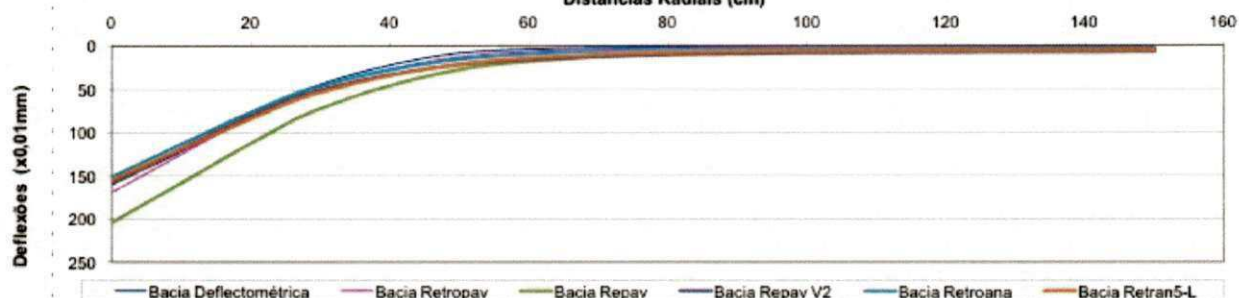




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

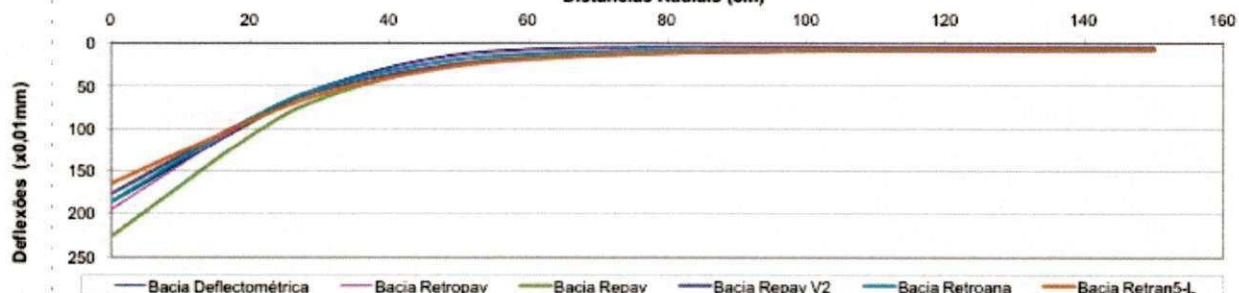
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 4811	Bacia Deflectométrica	160	83	44	14	4	2	2				
	Bacia Retropav	169,0	81,2	46,2	18,2	6,6	2,1	2,3	1581	218	3227	28
	Bacia Repav	204,0	112,0	71,6	35,3	17,5	7,2	5,8	1642	164	1314	188
	Bacia Repav V2	158,0	79,8	50,1	26,6	15,9	9,0	6,9	1655	348	1205	199
	Bacia Retroana	151,0	76,2	45,8	20,7	9,6	4,2	3,6	1866	257	2168	76
	Bacia Retran5-L	155,0	83,4	53,0	26,7	14,1	6,7	5,3	2000	250	1500	149

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



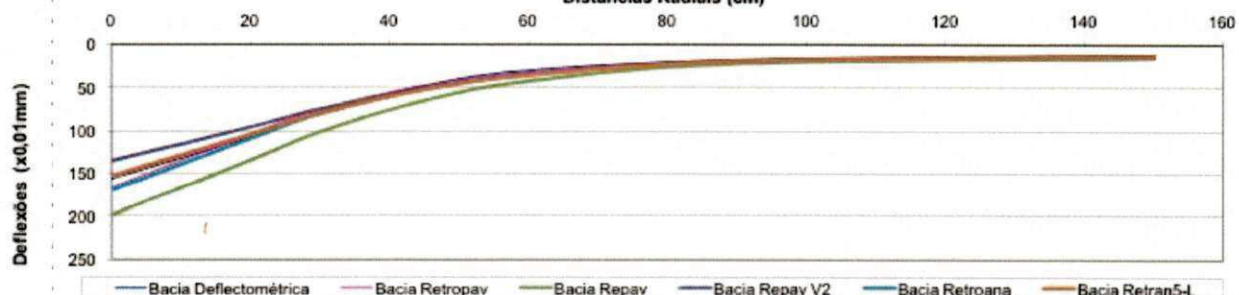
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 4883	Bacia Deflectométrica	187	94	52	19	7	4	4				
	Bacia Retropav	195,0	91,2	51,5	21,0	8,9	4,0	3,7	1263	219	2164	11
	Bacia Repav	226,0	109,0	65,6	31,7	17,1	9,3	7,4	1111	222	1111	85
	Bacia Repav V2	177,0	89,1	56,0	29,8	17,9	10,1	7,8	1468	315	1069	93
	Bacia Retroana	186,0	89,1	52,8	24,9	13,2	7,1	5,8	1320	269	1428	49
	Bacia Retran5-L	165,0	91,8	60,6	32,9	19,0	9,7	7,4	2000	250	1100	94

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 5040	Bacia Deflectométrica	156	107	78	48	30	18	12				
	Bacia Retropav	167,0	104,0	75,5	47,8	31,9	18,1	13,2	2403	289	639	5
	Bacia Repav	199,0	134,0	101,0	65,2	42,7	22,1	15,3	2677	161	535	31
	Bacia Repav V2	135,0	95,7	74,7	50,6	34,7	18,7	12,8	4591	233	655	10
	Bacia Retroana	170,0	109,0	80,4	52,1	35,5	20,4	14,7	2519	288	575	13
	Bacia Retran5-L	153,0	104,0	79,3	52,7	36,0	19,9	14,0	3500	250	600	11

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

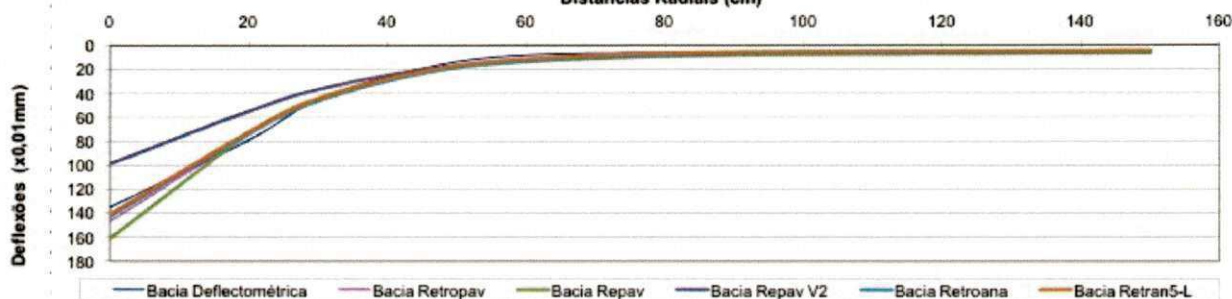




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav V2, Retroana e Retran5-L.

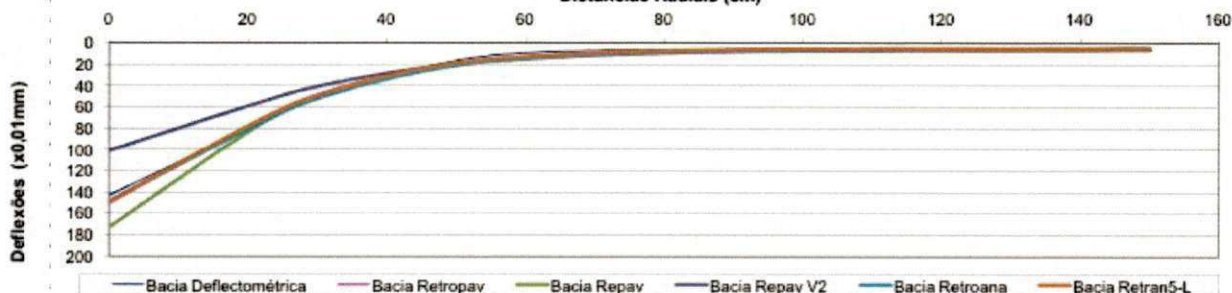
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	Dist. Radial (cm)											
Estaca 5122	Bacia Deflectométrica	135	79	45	19	8	6	5				
	Bacia Retropav	147,0	74,8	46,0	22,4	11,8	6,0	4,8	1890	299	1683	20
	Bacia Repav	161,0	73,8	43,9	22,4	13,5	8,0	6,2	1360	408	1360	32
	Bacia Repav V2	99,0	55,0	36,6	20,3	12,2	6,6	5,0	3199	469	1649	26
	Bacia Retroana	143,0	73,6	46,0	23,1	12,6	6,4	5,1	1993	312	1592	24
	Bacia Retran5-L	141,0	72,4	44,6	21,6	11,2	5,5	4,5	2000	300	1800	17

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



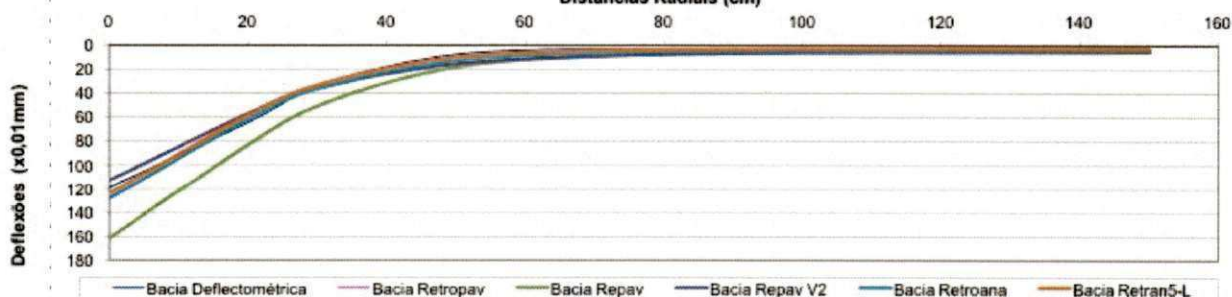
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	Dist. Radial (cm)											
Estaca 5204	Bacia Deflectométrica	143	81	50	23	9	6	4				
	Bacia Retropav	151,0	77,7	48,0	23,4	12,2	6,0	4,8	1882	279	1666	16
	Bacia Repav	173,0	83,6	50,1	24,2	13,1	7,1	5,7	1453	291	1453	26
	Bacia Repav V2	101,0	59,2	40,8	23,7	14,7	7,9	5,9	3484	438	1398	36
	Bacia Retroana	149,0	80,9	51,9	26,6	14,2	6,8	5,4	2134	259	1492	27
	Bacia Retran5-L	149,0	78,1	49,1	24,4	12,9	6,3	5,0	2000	275	1600	19

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito		
	Dist. Radial (cm)											
Estaca 5281	Bacia Deflectométrica	119	64	34	12	4	3	2				
	Bacia Retropav	129,0	60,9	34,8	14,6	6,4	3,0	2,7	1935	334	2993	28
	Bacia Repav	162,0	82,8	50,5	23,7	11,8	5,5	4,6	1746	249	1746	104
	Bacia Repav V2	113,0	56,8	35,8	19,0	11,4	6,4	5,0	2307	494	1680	102
	Bacia Retroana	128,0	61,1	35,9	16,5	8,3	4,3	3,6	1960	371	2285	55
	Bacia Retran5-L	124,0	58,1	33,0	13,8	6,0	2,8	2,5	2000	350	3200	22

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

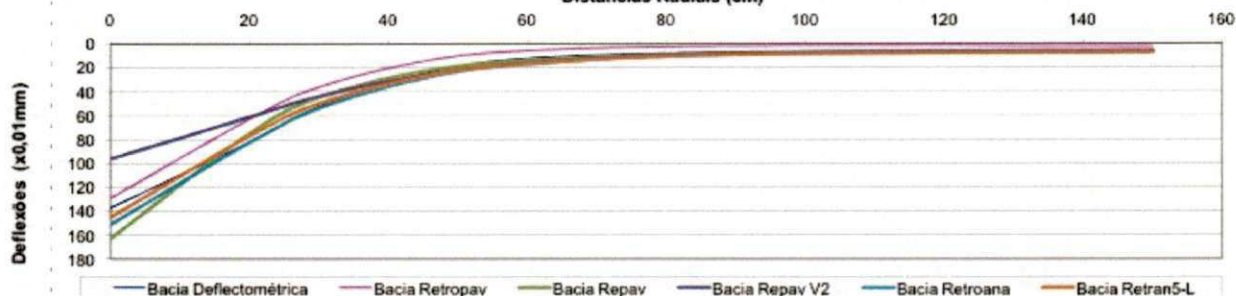




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav, Repav, Repav 2V, Retroana e Retran5-L.

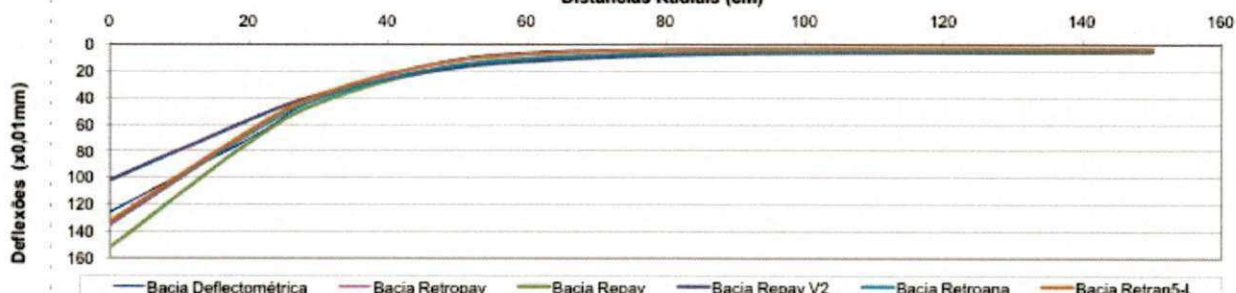
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 5360	Bacia Deflectométrica	137	82	52	25	12	7	6				
	Bacia Retropav	129,0	62,6	36,0	14,5	5,5	1,9	2,0	2097	283	1469	48
	Bacia Repav	163,0	74,8	44,6	22,8	13,7	8,1	6,3	1340	402	1340	13
	Bacia Repav V2	96,1	60,9	43,8	26,0	15,8	7,6	5,4	4731	324	1482	21
	Bacia Retroana	151,0	82,4	53,7	28,9	16,8	8,8	6,8	2047	294	1206	20
	Bacia Retran5-L	145,0	76,8	49,8	27,2	16,4	9,1	6,9	2000	350	1200	19

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



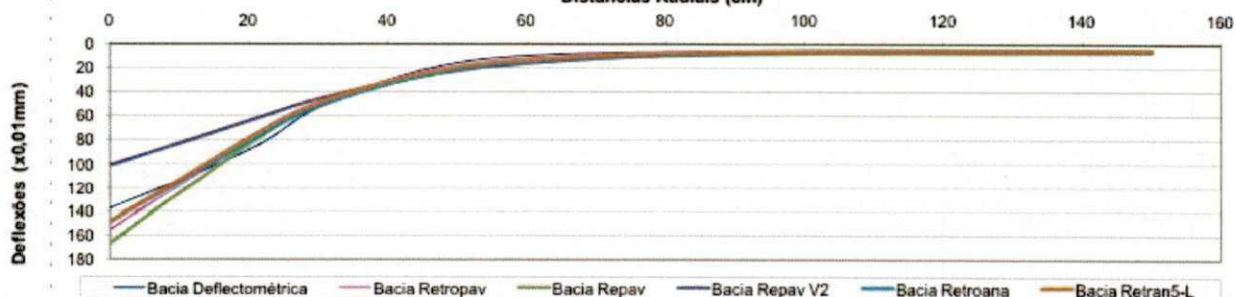
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 5441	Bacia Deflectométrica	126	71	40	16	6	3	3				
	Bacia Retropav	136,0	67,7	39,9	17,3	7,4	3,0	2,7	2053	276	2848	11
	Bacia Repav	152,0	73,7	44,2	21,3	11,5	6,2	5,0	1649	330	1649	61
	Bacia Repav V2	102,0	56,9	38,0	21,2	12,7	6,9	5,2	3172	449	1589	72
	Bacia Retroana	134,0	67,1	40,9	19,7	10,3	5,3	4,3	2013	336	1909	43
	Bacia Retran5-L	133,0	65,1	38,1	16,4	7,2	3,1	2,8	2000	300	2800	9

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)						Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS	
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base		Subleito
Estaca 5520	Bacia Deflectométrica	138	88	53	22	10	6	5				
	Bacia Retropav	156,0	81,3	50,6	24,6	12,6	6,0	4,8	1901	256	1648	12
	Bacia Repav	167,0	83,4	51,7	26,6	15,3	8,5	6,6	1566	313	1253	30
	Bacia Repav V2	101,0	64,1	46,0	27,1	16,2	7,6	5,4	4491	297	1472	31
	Bacia Retroana	150,0	81,2	52,1	26,9	14,6	7,1	5,6	2101	265	1438	21
	Bacia Retran5-L	149,0	78,1	49,1	24,4	12,9	6,3	5,0	2000	275	1600	13

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

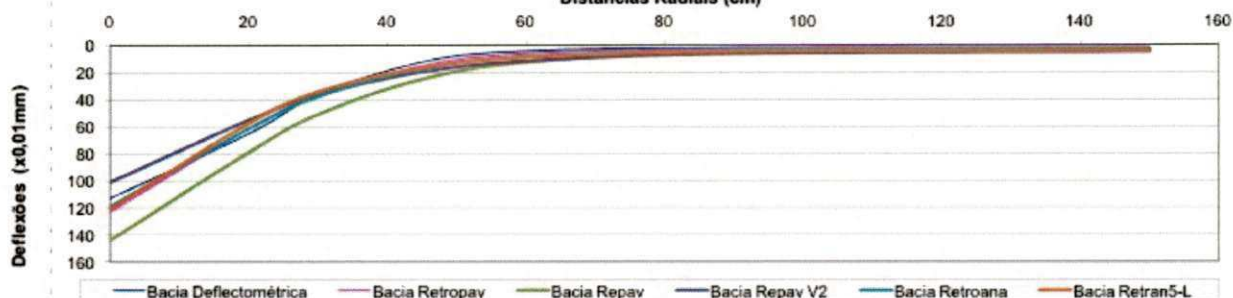




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação JULEA alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Repav, Repav 2V, Retroana e Retran5-L.

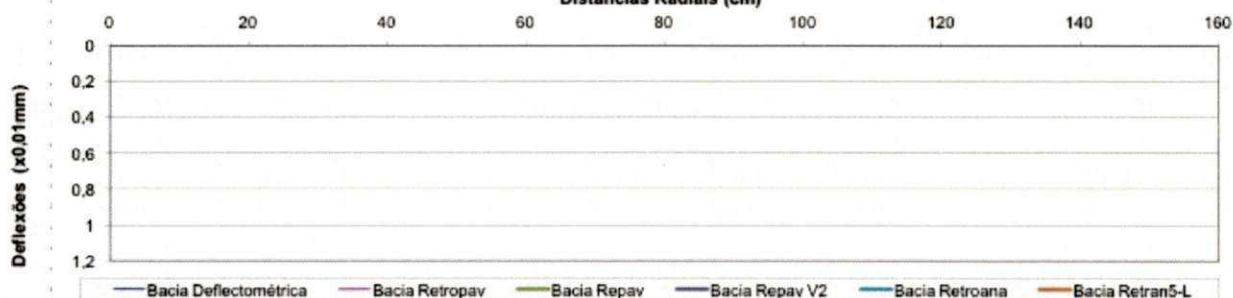
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca 5520	Bacia Deflectométrica	113	65	36	12	4	2	2				
	Bacia Repav	123,0	61,2	35,9	14,9	5,8	1,9	1,9	2309	286	3837	20
	Bacia Repav	144,0	78,9	50,6	24,9	12,4	5,1	4,1	2325	233	1860	116
	Bacia Repav V2	101,0	54,9	36,0	19,4	11,4	6,1	4,6	3041	453	1771	118
	Bacia Retroana	119,0	61,3	37,4	17,1	8,0	3,4	3,0	2437	315	2649	53
	Bacia Retran5-L	121,0	57,3	33,8	16,0	8,5	4,6	3,7	2000	425	2200	75

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



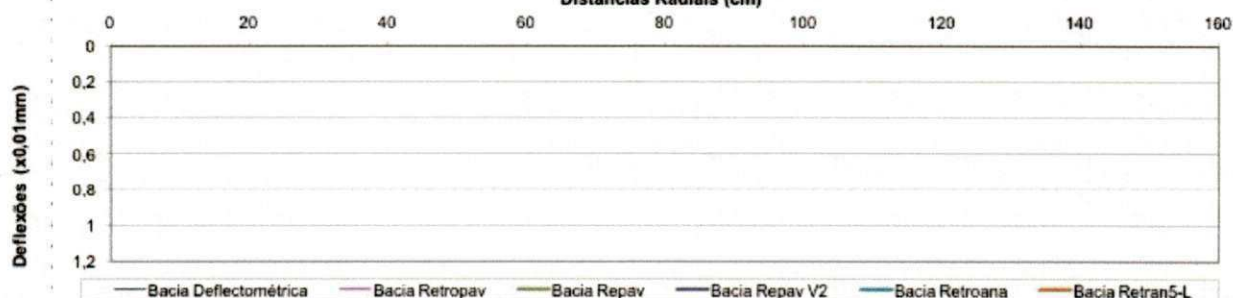
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca	Bacia Deflectométrica											
	Bacia Repav											
	Bacia Repav											
	Bacia Repav V2											
	Bacia Retroana											
	Bacia Retran5-L											

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )			RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revestimento	Base	Subleito	
Estaca	Bacia Deflectométrica											
	Bacia Repav											
	Bacia Repav											
	Bacia Repav V2											
	Bacia Retroana											
	Bacia Retran5-L											

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



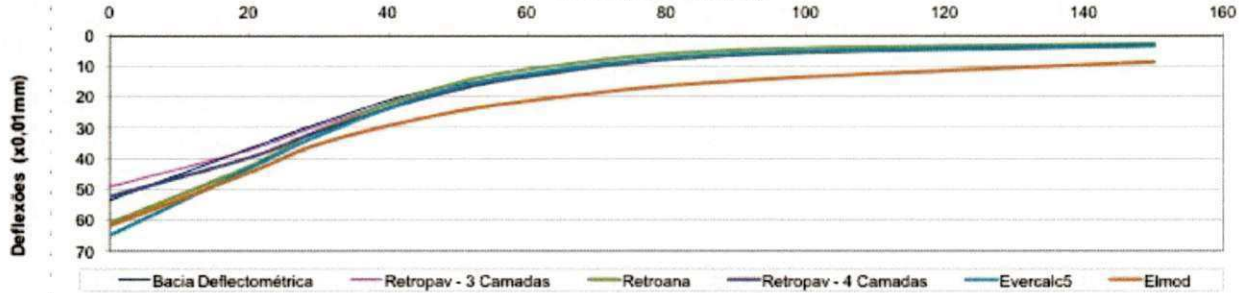
**Anexo IV – Reconstituição das Bacias Deflectométricas dos  
Módulos Retroanalisados para o Segmento Homogêneo 01,  
Lado Direito, da BR-230/PB**



Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

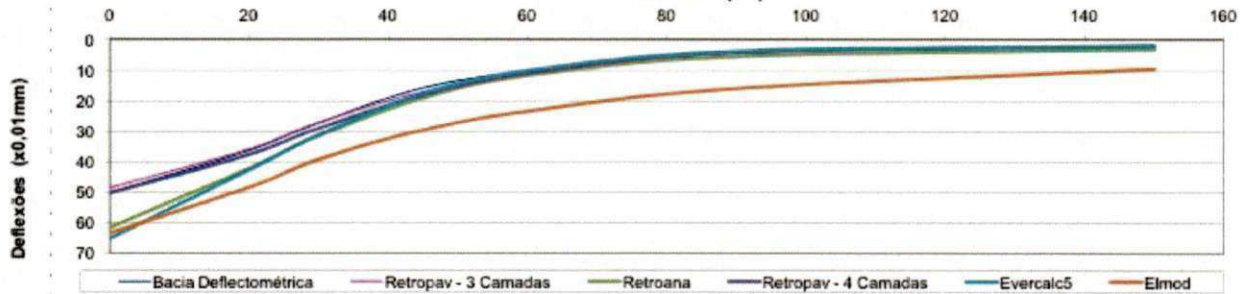
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Bacia Deflectométrica	53,6	36,9	28,6	18,2	13	6,3	3,2	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	49,3	37,3	29,3	19,3	12,7	6,1	3,1	34903	779	-	2054	4
Retroana	60,9	42,6	30,9	18,5	11,0	4,7	2,6	19773	708	-	2403	16
Retropav - 4 Camadas	52,4	39,8	31,2	20,5	13,3	6,3	3,2	34924	532	1063	1990	7
Evercalc5	65,0	43,4	32,6	19,9	12,5	5,9	3,2	15000	1012	558	1997	13
Elmod	61,9	44,7	35,4	26,9	21,4	14,7	8,5	11582	2364	1216	840,88	87

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



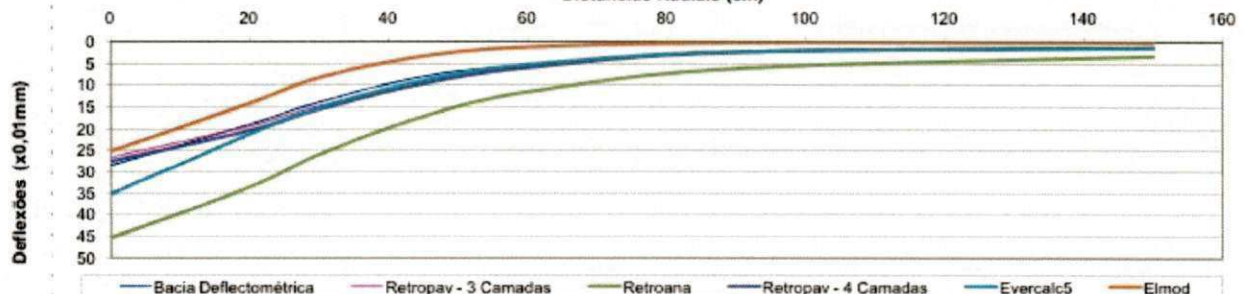
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Bacia Deflectométrica	50,2	36,3	27,2	15,7	10,3	4,2	2	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	48,6	35,9	27,1	17,0	10,3	4,1	2,0	32471	708	-	2996	3
Retroana	61,5	42,1	31,4	19,0	11,6	5,3	3,0	18985	739	-	2162	26
Retropav - 4 Camadas	50,3	37,6	29,0	18,1	11,0	4,2	2,0	35264	479	957	2943	7
Evercalc5	65,1	42,6	31,1	17,6	10,0	3,7	2,0	15000	856	509	2955	16
Elmod	63,4	48,4	39,2	29,6	23,4	15,9	9,4	19513	1519	1330	764,4	186

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Bacia Deflectométrica	28,5	19	13,9	8	5,4	2,5	1,3	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	26,6	19,4	14,8	9,2	5,6	2,4	1,2	55715	1426	-	4980	8
Retroana	45,4	33,7	25,9	17,2	11,6	6,2	3,3	32085	1052	-	1968	113
Retropav - 4 Camadas	27,5	20,4	15,6	9,7	6,0	2,4	1,3	60656	966	1932	4880	11
Evercalc5	35,3	21,2	15,3	8,9	5,3	2,3	1,3	17921	2502	957	4892	12
Elmod	25,2	14,2	8,3	3,4	1,3	0,3	0,2	22666	2108	2108	2203,2	61

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

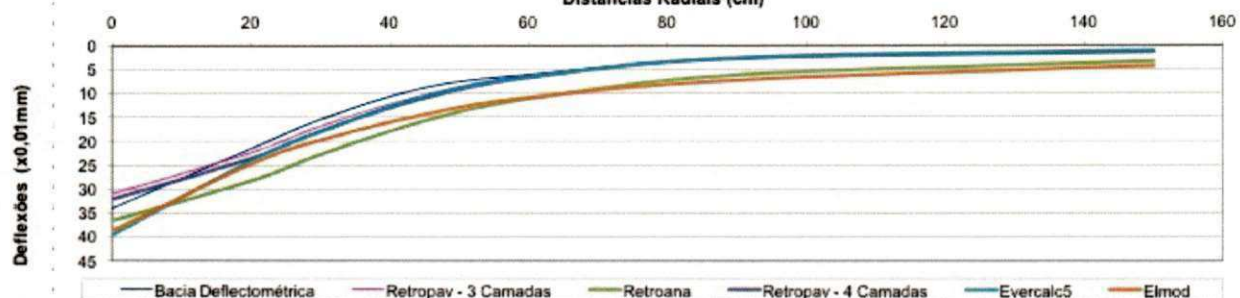




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

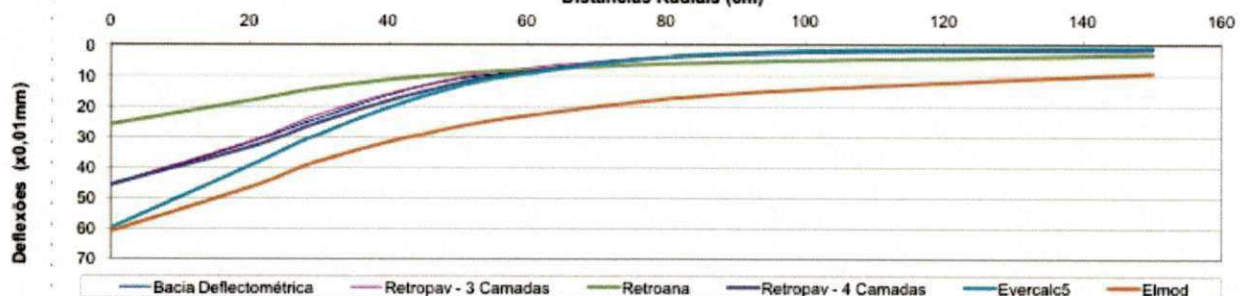
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Bacia Deflectométrica	34	21,6	15,5	8,8	6,1	2,8	1,1	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	31,0	22,4	16,9	10,3	6,3	2,7	1,4	45168	1264	-	4398	13
Retroana	36,6	28,3	22,8	15,8	11,2	6,2	3,3	49726	1242	-	2027	101
Retropav - 4 Camadas	32,1	23,6	17,9	11,0	6,7	2,7	1,4	49231	857	1714	4295	16
Evercalc5	39,6	24,1	18,0	10,7	6,6	2,6	1,1	15000	2873	589	5000	13
Elmod	38,7	24,8	19,8	14,5	10,9	7,3	4,3	15762	2942	2423	1656,8	132

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



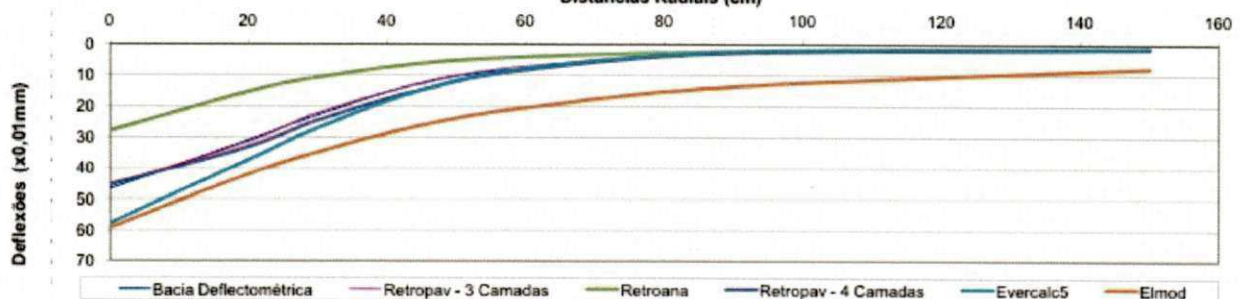
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Bacia Deflectométrica	46,1	31,9	23,8	13,3	8,3	2,9	0,9	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	45,6	31,7	22,7	13,2	7,5	2,8	1,6	26142	884	-	3876	30
Retroana	25,9	18,2	14,1	10,3	8,1	5,5	3,2	29423	4070	-	2181	106
Retropav - 4 Camadas	45,6	33,5	25,3	15,2	8,7	2,9	1,4	35842	522	1044	4090	22
Evercalc5	59,8	39,5	29,1	16,7	9,2	2,5	0,9	16212	1182	344	5000	20
Elmod	60,9	46,6	38,0	29,1	23,1	15,8	9,2	18989	1942	1123	782,2	397

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>					
Bacia Deflectométrica	46,7	30,8	22,7	12,5	7,8	2,8	1,2	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	45,7	31,3	22,1	12,7	7,1	2,7	1,6	24128	929	-	3915	13
Retroana	27,7	15,2	10,7	6,2	4,1	2,3	1,3	18000	2843	-	4795	42
Retropav - 4 Camadas	45,3	32,9	24,4	14,6	8,3	2,8	1,4	34398	548	1096	4158	10
Evercalc5	58,0	37,1	26,8	14,8	8,0	2,4	1,2	15000	1158	441	4679	16
Elmod	59,3	41,9	34,6	26,0	20,4	13,6	7,8	13847	2346	1026	909,2	266

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

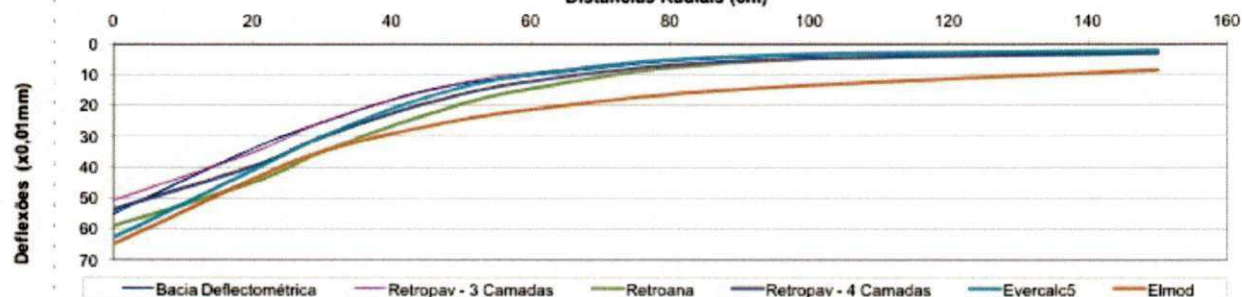




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

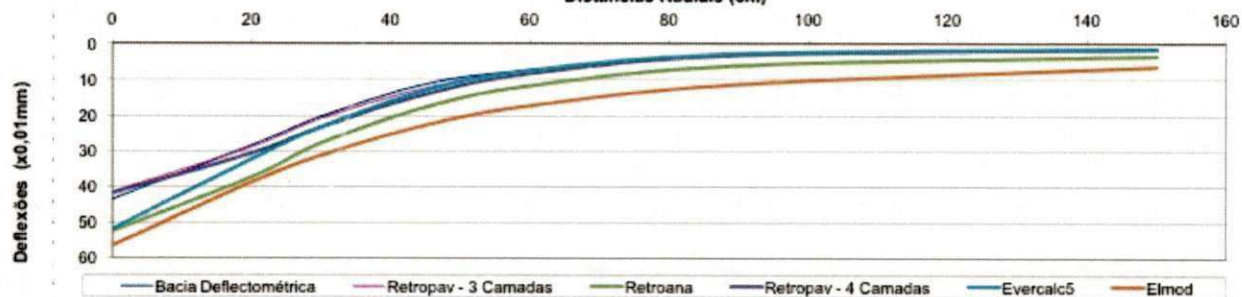
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>						
Estaca 4026	Bacia Deflectométrica	55	34	25,5	15	10,3	4,4	2,2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	50,9	35,3	25,4	15,3	9,3	4,3	2,4	21733	928	-	2640	6
	Retroana	59,0	45,0	35,0	22,9	14,4	5,9	2,6	32085	515	-	2283	35
	Retropav - 4 Camadas	53,7	39,8	30,2	19,2	12,1	5,5	2,9	29922	548	1097	2713	22
	Evercalc5	62,9	41,0	30,0	17,2	9,9	3,9	2,1	15000	935	539	2857	14
	Elmod	65,0	44,0	34,9	26,8	21,3	14,7	8,5	7603	2697	1247	847,3	150

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



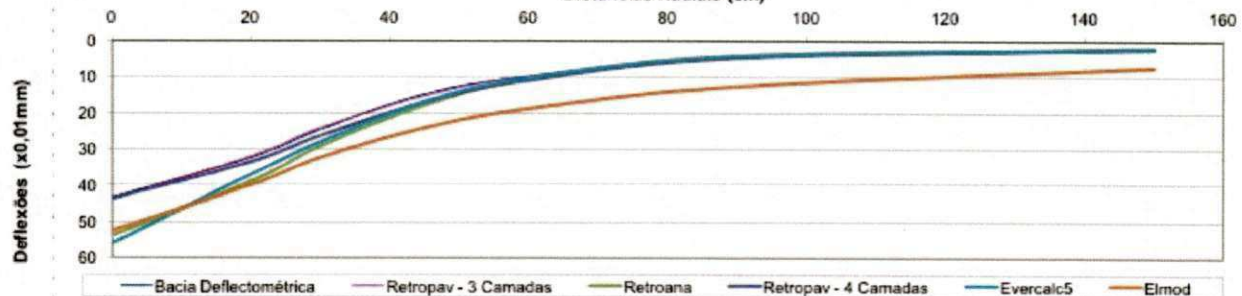
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>						
Estaca 4030	Bacia Deflectométrica	43,6	28,5	20,3	11,2	7,3	3,2	1,5	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	41,6	28,9	20,8	12,4	7,3	3,1	1,7	27657	1055	-	3593	7
	Retroana	52,5	37,4	27,8	17,7	11,7	6,1	3,4	22639	980	-	1938	70
	Retropav - 4 Camadas	41,9	30,7	23,2	14,1	8,3	3,2	1,6	37980	622	1244	3730	13
	Evercalc5	51,9	32,4	23,3	13,0	7,4	2,8	1,5	15000	1355	613	3963	13
	Elmod	56,4	38,8	31,3	22,7	17,3	11,3	6,4	14258	2076	1095	1094,8	171

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>						
Estaca 4034	Bacia Deflectométrica	43,5	32,2	24,4	14,7	9,8	4,6	2,1	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	43,9	31,9	24,0	15,2	9,7	4,6	2,4	31613	972	-	2617	6
	Retroana	53,8	38,9	28,9	17,7	10,6	4,2	2,2	26411	692	-	2775	17
	Retropav - 4 Camadas	43,9	33,4	26,1	16,9	10,8	4,7	2,2	43144	567	1133	2744	8
	Evercalc5	56,1	37,0	27,8	16,8	10,2	4,2	2,0	16128	1412	461	2945	15
	Elmod	52,6	40,0	32,2	24,0	18,7	12,6	7,4	24334	1579	1737	961,5	124

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRAN5 -L

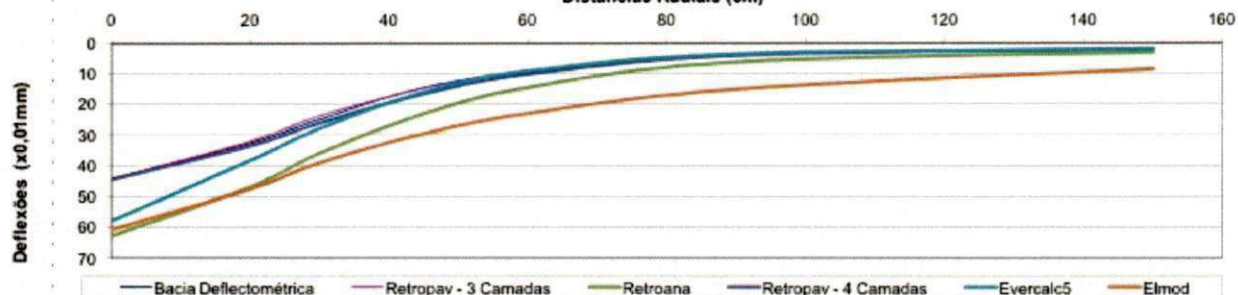




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

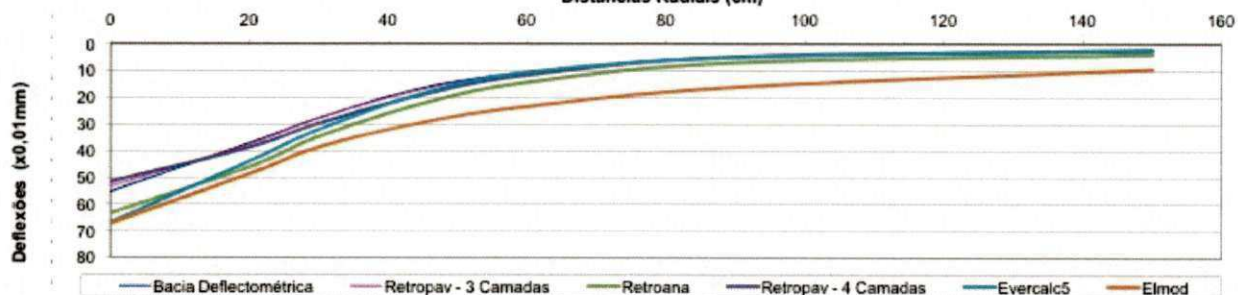
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
	0	20	30	45	60	90	150						
Estaca 4038	Bacia Deflectométrica	44,3	32,6	24,8	14,5	9,6	4	2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	44,7	32,1	23,8	14,7	9,0	3,9	2,1	29920	920	-	2962	4
	Retroana	62,8	46,9	35,9	23,0	14,4	6,1	2,9	26411	553	-	2065	48
	Retropav - 4 Camadas	44,6	33,6	26,1	16,5	10,2	4,1	1,9	40868	538	1077	3121	7
	Evercalc5	57,8	38,3	27,8	15,9	9,0	3,5	2,0	18471	787	703	3093	15
	Elmod	60,8	47,6	39,1	29,6	23,0	15,1	8,5	24585	1640	833	832,5	177

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



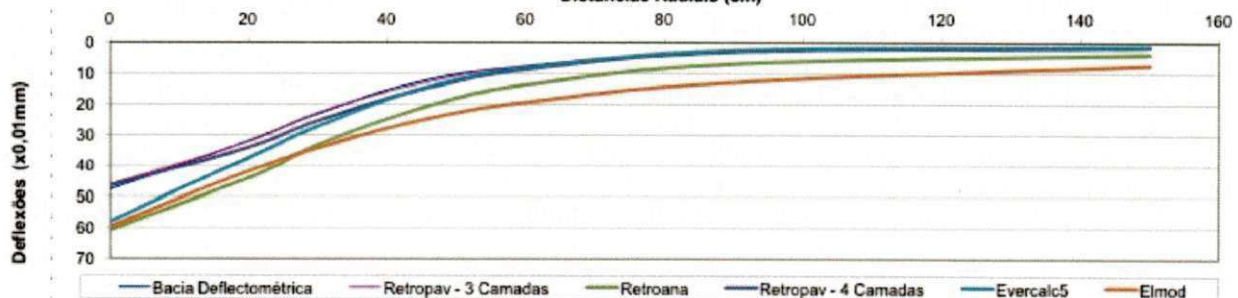
Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
	0	20	30	45	60	90	150						
Estaca 4042	Bacia Deflectométrica	55,4	37,2	27,7	16,3	10,8	4,8	2,3	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	53,4	37,7	27,6	16,9	10,3	4,7	2,6	22772	833	-	2449	6
	Retroana	63,3	46,0	34,6	22,1	14,2	6,8	3,7	21614	699	-	1740	36
	Retropav - 4 Camadas	51,7	38,8	29,7	18,9	11,6	4,7	2,3	34152	483	965	2642	8
	Evercalc5	66,7	43,9	32,0	18,4	10,6	4,9	2,3	15000	813	525	2670	13
	Elmod	67,2	48,7	38,7	29,3	23,3	16,0	9,3	11266	2073	1151	770,5	156

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões (x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
	0	20	30	45	60	90	150						
Estaca 4046	Bacia Deflectométrica	47,9	31,8	23	12,4	7,7	2,9	1,2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	46,4	32,0	22,7	13,1	7,4	2,8	1,6	24520	896	-	3846	13
	Retroana	60,8	44,0	33,0	21,1	13,6	6,8	3,7	21614	763	-	1754	104
	Retropav - 4 Camadas	46,6	33,9	25,2	15,1	8,6	2,9	1,5	33669	530	1059	4026	14
	Evercalc5	58,3	37,3	27,0	14,9	8,1	2,5	1,2	15000	1140	445	4567	16
	Elmod	59,8	41,8	34,0	25,0	19,3	12,7	7,3	14301	1963	1095	968,1	242

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

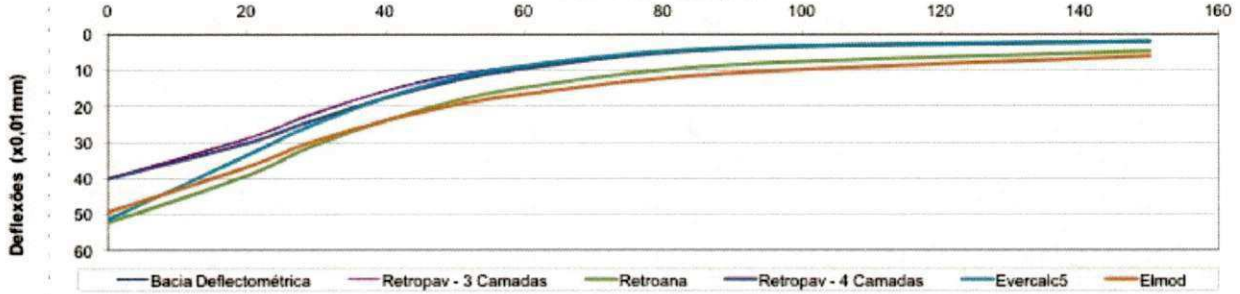




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

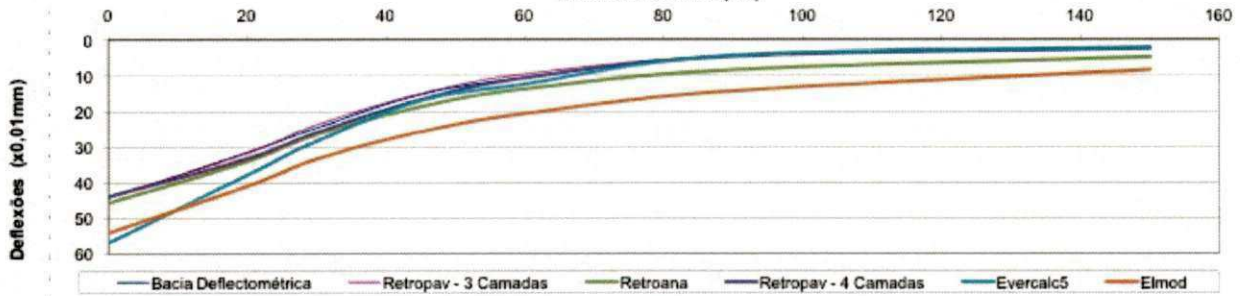
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>						
Estaca 4050	Bacia Deflectométrica	40,1	29	21,9	13,1	8,9	4	2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	40,0	28,9	21,6	13,5	8,5	3,9	2,1	33499	1073	-	2988	3
	Retroana	52,3	39,2	30,6	21,1	14,8	8,5	4,7	28098	1027	-	1444	78
	Retropav - 4 Camadas	40,1	30,3	23,6	15,1	9,5	4,0	2,0	45770	627	1253	3131	7
	Evercalc5	51,4	33,6	24,7	14,6	8,7	3,7	2,0	17881	1274	638	3143	14
	Elmod	49,4	36,9	29,5	21,7	16,7	10,8	6,1	22354	2126	1146	1146,3	110

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPVAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



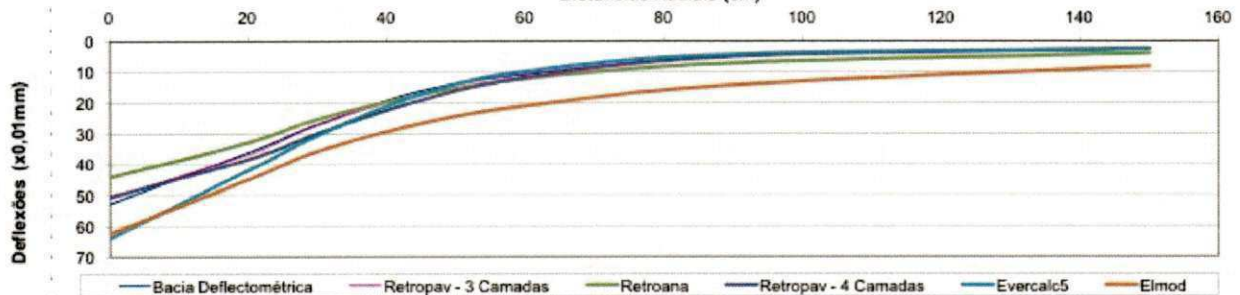
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>						
Estaca 4054	Bacia Deflectométrica	44,2	31,5	24,6	15,2	10,5	4,6	2,2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	43,8	31,7	23,7	15,0	9,5	4,5	2,4	30492	1008	-	2608	5
	Retroana	45,7	34,0	26,5	18,7	13,7	8,4	4,8	28098	1458	-	1438	57
	Retropav - 4 Camadas	43,9	33,2	25,9	16,7	10,6	4,6	2,3	41672	589	1177	2721	5
	Evercalc5	56,9	37,8	28,3	17,0	12,3	4,3	2,1	17758	1211	498	2825	17
	Elmod	54,0	40,9	33,3	25,7	20,6	14,3	8,4	19020	2346	1457	858,9	142

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPVAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS	
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito		
<b>Dist. Radial (cm)</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>150</b>						
Estaca 4058	Bacia Deflectométrica	52,8	35,9	26,8	16	10,9	5,1	2,5	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	51,1	36,5	27,0	16,8	10,6	5,0	2,8	24592	886	-	2332	5
	Retroana	44,2	32,6	25,2	17,3	12,2	7,2	4,0	29423	1346	-	1684	29
	Retropav - 4 Camadas	50,6	38,2	29,7	19,0	11,9	5,1	2,5	35833	500	1000	2487	9
	Evercalc5	64,0	41,9	30,3	17,1	9,8	4,3	2,6	16115	628	966	2471	14
	Elmod	62,5	45,0	35,5	26,5	20,9	14,2	8,2	12217	2106	1199	868,3	119

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPVAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

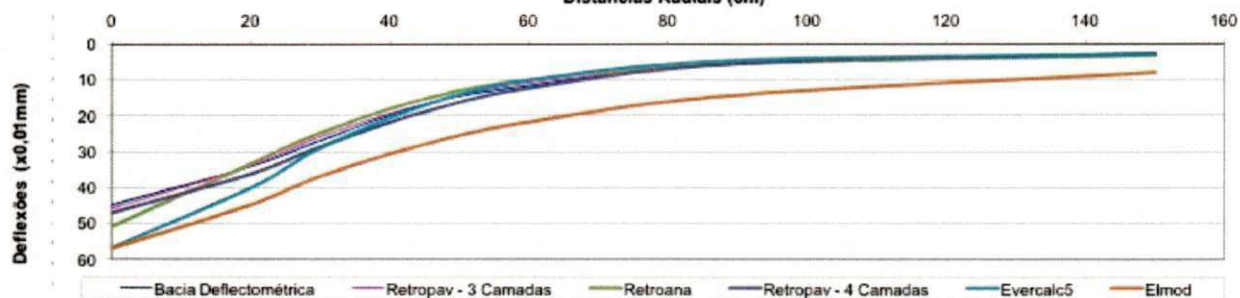




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retro Pav - 3 Camadas, Retroana, Retro Pav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

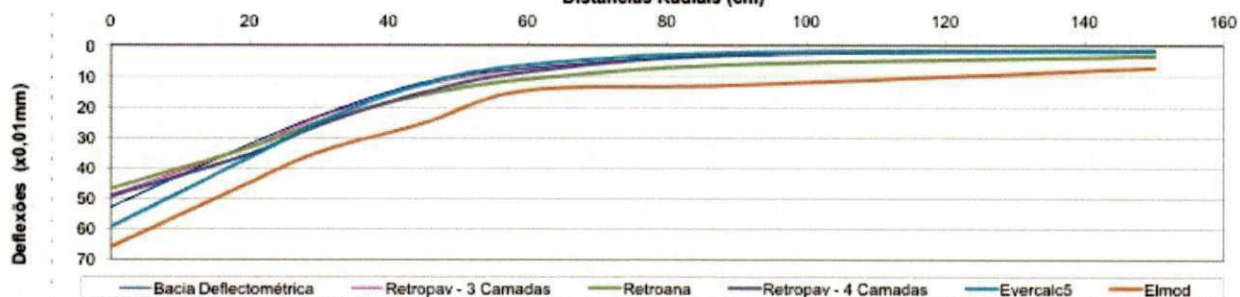
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Estaca 4062	Bacia Deflectométrica	44.9	34.1	26.9	16.8	11.6	5.4	2.7	-	-	-	-	-
	Retro Pav - 3 Camadas	45.9	33.9	25.8	16.7	10.9	5.4	2.4	31907	942	-	2255	5
	Retroana	50.9	33.4	24.8	15.3	10.0	5.5	3.2	18004	1177	-	2113	11
	Retro Pav - 4 Camadas	47.2	36.2	28.6	18.9	12.3	5.5	2.7	42138	527	1053	2349	7
	Evercalc5	56.9	40.1	29.0	17.1	10.1	4.6	2.8	23041	441	3503	2393	15
	Elmod	57.1	44.9	36.9	28.0	21.8	14.3	8.0	26994	1731	879	878.5	108

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPVAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



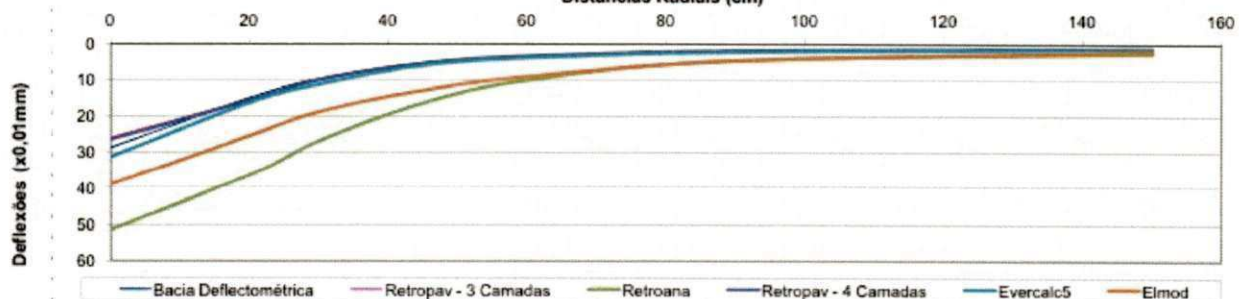
Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Estaca 4066	Bacia Deflectométrica	52.8	32.1	22.8	11.9	7.3	3	1.5	-	-	-	-	-
	Retro Pav - 3 Camadas	48.9	33.0	23.1	13.0	7.3	2.9	1.7	21112	910	-	3675	7
	Retroana	46.8	33.2	24.7	16.0	10.9	6.1	3.4	23405	1246	-	1945	66
	Retro Pav - 4 Camadas	49.4	35.4	25.8	15.2	8.5	2.9	1.6	29108	540	1082	3777	14
	Evercalc5	59.4	36.5	24.9	12.4	6.2	2.3	1.6	15000	580	1551	3905	13
	Elmod	66.0	44.8	34.7	25.2	14.5	12.8	7.2	8964	2126	973	972.8	198

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPVAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos	Dist. Radial (cm)	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Estaca 4070	Bacia Deflectométrica	28.6	14.9	9.6	5.2	3.5	1.9	1	-	-	-	-	-
	Retro Pav - 3 Camadas	25.9	15.4	10.0	5.6	3.4	1.8	1.1	21318	2709	-	5904	7
	Retroana	51.6	36.4	26.7	16.3	10.0	4.5	2.5	23405	866	-	2529	160
	Retro Pav - 4 Camadas	26.3	15.6	9.9	5.3	3.3	1.8	1.1	22751	2119	4236	5795	6
	Evercalc5	31.1	16.2	11.1	5.9	3.8	2.2	1.3	15000	2242	3246	5000	16
	Elmod	39.0	25.3	18.7	12.8	9.0	4.6	2.0	9883	5494	537	3165.3	114

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPVAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

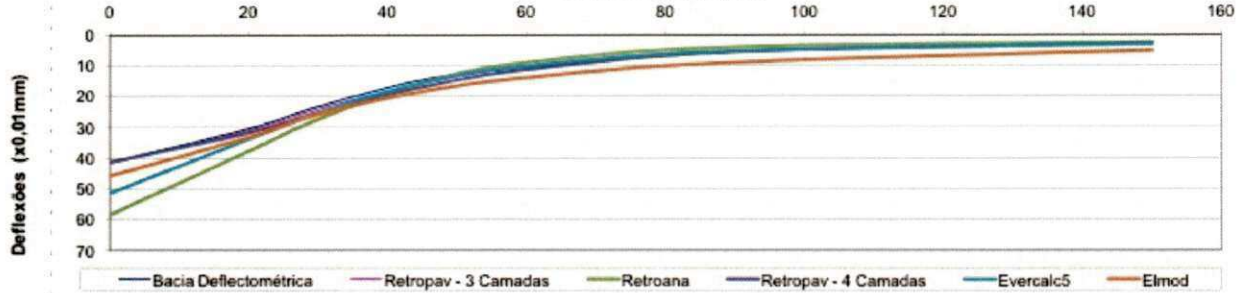




**Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.**

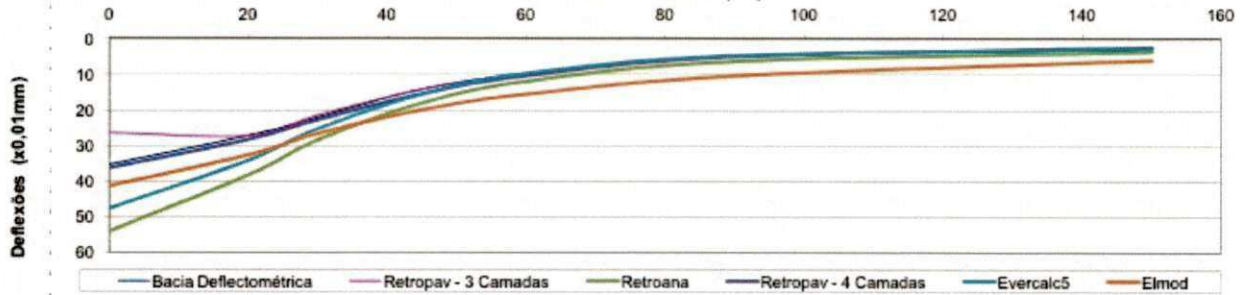
Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4074	Bacia Deflectométrica	41,5	30,4	23,3	14,6	10,5	5,5	3	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	41,8	30,9	24,0	15,7	10,5	5,6	2,9	34836	1113	-	2223	3
	Retroana	58,5	37,7	27,3	15,5	9,0	4,0	2,4	16137	844	-	2717	24
	Retropav - 4 Camadas	41,3	31,7	25,2	16,9	11,3	5,5	2,8	47234	674	1347	2303	8
	Evercalc5	51,5	33,8	25,3	15,5	10,0	5,2	2,9	17748	1232	955	2226	11
	Elmod	45,8	33,2	25,8	18,5	13,9	9,0	5,2	22549	1800	1760	1342,5	40

**BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L**



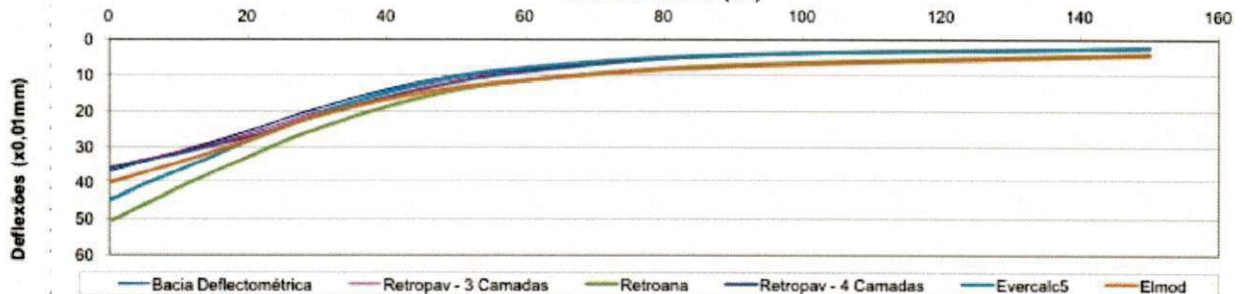
Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4078	Bacia Deflectométrica	35,3	27,2	22	14,1	9,9	5	2,8	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	26,5	27,3	21,4	14,2	9,6	5,0	2,7	42545	1236	-	2461	10
	Retroana	54,0	38,2	28,3	18,0	11,9	6,3	3,6	20979	995	-	1863	34
	Retropav - 4 Camadas	36,3	28,3	22,7	15,4	10,4	5,0	2,4	57956	717	1433	2577	7
	Evercalc5	47,7	34,1	25,2	15,5	9,7	4,7	2,7	28146	666	1869	2429	18
	Elmod	41,3	32,6	26,6	19,9	15,5	10,4	6,0	37782	1828	2069	1173	66

**BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L**



Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4082	Bacia Deflectométrica	37	25,5	19,2	11,8	8,4	4,4	2,5	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	36,1	26,3	20,1	12,9	8,5	4,3	2,4	37059	1321	-	2751	5
	Retroana	51,0	32,7	24,8	16,2	11,5	7,1	4,1	14685	1526	-	1669	44
	Retropav - 4 Camadas	36,0	27,2	21,2	13,9	9,1	4,4	2,3	48951	817	1636	2814	9
	Evercalc5	45,1	28,2	20,7	12,3	7,9	4,2	2,4	16613	1572	1150	2743	10
	Elmod	40,4	28,1	21,2	15,0	11,4	7,6	4,4	19912	2158	2578	1581,9	44

**BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L**

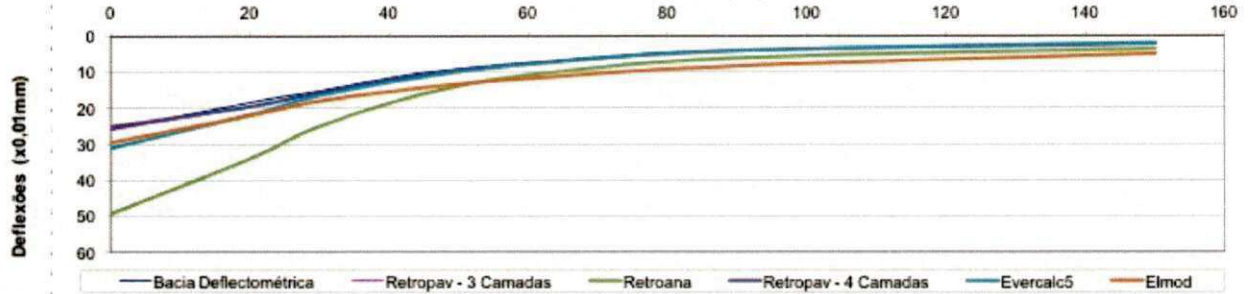




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

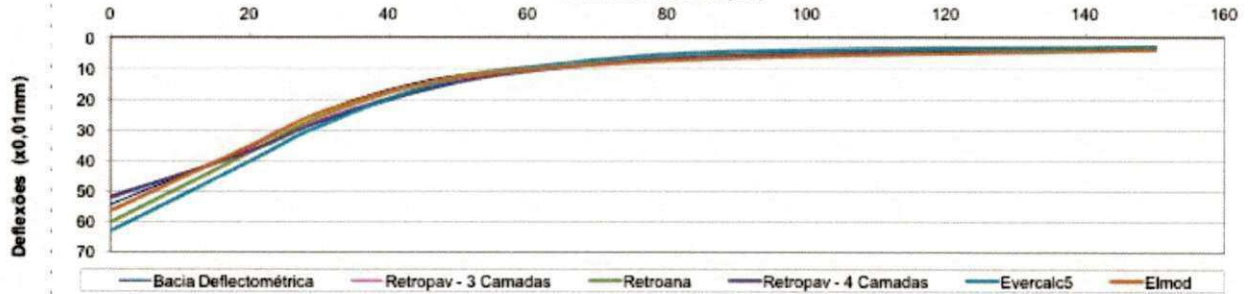
Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4086	Bacia Deflectométrica	25,9	18,4	15,1	10,2	7,7	4,2	2,2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	25,9	19,5	15,4	10,5	7,4	4,2	2,3	58294	2009	-	2936	3
	Retroana	49,4	34,0	25,0	16,0	10,9	6,2	3,6	19091	1293	-	1883	67
	Retropav - 4 Camadas	25,2	19,6	15,8	11,0	7,7	4,1	2,2	79239	1271	2541	3016	4
	Evercalc5	31,1	21,8	16,5	11,3	7,9	4,2	2,0	25565	4006	841	3142	12
	Elmod	29,6	22,0	18,0	14,3	11,8	8,4	5,0	24653	6066	2983	1449,2	67

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



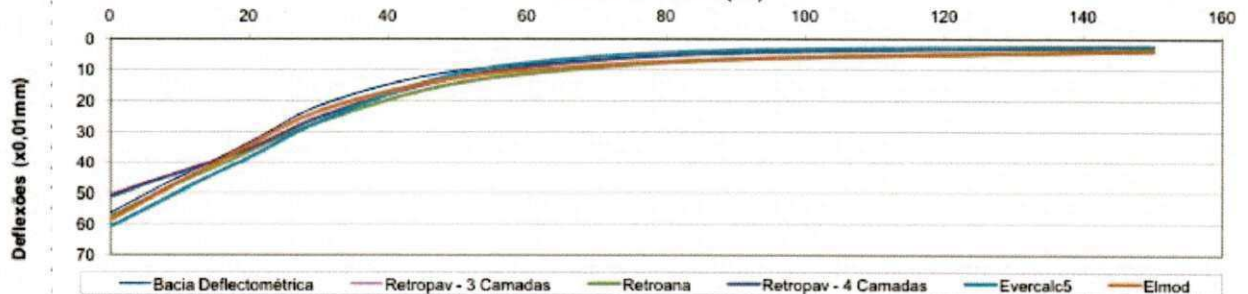
Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4090	Bacia Deflectométrica	54,4	35,7	24,2	14,1	10	5,7	3	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	52,5	36,5	26,6	16,6	10,7	5,6	3,2	19977	1034	-	2065	9
	Retroana	60,1	37,3	25,6	15,0	9,7	5,4	3,2	10858	1140	-	2112	6
	Retropav - 4 Camadas	51,9	37,0	27,3	17,1	10,9	5,6	3,2	24270	741	1481	2037	11
	Evercalc5	63,1	40,2	28,7	16,1	9,6	4,3	3,0	15000	608	1802	2203	15
	Elmod	56,4	35,2	24,4	15,0	10,4	6,6	3,9	11559	1141	2246	1769,2	13

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm <sup>2</sup> )				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4094	Bacia Deflectométrica	56,5	33,3	21,5	12,2	8,4	4,6	2,2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	50,9	35,1	25,2	15,2	9,3	4,5	2,5	20779	975	-	2531	14
	Retroana	57,7	36,1	26,7	16,6	11,3	6,6	3,8	12730	1231	-	1770	38
	Retropav - 4 Camadas	51,3	35,2	25,1	14,8	9,1	4,5	2,7	21014	773	1547	2454	14
	Evercalc5	61,0	38,1	26,6	14,2	7,8	3,6	2,3	15000	592	1783	2814	15
	Elmod	58,9	34,2	23,3	14,6	10,3	6,6	3,9	7892	1431	1943	1787	36

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

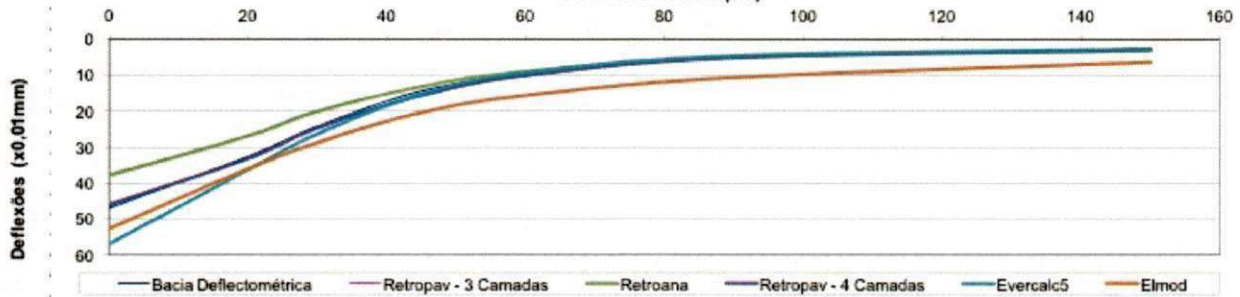




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

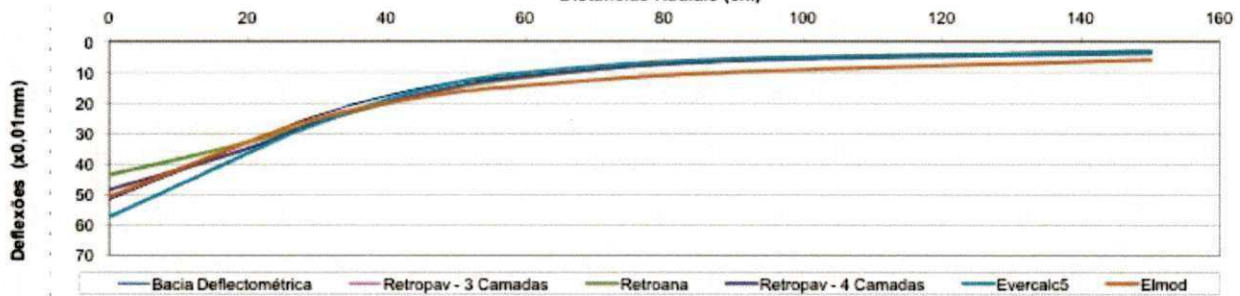
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm²)				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	0	20	30	45	60	90	150					
Bacia Deflectométrica	46,9	32,5	24,2	14,3	10	5,1	2,8	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	45,8	33,1	24,8	15,8	10,2	5,0	2,8	28682	1005	-	2358	4
Retroana	37,7	26,8	20,0	13,1	8,9	5,0	2,9	29423	1562	-	2348	13
Retropav - 4 Camadas	46,0	33,1	24,6	15,5	10,0	5,1	2,9	29041	800	1599	2286	4
Evercalc5	57,0	36,2	26,3	15,2	9,3	4,6	2,7	15000	987	982	2392	11
Elmod	52,7	36,0	28,7	20,4	15,6	10,6	6,3	16779	1539	2365	1131,3	68

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



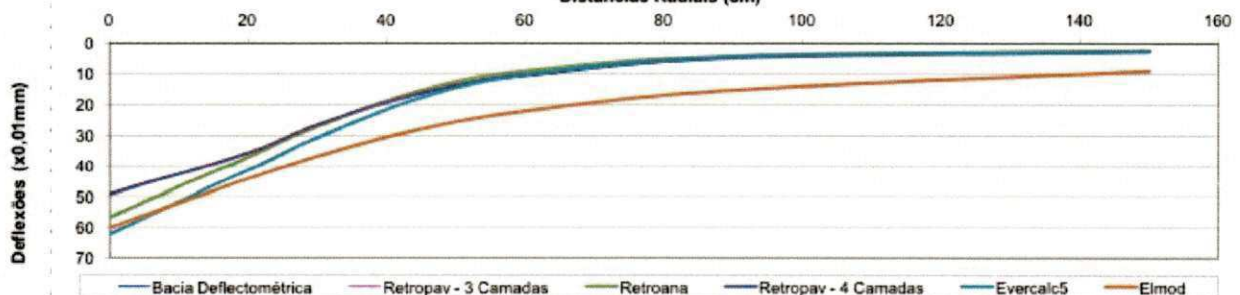
Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm²)				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	0	20	30	45	60	90	150					
Bacia Deflectométrica	51,6	33,1	24	15,2	11,1	6,3	3,2	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	48,4	34,7	26,0	16,9	11,4	6,2	3,5	24437	1130	-	1912	7
Retroana	43,5	33,0	26,1	17,4	11,7	5,8	3,0	39780	921	-	2154	10
Retropav - 4 Camadas	48,5	35,0	26,2	17,0	11,3	6,2	3,6	26478	857	1713	1871	8
Evercalc5	57,4	36,5	26,7	15,8	10,1	5,6	3,3	15000	894	1496	2014	9
Elmod	50,6	32,8	24,9	18,1	14,3	9,9	5,8	10180	2390	2390	1230,89	40

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos	Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm²)				RMS
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
<b>Dist. Radial (cm)</b>	0	20	30	45	60	90	150					
Bacia Deflectométrica	49,1	35,6	26,3	15,6	10,8	4,8	2,3	-	-	-	-	-
Retropav - 3 Camadas	49,1	35,4	26,4	16,5	10,3	4,7	2,6	27270	868	-	2487	6
Retroana	56,9	36,8	26,8	15,3	9,0	4,1	2,4	16602	883	-	2660	11
Retropav - 4 Camadas	49,4	35,5	26,3	16,2	10,1	4,8	2,7	27469	686	1372	2400	7
Evercalc5	62,4	41,2	30,4	17,6	10,3	4,3	2,4	16154	878	585	2618	15
Elmod	60,3	44,3	36,6	27,7	22,0	15,3	9,1	18581	1645	1644	793,1	149

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

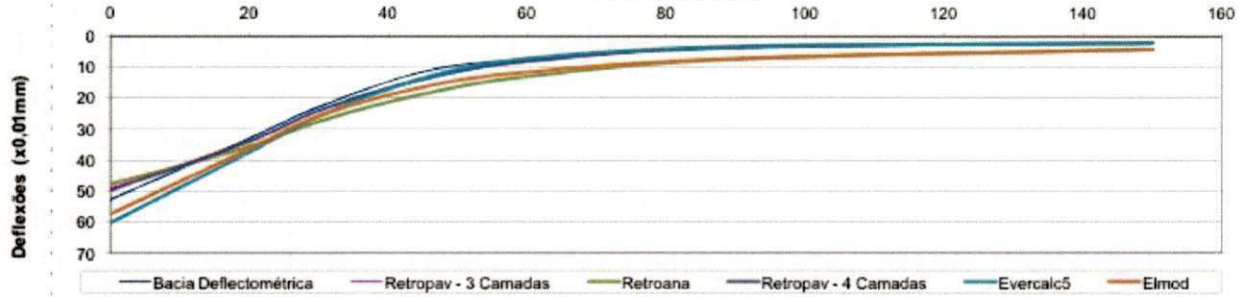




Reconstituição da Bacia Deflectométrica utilizando o programa de análise tensão/deformação FEPAV2V alimentado com os módulos provenientes da Retroanálise dos programas Retropav - 3 Camadas, Retroana, Retropav - 4 Camadas, Evercalc5 e Elmod.

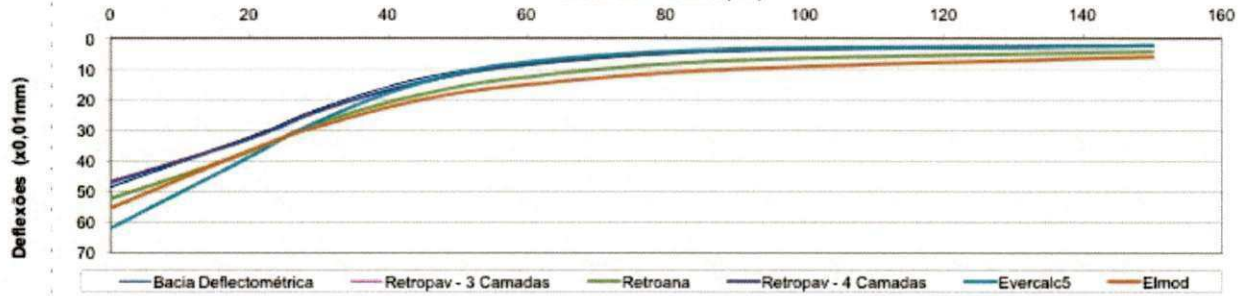
Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm²)				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4110	Bacia Deflectométrica	52,7	32,9	22,8	11,5	7,4	3,7	2,2	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	49,1	33,8	24,1	14,1	8,3	3,6	2,1	22217	923	-	3085	11
	Retroana	47,8	35,6	27,5	18,7	13,0	7,4	4,1	29423	1121	-	1647	63
	Retropav - 4 Camadas	49,8	34,0	24,1	13,8	8,1	3,6	2,2	22309	726	1451	2974	9
	Evercalc5	60,2	37,3	25,8	13,5	7,2	3,2	2,1	15000	588	1778	3102	12
	Elmod	57,5	36,4	25,8	16,4	11,6	7,2	4,2	10950	1371	1520	1638,1	57

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm²)				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4114	Bacia Deflectométrica	48,6	32,3	23	12,7	8,4	3,9	2,3	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	46,6	32,7	23,8	14,3	8,6	3,8	2,1	25442	946	-	2984	6
	Retroana	52,4	37,1	27,7	18,2	12,5	7,1	4,1	20395	1166	-	1661	50
	Retropav - 4 Camadas	47,1	32,9	23,7	14,0	8,4	3,8	2,2	25573	745	1489	2877	5
	Evercalc5	61,9	38,7	26,9	14,2	7,6	3,4	2,2	15000	559	1743	2965	16
	Elmod	55,4	36,7	28,7	20,0	15,0	9,9	5,8	14042	1559	1784	1212,1	90

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L



Segmentos Homogêneos		Deflexões ( x 0,01 mm)							Módulos Retroanalizados (kgf/cm²)				RMS
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Revest.	Base	Subbase	Subleito	
Dist. Radial (cm)		0	20	30	45	60	90	150					
Estaca 4118	Bacia Deflectométrica	43,5	31,1	23,7	14,4	10	4,9	2,4	-	-	-	-	-
	Retropav - 3 Camadas	43,2	31,4	23,7	15,2	9,8	4,8	2,6	31605	1045	-	2464	4
	Retroana	49,8	36,1	27,2	17,6	11,6	6,0	3,3	26514	980	-	1993	22
	Retropav - 4 Camadas	43,3	31,4	23,5	14,9	9,6	4,9	2,7	31999	832	1663	2390	5
	Evercalc5	54,7	35,9	26,9	16,3	10,1	4,5	2,3	16138	1406	559	2648	14
	Elmod	50,9	37,6	29,9	22,2	17,4	11,8	7,0	20308	1876	1868	1022,3	97

BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS RECONSTITUÍDAS PELO PROGRAMA JULEA COM OS MÓDULOS RETROANALISADOS DOS PROGRAMAS RETROPAV, REPAV, REPAV V2, RETROANA E RETRANS -L

