

**AVALIAÇÃO DO EVERCALC 5.0 NA RETROANÁLISE DE  
PAVIMENTOS DO RIO GRANDE DO SUL – ESTUDO DE CASO NA  
BR-116/RS (KM 291+500 AO KM 301+500).**

**RELATÓRIO FINAL**

**VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE RETROANÁLISE COM O USO DE  
SOFTWARES DE ANÁLISE TENSÃO-DEFORMAÇÃO**

Data: Junho/2006

## 1. INTRODUÇÃO

Os conceitos da mecânica dos pavimentos não são tão recentes, mas sua utilização ficou restrita durante muito tempo devido à dificuldade que se encontrava no processamento de dados. Isto só veio mudar com a popularização de microcomputadores.

A mecânica dos pavimentos aliada à utilização de microcomputadores consistem nas principais ferramentas para o conhecimento das características elásticas de pavimentos em uso, pois através de dados de campo (bacias de deflexões levantadas com Falling Weight Deflectometer – FWD) é possível a realização do processo de retroanálise para que se tenha conhecimento dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e subleito. Após isso fica possível a realização de análise de tensão-deformação para a avaliação da condição estrutural de pavimentos.

A grande limitação na utilização de métodos de retroanálise de pavimentos consiste no erro que se comete na determinação dos módulos de resiliência, visto através do ajuste da bacia de deflexões experimental (campo) e teórica (calculada). Esses erros podem ser maiores devido às condições dos pavimentos na ocasião do ensaio (grau de trincamento) e quando na escolha do método computacional para a retroanálise (métodos que calculam os parâmetros elásticos durante o processamento, métodos que utilizam banco de dados e métodos que utilizam equações de regressão estatística).

Uma outra limitação na utilização de softwares para a realização de retroanálises consiste no custo de obtenção do mesmo, via de regra bastante alto para a parcela da sociedade interessada (universidades, empresas projetistas, empresas concessionárias, acadêmicos em geral etc.).

Neste trabalho será avaliado o desempenho do software EVERCALC 5.0 (software que utiliza o método de cálculo de parâmetros elásticos durante o processamento) na retroanálise de pavimentos asfálticos do estado do Rio Grande do Sul. Para tanto será realizado um estudo de caso em um pavimento revestido em CBUQ e situado neste mesmo estado (BR-116/RS – km 291+500 ao km 301+500).

Este software, que foi elaborado pelo Departamento de Transporte do Estado de Washington nos EUA, já é bem difundido no mesmo país e tem a vantagem de ser de domínio público (gratuito).

A avaliação deste software de retroanálise deverá seguir as seguintes etapas de trabalho:

- 1) Análise dos dados de levantamento de campo e verificação das condições do pavimento;
- 2) Retroanálise das bacias deflectométricas a partir do software EVERCALC 5.0 e avaliação de confiabilidade;
- 3) Ensaaios laboratoriais para determinação de módulo de resiliência dos materiais que compõem o corpo estradal;
- 4) Validação do processo de retroanálise com o uso de softwares de análise tensão-deformação (tipo ELSYM5, FEPAVE ou EVERSTRESS). Esta validação será feita a partir da comparação entre as bacias deflectométricas levantadas em campo e as bacias deflectométricas fornecidas por esses programas usando os módulos retroanalizados.

Este relatório tem por objetivo apresentar os resultados obtidos na quarta etapa de trabalho e uma conclusão final da pesquisa, constituindo-se, portanto, em um relatório final.

## **2. SITUAÇÃO ATUAL DO PAVIMENTO**

A avaliação do pavimento da BR-116/RS (km 291+500 ao km 301+500) foi realizada a partir dos dados fornecidos pela concessionária de rodovias CONCEPA (levantamentos realizados em Dezembro de 2005), sendo eles:

- a) inventários de estado de superfície com cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG), à luz do Procedimento DNIT PRO-08/94, realizados pela empresa contratada RODOCOM; e
- b) bacias de deflexão, levantadas com deflectógrafo de massa tombante (FWD) pela empresa contratada STE.

### **2.1. Inventário de Estado de Superfície**

O inventário do estado de superfície do pavimento tem por objetivo realizar a contagem e classificação de ocorrências de defeitos (trincas, ondulações, remendos, exudações, afundamentos plásticos, desgastes e buracos) e da medida de deformações permanentes nas trilhas de roda.

A condição do pavimento quanto ao estado de superfície será posteriormente traduzida através de um parâmetro chamado Índice de Gravidade Global (IGG), que retrata o grau de deterioração atingido pela superfície do pavimento. Isto servirá para que se realize a análise crítica dos resultados que serão obtidos futuramente na etapa de retroanálise (objeto do próximo relatório parcial desta pesquisa).

Os inventários de estado de superfície na BR-116/RS (km 291+500 ao km 301+500) foram feitos nas duas faixas de rolamento. Os resultados foram agrupados conforme o IGG, observando-se os limites indicados no PRO-08/94, como mostrado no Quadro 1, abaixo.

Quadro 1 – Conceitos de pavimentos em função do IGG (PRO-08/94).

Conceito	Limites de IGG
Bom	0 – 20
Regular	20 – 80
Mau	80 – 150
Péssimo	150 -500

No Quadro 2 apresenta-se, de forma esquemática, os resultados dos inventários de estado de superfície, do pavimento das faixas direita e esquerda e do conjunto (denominado de duas faixas).

Quadro 2 – Resultados dos inventários de estado de superfície.

Conceito do pavimento de acordo com o IGG	Extensão na Faixa Esquerda (%)	Extensão na Faixa Direita (%)	Extensão das duas faixas (%)
Bom	0	0	0
Regular	22	57	38
Mau	78	43	62
Péssimo	0	0	0

Observa-se que na maior parte (aproximadamente 62%) do sub-trecho o pavimento se encontra na situação “má”, e no restante (aproximadamente 38%) o conceito do pavimento, em função do IGG, é “regular”. Não há segmentos nas condições “boa” ou “péssima”. Os defeitos predominantes são as trincas (FC-1, FC-2 e FC-3), com uma presença significativa de áreas que apresentam “desgaste”.

## 2.2. Resultados de levantamentos defletométricos

Os equipamentos conhecidos como Falling Weight Deflectometer (FWD) são medidores de deflexão que transferem uma carga dinâmica de impacto ao pavimento.

O FWD simula o efeito da passagem de uma roda em movimento sobre o pavimento. Essa simulação é feita através da queda de um conjunto de massas, de uma determinada altura, sobre um sistema de amortecedores capazes de transmitir ao pavimento um pulso de carga com formato aproximadamente igual a uma senóide.

A carga é transmitida ao pavimento através de uma placa de 30cm de diâmetro. A carga é medida através de uma célula de carga e tem duração de 25 a 30ms, tempo correspondente ao da passagem de um veículo com velocidade de 60 a 80km/h.

Na realidade, o FWD aplica pulsos de carga no pavimento em forma de ondas, que se propagam no interior da estrutura a velocidades finitas e são registradas em diferentes instantes pelos sensores.

As deflexões são medidas através de sete sensores: geofones do FWD Dynatest (Figura 1). Esses dados são todos lidos e registrados automaticamente em um microcomputador.



Figura 1 – Equipamento FWD utilizado nos levantamentos (foto catálogo).

Os levantamentos defletométricos com FWD na BR-116/RS (km 291+500 ao km 301+500) foram realizados tanto na pista de rolamento quanto nos acostamentos.

### *2.2.1. Deflexões nos Acostamentos*

O Quadro 3 apresenta as distribuições por classes das deflexões medidas nos acostamentos, observando que em ambos os acostamentos a maioria (62%) das deflexões encontra-se no intervalo entre 60 e 100 centésimos de milímetros. Em geral observam-se valores de deflexão bastante elevados, identificando um pavimento comprometido do ponto de vista estrutural.

Quadro 3 – Resultados dos levantamentos deflectométricos – acostamento.

Deflexão (10 <sup>-2</sup> mm)	Acostamento Esquerdo (%)	Acostamento Direito (%)	Dois Acostamentos (%)
0 – 60	11	17	13
60 – 100	64	61	62
100 – 130	15	10	13
130 – 200	4	8	9
200 – 320	6	4	3

### *2.2.2. Deflexões nas Faixas da Pista de Rolamento*

O Quadro 4 apresenta as distribuições por classes das deflexões medidas nas faixas da pista de rolamento.

Observa-se que, globalmente, em quase 60% do total da extensão das duas faixas a deflexão medida excede o valor a admissível (49 x 10<sup>-2</sup> mm), evidenciando a necessidade de reforço estrutural no trecho considerado. Esta condição é observada em grande parte da malha rodoviária do estado do Rio Grande do Sul no Brasil.

Quadro 4 – Resultados dos levantamentos deflectométricos – pista.

Deflexão (10 <sup>-2</sup> mm)	Faixa Esquerda (%)	Faixa Direita (%)	Duas Faixas (%)
0 – 25	23	21	22
25 – 50	21	19	20
50 – 75	52	58	55
75 – 125	4	2	3

### 3. RETROANÁLISE

O principal objetivo da retroanálise é de fornecer propriedades de camadas do pavimento em funcionamento, as quais são utilizadas em projetos de restauração.

A retroanálise baseia-se na interpretação do formato e magnitude do deslocamento da superfície do pavimento, conhecida como bacia deflectométrica, quando esta é submetida à ação de cargas. A retroanálise é importante porque:

- 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 pavimentos mais duráveis e de custo mais baixo.

As retroanálises das bacias de deflexões da BR-116 (km 291+500 ao km 301+500) para obtenção dos módulos das camadas ponto a ponto foram realizadas através do programa EVERCALC 5.0.

O EVERCALC 5.0 é um programa utilizado na realização de retroanálises para obtenção de módulos de resiliência das diversas camadas do pavimento. Foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado de Washington (EUA), sendo um programa de uso gratuito. Em virtude dos resultados deste software fornecer estatísticas de erros das suas determinações bastante favoráveis (baixíssimos desvios-padrão dos erros), o uso de tal programa se consolidado em todo os EUA.

Ele utiliza uma sub-rotina do programa WESLEA para calcular as deflexões teóricas pelo modelo de multicamadas elásticas e algoritmo modificado de Gauss-Newton para a otimização. Em suma, o programa calcula a bacia de deflexões teóricas e compara-a com a bacia de deflexões medida pelo FWD, ajustando os valores dos módulos das camadas do pavimento por iterações até uma diferença entre a bacia calculada e a bacia medida que se considere adequada.

O programa permite utilizar dados de até 10 sensores e de 16 golpes para cada ponto de ensaio com FWD. O número de camadas para análise deve ser limitado em 05.

A partir de valores iniciais de módulos para cada camada propostos pelo usuário, o programa busca, mediante iterações sucessivas, os valores de módulo de cada camada, até que a diferença entre a bacia de deflexões medida e calculada seja menor que uma tolerância.

O módulo de cada camada é corrigido para uma carga aplicada de 40KN, e o módulo da camada asfáltica ainda pode ser corrigido para a temperatura de 25°C, porém requer a utilização de vários dados de medição de temperatura, muitas vezes não disponíveis.

A checagem de erros do processo de retroanálise pode ser realizada pelo “Root Mean Square Error” (RMS). O RMS constitui-se na raiz quadrada das somas dos quadrados das diferenças entre as deformadas calculadas e medidas. Ele apresenta um resultado melhor que outros métodos de verificação de erros conhecidos (soma dos quadrados das diferenças entre as deformações elásticas medidas e calculadas e soma das diferenças absolutas entre as deformações elásticas medidas e calculadas), pois a abrangência da checagem é independente do número de pontos de leitura das deformações na superfície deformada. O cálculo do RMS é realizado pela seguinte expressão:

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2}$$

Onde  $d_{ci}$  e  $d_{mi}$  são as deflexões calculadas e medidas e  $n$  é o número de sensores.

Uma vez encerrado o cálculo o programa ainda realiza uma análise tensão-deformação em pontos críticos das diversas camadas da estrutura do pavimento.

As Figuras 2 a 5 apresentam um exemplo da entrada de dados para a realização de uma retroanálise de leitura de sensores de FWD no km 297+340 (lado direito) e o seu resultado, de acordo com dados fornecidos pela CONCEPA.

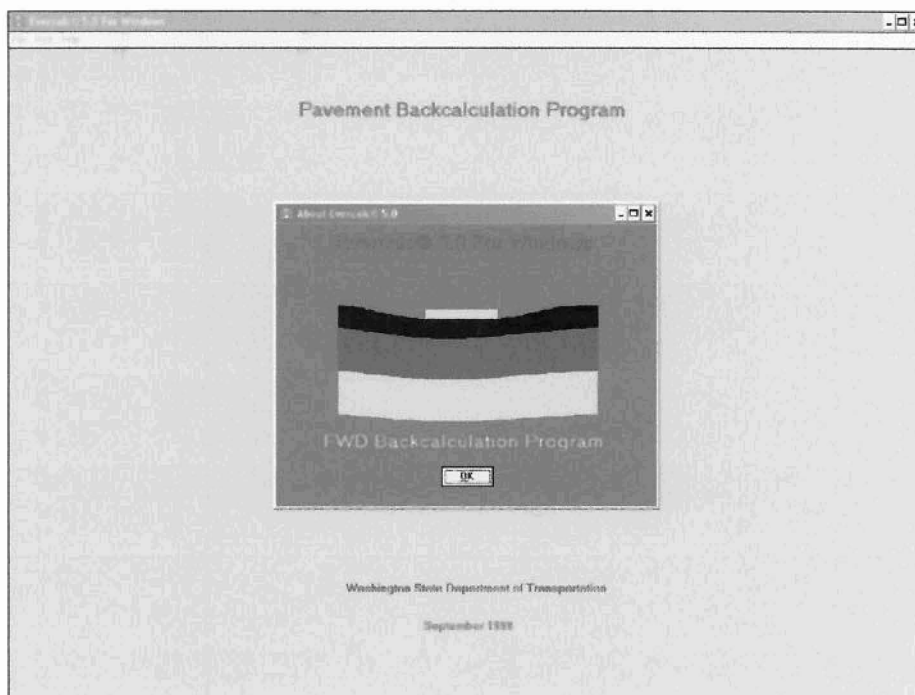


Figura 2 – Tela de abertura do EVERCALC 5.0.

General Data Entry - C:\EVERSERS\EVERCALC\CONCEPA.GEN

Title:

No of Layers:  No of Sensors:  Plate Radius (cm):

Units: ☒ Metric ☐ US Units ☐ Stiff Layer ☐ Temp. Correction

Temp. Measurement: ☒ Direct Method ☐ Southgate Method

Seed Moduli: ☒ Internal ☐ User Supplied

Sensor Weigh Factor: ☒ Uniform ☐ Inverse First Sensor ☐ User Supplied

Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Radial Offset (cm):	<input type="text" value="0,0"/>	<input type="text" value="20,0"/>	<input type="text" value="30,0"/>	<input type="text" value="45,0"/>	<input type="text" value="65,0"/>	<input type="text" value="90,0"/>	<input type="text" value="120,0"/>

Layer Information					
No	Layer ID	Poisson' Ratio	Initial Modulus (MPa)	Min. Modulus (MPa)	Max. Modulus (MPa)
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="3,00"/>	<input type="text" value="2500,0"/>	<input type="text" value="500,0"/>	<input type="text" value="15000,0"/>

Max. Iteration:  RMS Tol. (%):  Modulus Tol. (%):

Figura 3 – Tela para a entrada de dados gerais sobre o pavimento.

Deflection Data Entry - C:\EVERSERS\EVERCALC\LE297340.DEF

Route:

**Station Information**

Station	H(1) (cm)	H(2) (cm)	No. of Drops
297+340	31,00	23,50	1

**Deflection Information**

Sensor Deflection (microns)

Drop No	Load (N)	1	2	3	4	5	6	7
1	41900,00	331,000	237,000	198,000	151,000	117,000	86,000	68,000

Figura 4 – Tela para a entrada de dados de deflexão e espessuras das camadas do ponto.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - C:\EVERSERS\EVERCALC\LE297340.OUT

Options

*BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Summary Output*

Route: Concepa - Bacia LD297+340  
 Plate Radius (cm): 15.0  
 No of Sensors: 7  
 Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 65.0 90.0 120.0

No of Layers: 3  
 Stiff Layer: No  
 P-Ratio: .300 .400 .450

Station	Load (N)	E(1)(MPa)	E(2)(MPa)	E(3)(MPa)	RMS Error
297+340	Thickness (cm)	31.00	23.50	-	-
297+340	41900.0	1027.5	211.4	149.8	2.80

Figura 5 – Tela de resultado da retroanálise.

Os resultados das retroanálises do trecho km 291+500 ao km 301+500 da BR-116 encontram-se em anexo, assim como os gráficos unifilares para cada lado da pista e acostamento, apresentando espessura da capa, deflexões medidas com FWD e os módulos de resiliência retroanalizados da capa, base e subleito.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se a excelente confiabilidade dos mesmos, ficando os valores de RMS sempre abaixo de 20%.

Alguns dos resultados foram ditos insatisfatórios. Nestes locais o pavimento encontrava-se bastante trincado, comprometendo a aquisição dos dados de bacias deflectométricas com FWD, o que repercutiu no processo de retroanálise. Contudo isto foi mais observado nos acostamentos, onde os defeitos eram bem mais expressivos.

#### **4. ENSAIOS LABORATORIAIS**

Foram realizados ensaios em corpos-de-prova extraídos aleatoriamente da camada de rolamento no trecho entre o km 291+500 e km 301+500 da BR-116/RS. Os ensaios, realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, foram os de resistência à tração e módulo de resiliência.

A realização destes ensaios servirá para comprovar a eficiência do método utilizado para retroanálise de módulo de resiliência da pista e do acostamento.

A descrição resumida dos ensaios de laboratório realizados encontram-se em seguida.

##### **4.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral**

Conhecido como “ensaio brasileiro” o ensaio de compressão diametral, tração indireta, foi desenvolvido para determinar a resistência a tração de corpos-de-prova, através de solicitação estática. Neste ensaio a amostra cilíndrica, é submetida a um carregamento de compressão, na velocidade de 0,8mm/s, em planos paralelos, diametralmente oposto, o que resulta num plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao de aplicação da carga. O equipamento do ensaio de resistência à tração pode ser observado na Figura 6.

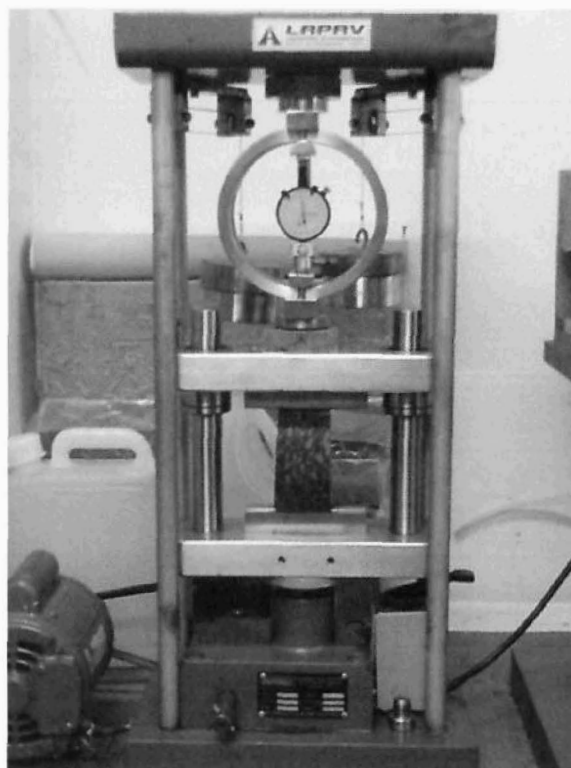


Figura 6 – Equipamento do ensaio de resistência à tração.

#### **4.2 Ensaio de módulo de resiliência**

Para a realização do ensaio de módulo de resiliência de misturas asfálticas, é utilizado um equipamento composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento (Figura 7) funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada, o que permite a realização do ensaio em diferentes temperaturas. A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1 e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um L.V.D.T., ligado a um microcomputador. O coeficiente de Poisson utilizado foi fixado em 0,3 para ensaios a 25°C.

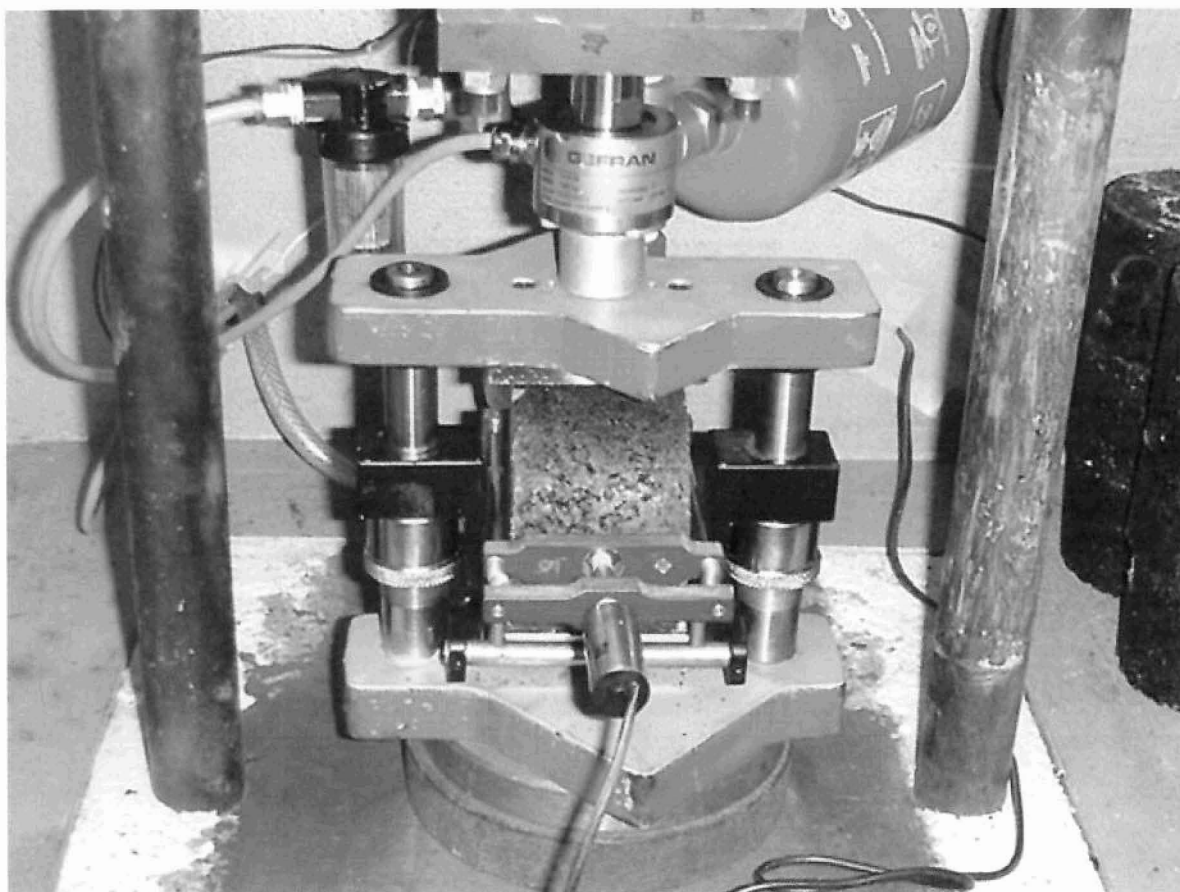


Figura 7 – Equipamento do ensaio de módulo de resiliência de misturas asfálticas.

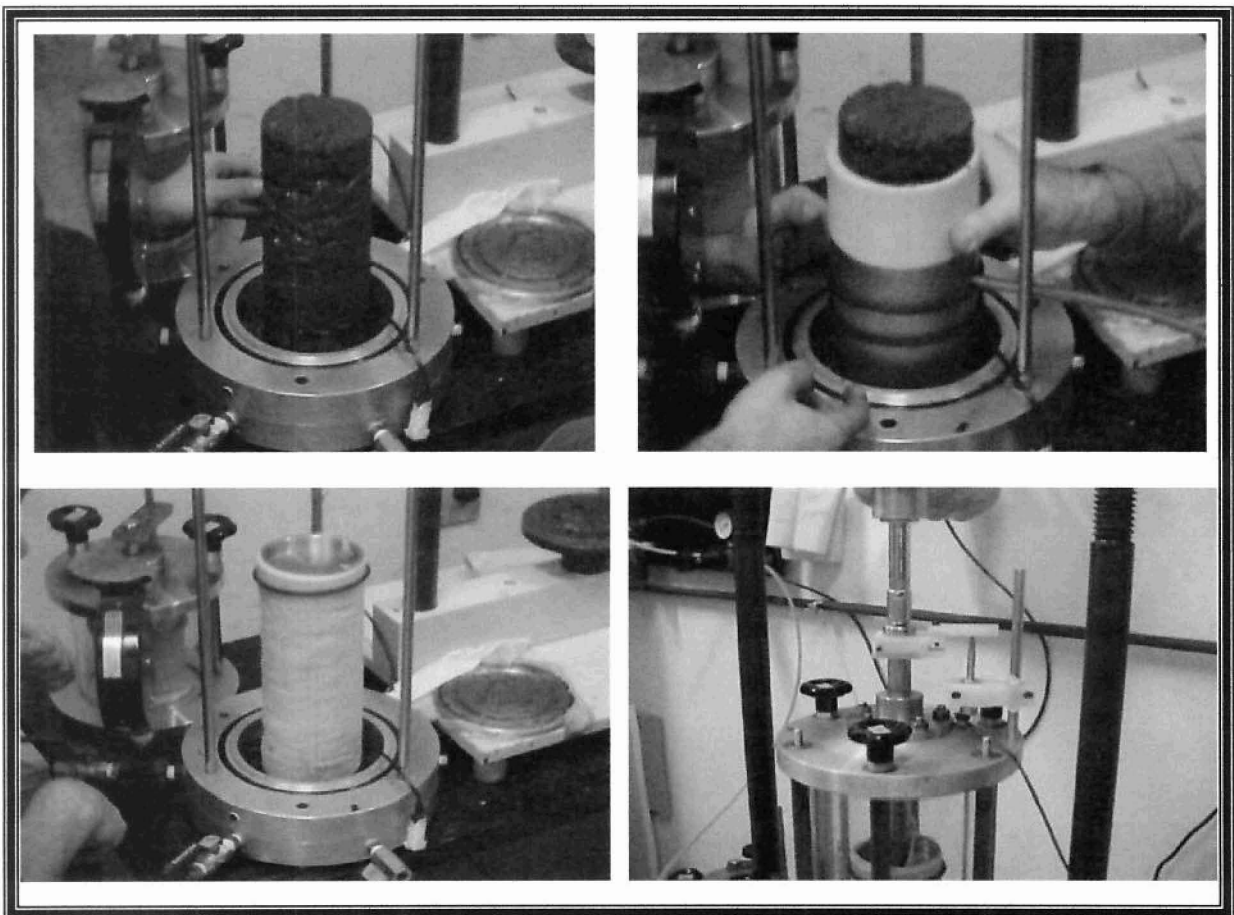
Para a realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas para materiais granulares, foram confeccionados corpos-de-prova (CP) cilíndricos, com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, adotando-se características de compactação (peso específico aparente seco e teor de umidade) da energia de 100% do Proctor Normal.

Nos ensaios para determinação de módulo de resiliência, o corpo-de-prova (coberto por uma membrana de borracha) é colocado no interior de uma câmara triaxial, hermeticamente fechada. No interior da câmara o corpo-de-prova é submetido a tensões confinantes ( $\sigma_3$ ), aplicadas através de ar comprimido, e desviadoras ( $\sigma_d$ ), aplicadas através de uma haste metálica e um cabeçote adaptado ao CP. As tensões aplicadas ( $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ ) reproduzem os estados de tensão gerados no campo pelo tráfego que solicita o pavimento. As cargas são aplicadas com frequência de 1 Hz (1 carga por segundo) e o tempo de carga é de 0,1 segundo.

Durante o ensaio são aplicadas várias combinações de  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ . Para cada combinação aplica-se um número de aproximadamente 100 carregamentos e medem-se as deformações elásticas ( $\epsilon_r$ ), a partir dos quais serão determinados os módulos de resiliência através da equação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

A Figura 8 apresenta as principais etapas da realização do ensaio.



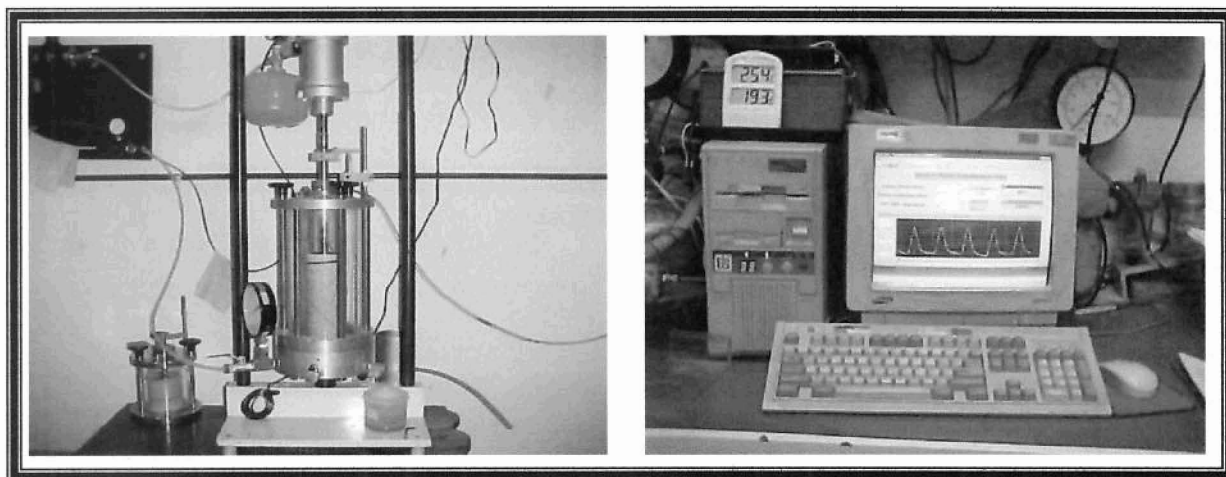


Figura 8 – Equipamento do ensaio de módulo de resiliência de materiais granulares.

### 4.3 Resultados

Os locais de extração dos corpos-de-prova (aleatórios dentro do primeiro, segundo e terceiro terço do trecho) e os resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência estão na Tabela 1 para a pista do lado direito, na Tabela 2 para o acostamento do lado direito, na Tabela 3 para a pista do lado esquerdo e na Tabela 4 para o acostamento do lado esquerdo. Nesta mesma tabela observa-se o módulo da camada asfáltica obtido por retroanálise com EVERCALC 5.0 para que se realize uma comparação.

Tabela 1 – Pista do Lado Direito.

Localização da Amostra	CP	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Resiliência de Laboratório (MPa)		Módulo de Resiliência de Retroanalísado (MPa)
			Individuais	Média	
291+700	1A	0,48	-	-	-
	1B	-	887	930	1.083
	1C	-	972		
294+740	2A	0,51	-	-	-
	2B	-	1.506	1.380	1.234
	2C	-	1.253		
299+220	3A	0,67	-	-	-
	3B	-	2.908	2.775	2.552
	3C	-	2.641		

Tabela 2 – Acostamento do Lado Direito.

Localização da Amostra	CP	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Resiliência de Laboratório (MPa)		Módulo de Resiliência de Retroanalisado (MPa)
			Individuais	Média	
292+180	4A	0,77	-	-	-
	4B	-	2.552	2.673	2.344
	4C	-	2.794		
295+300	5A	0,83	-	-	-
	5B	-	2.716	2.559	3056
	5C	-	2.401		
298+820	6A	0,35	-	-	-
	6B	-	721	809	666
	6C	-	897		

Tabela 3 – Pista do Lado Esquerdo.

Localização da Amostra	CP	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Resiliência de Laboratório (MPa)		Módulo de Resiliência de Retroanalisado (MPa)
			Individuais	Média	
292+460	7A	0,92	-	-	-
	7B	-	4.580	4.341	3.946
	7C	-	4.101		
296+300	8A	0,55	-	-	-
	8B	-	2.003	1.863	1.519
	8C	-	1.723		
300+780	9A	0,67	-	-	-
	9B	-	2.653	2.497	2.114
	9C	-	2.341		

Tabela 4 – Acostamento do Lado Esquerdo.

Localização da Amostra	CP	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Resiliência de Laboratório (MPa)		Módulo de Resiliência de Retroanalisado (MPa)
			Individuais	Média	
293+020	10A	1,02	-	-	-
	10B	-	3.590	3.899	4.506
	10C	-	4.207		
297+260	11A	1,21	-	-	-
	11B	-	6.521	6.116	5.365
	11C	-	5.711		
301+180	12A	0,29	-	-	-
	12B	-	650	622	500
	12C	-	594		

Comparando-se as médias dos módulos de resiliência obtidos em ensaios com os valores obtidos através de retroanálise pelo EVERCALC 5.0, observa-se a grande aproximação do método de estimativa e os valores reais, com diferenças percentuais sempre menores que 25% (a menor diferença foi de 8,5 % – pista do lado direito do km 291+700). Isto é considerável aceitável devido à própria variação dos módulos de resiliência obtidos em ensaios (corpos-de-prova em duplicata) ficar entre 8 % e 20 %.

Quanto aos valores baixos de módulo de resiliência, isto é derivado do elevado trincamento encontrado em pista e acostamento e verificado a partir do IGG.

A partir desses dados experimentais, portanto, verifica-se que o desempenho do EVERCALC 5.0 no processo de retroanálise foi bastante satisfatório.

Os resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para obtenção do módulo de resiliência da camada granular (base) e subleito podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaios Triaxiais.

Localização	Material	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>	Origem	MR Boussinesq (kgf/cm <sup>2</sup> )	MR retroan. (kgf/cm <sup>2</sup> )
291+700	MR1	2802 $\sigma_3^{0,5473}$	0,94	Base	223	5000
291+700	MR2	2994 $\sigma_3^{0,2979}$	0,66	Subleito	752	1670
294+740	MR3	3685 $\sigma_3^{0,3809}$	0,75	Base	640	920
294+740	MR4	3868 $\sigma_3^{0,2572}$	0,68	Subleito	1168	2720
299+220	MR5	4220 $\sigma_3^{0,2704}$	0,73	Base	1217	2130
299+220	MR6	7899 $\sigma_3^{0,5179}$	0,95	Subleito	720	2170

Nota-se que os materiais são todos dependentes da tensão confinante, indicando serem materiais granulares (provavelmente saibros tanto na base quanto no subleito).

Quando ajustam-se os módulos de resiliência das equações da Tabela 5 no ELSYM5 para as deflexões lidas no FWD (para obter os módulos lineares equivalentes das camadas de base e subleito), observa-se a grande diferença dos mesmos com relação aos módulos de resiliência retroanalizados.

Dois fatores podem ser colocados como responsáveis por esta discrepância. O primeiro se refere à variabilidade dos materiais granulares ponto a ponto, acarretando na possibilidade de amostragem de um material que não corresponde ao que tinha sido planejado. O segundo fator se refere à própria variação do ensaio.

## **5. VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE RETROANÁLISE COM O USO DE SOFTWARE DE ANÁLISE TENSÃO-DEFORMAÇÃO**

A validação do processo de retroanálise compõe a última etapa desta pesquisa. Ela foi realizada através da utilização de software de análise tensão-deformação para reproduzir a bacia de deflexões teórica a partir dos módulos obtidos na Retroanálise com o EVERCALC 5.0.

O software escolhido para a reprodução da bacia de deflexões teórica foi o ELSYM5. A opção por este software é devida à extensa utilização tanto no meio científico quanto no meio profissional, além de sua comprovada eficiência e eficácia.

O software ELSYM5 considera que os materiais constituintes do pavimento têm um comportamento elástico-linear, caracterizado por um módulo de resiliência constante em cada camada (os resultados da retroanálise com EVERCALC 5.0 e os demais softwares de retroanálise fornecem módulos lineares das camadas, compatível com o ELSYM5). Isto que é bastante próximo da realidade para materiais cimentados (incluindo a BGTC) não se constata, geralmente, nos solos e britas. Entretanto, o referido software possibilita a análise do pavimento considerando até 10 cargas (no caso desta pesquisa, a placa de transmissão de cargas do FWD), o que justifica seu vasto emprego universal.

Na análise podem ser consideradas até cinco camadas, sendo que a última é considerada como tendo espessura infinita. Para cada camada devem ser fornecidos o módulo de resiliência médio e o coeficiente de Poisson.

Igualmente devem ser fornecidos: o número de cargas circulares aplicadas ao pavimento, a o valor de cada carga (01 placa com carga igual a registrada pelo FWD no momento do ensaio – em torno de 42,3 KN), a pressão de inflação da placa (em torno de 598 KPa) e a coordenada do centro da roda.

Finalmente deve-se indicar as coordenadas (x, y e z) onde se deseja avaliar as respostas estruturais do pavimento (tensões, deformações e deflexões) através da técnica de diferenças finitas utilizada por este software. Foram consideradas as seguintes coordenadas (x,y) reproduzindo a bacia de deflexões do FWD: (0;0), (0;20), (0;30), (0;45), (0;65), (0;90)

e (0;120). A coordenada z sempre foi na superfície do pavimento, igualmente ao que se registra no FWD.

## **5.1 Resultados**

Foram realizadas análises tensão x deformação apenas para bacias de deflexão medidas com o FWD para os Lados Esquerdo e Direito da pista de rolamento. Isto se deve ao fato das informações que constituem a estrutura do pavimento (espessura de camadas, tipo de material de cada camada etc.) serem mais confiáveis para o caso da pista de rolamento que para os acostamentos da rodovia.

Foi escolhida uma bacia de deflexão medida em cada lado da pista de rolamento e para cada quilômetro do trecho analisado, totalizando 20 pontos de análise (Tabela 6).



LOCALIZAÇÃO			FORÇA		PRESSÃO		DEFLEXÕES (0,001 mm)								Características Elásticas				Material do subleito	Base (cm)	H <sub>cauq</sub> (cm)
KM	Análise	PISTA	Bacia N°		(kN)	(kPa)	DF1	DF2	DF3	DF4	DF5	DF6	DF7		E(1)(MPa)	E(2)(MPa)	E(3)(MPa)	RMS Error (%)			
296 + 700	Real	LE	60		42,0	594,0	434	301	235	185	123	87	64		691	81	157	3,39	2	23,5	33,4
	Elsym5						447	289	233	180	130	89	62								
297 + 740	Real	LE	47		42,6	603,0	335	236	193	158	121	88	66		1091	188	152	0,96	2	23,5	31
	Elsym5						337	233	196	158	121	89	66								
298 + 700	Real	LE	35		42,3	599,0	354	241	200	153	102	65	45		1262	106	210	1,53	2	29,5	25
	Elsym5						351	246	200	149	102	66	45								
299 + 740	Real	LE	22		41,5	587,0	492	367	289	213	132	77	39		823	35	209	5,13	2	23,8	25,9
	Elsym5						516	355	284	203	127	72	43								
300 + 700	Real	LE	11		42,5	601,0	430	271	203	142	89	67	48		566	128	203	4,75	2	22,6	31,7
	Elsym5						447	257	195	142	97	66	46								

As comparações entre as bacias de deflexão medida com FWD e a calculada pelo ELSYM5 podem ser observadas graficamente nas Figuras 9 (Lado Direito) e 10 (Lado Esquerdo).

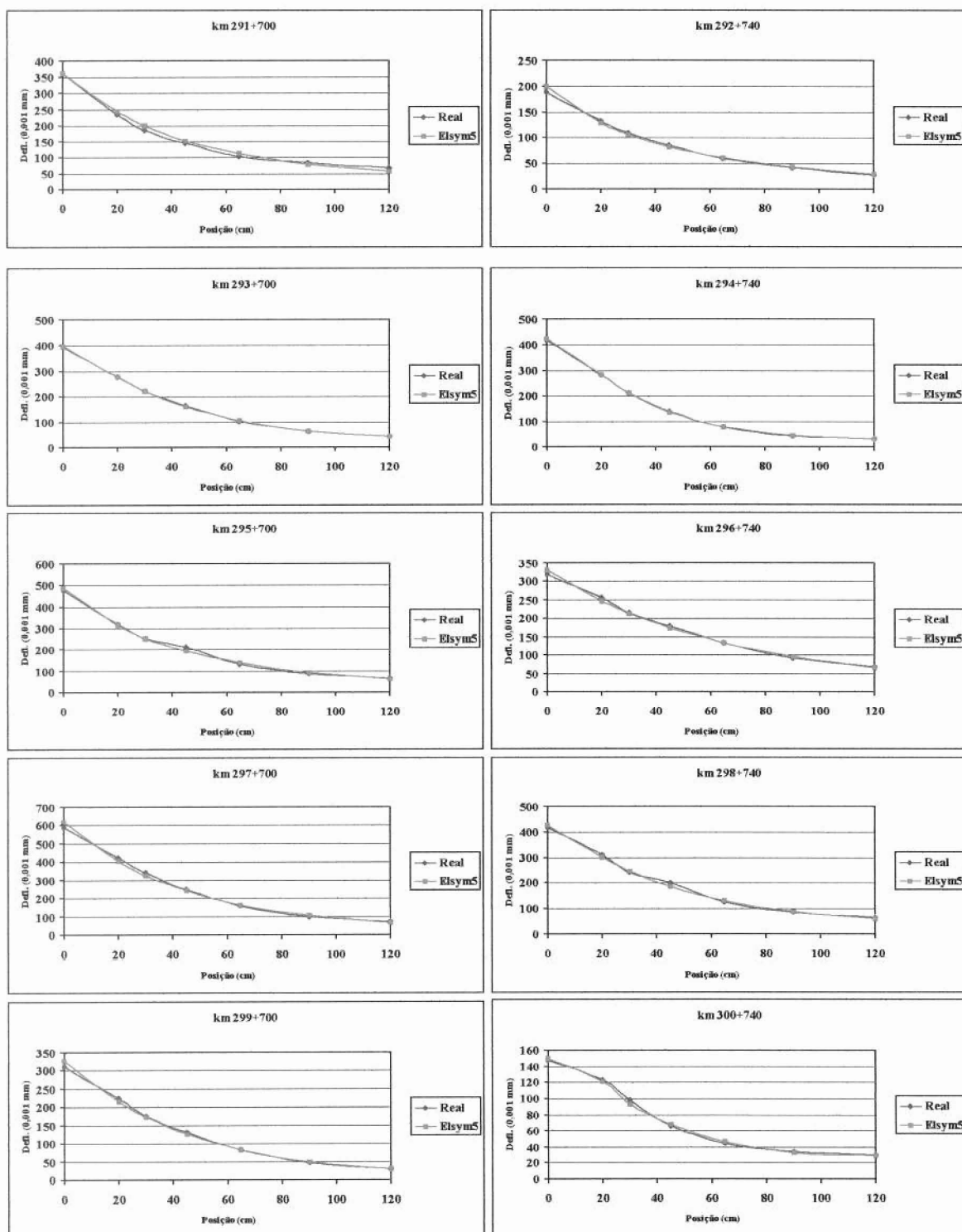


Figura 9 – Bacias de deflexão do FWD x calculada pelo ELSYM5 (Lado Direito).

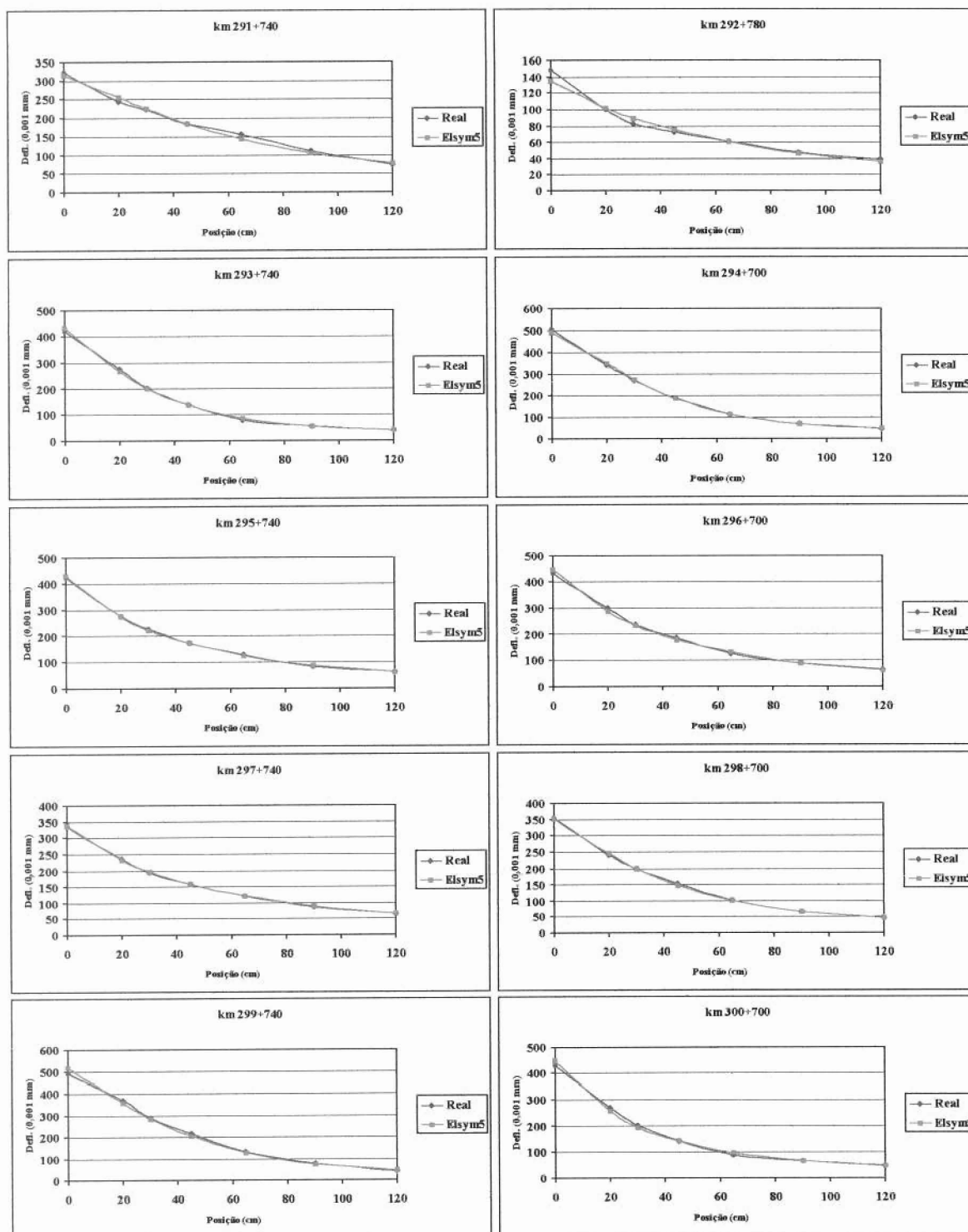


Figura 10 – Bacias de deflexão do FWD x calculada pelo ELSYM5 (Lado Esquerdo).

Através da análise dos dados da Tabela 6 e das Figuras 9 e 10 fica evidente que os módulos de resiliência retroanalizados pelo EVERCALC 5.0 foram capazes de reproduzir (na análise tensão  $\times$  deformação com o ELSYM5), com grande aproximação, as bacias de deflexão medidas pelo FWD.

## 6. CONCLUSÕES

Ao analisar as condições do trecho da rodovia objeto do estudo de caso (estudo para avaliação do desempenho do EVERCALC 5.0 na retroanálise de pavimentos do Rio Grande do Sul), mostrou que quanto ao IGG, o estado da pista de rolamento variou entre mau e péssimo.

As deflexões máximas com FWD foram bem maiores nos acostamentos (62% dos pontos com deflexão entre  $60$  e  $100 \times 10^{-2}$  mm) que na pista de rolamento (55% dos pontos com deflexão entre  $50$  e  $75 \times 10^{-2}$  mm).

Na etapa de retroanálise, os valores de RMS ("Root Mean Square Error"), excluindo-se os pontos onde o pavimento encontrava-se bastante trincado, permaneceram sempre abaixo de 20%, considerado bastante satisfatório.

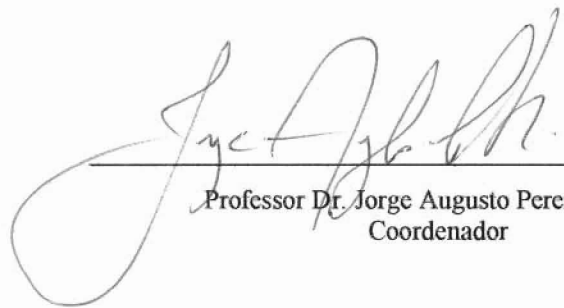
No processo de comparação dos módulos retroanalizados (camada a camada) com os módulos de materiais ensaiados em laboratório, os resultados foram satisfatórios apenas para o caso da camada de revestimento asfáltico, com uma variação não maior que 25%. Para os materiais granulares os resultados apresentaram grandes discrepâncias devido a variações de materiais no momento da amostragem e possíveis variações nos resultados dos ensaios.

A última etapa da pesquisa (validação por análise mecanística dos dados retroanalizados) apresentou um ótimo desempenho. As comparações das bacias de deflexões de campo (medidas com FWD) se aproximaram muito das bacias de deflexões teóricas (calculadas utilizando os módulos retroanalizados pelo EVERCALC 5.0 no software ELSYM5).

Ressalta-se, portanto, o bom desempenho do EVERCALC 5.0 na retroanálise de bacias de deflexão medidas pelo equipamento FWD para pavimentos com características semelhantes a da BR-116/RS (km 291+500 ao km 301+500), sobretudo quanto às características de materiais (revestimento em mistura asfáltica e base e subleito granulares).

Sugere-se, ainda, a avaliação do EVERCALC 5.0 em outros tipos de pavimentos (por exemplo: revestimento em concreto de cimento Portland).

**Equipe executora**



---

Professor Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
Coordenador



---

Professor Washington Peres Núñez  
Equipe técnica