

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO TIPO FALLING
WEIGHT DEFLECTOMETER PARA MEDIÇÃO DE
DEFLEXÃO RECUPERÁVEL PARA DIFERENTES
TIPOS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

André Denis Luis

Campinas
2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

André Denis Luis

**UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO TIPO FALLING WEIGHT
DEFLECTOMETER PARA MEDIÇÃO DE DEFLEXÃO RECUPERÁVEL
PARA DIFERENTES TIPOS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. João Virgílio Merighi

Campinas, SP
2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L968u	Luis, André Denis Utilização do equipamento tipo Falling Weight Deflectometer para medição de deflexão recuperável para diferentes tipos de pavimentos asfálticos / André Denis Luis. --Campinas, SP: [s.n.], 2009. Orientador: João Virgílio Merighi. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 1. Deflexão. 2. Pavimentos de asfalto. 3. Pavimentos flexíveis - projetos. I. Merighi, João Virgílio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.
-------	--

Título em Inglês: Use of the equipment type Falling Weight Deflectometer for measuring recoverable deflection for different types of asphalt pavements

Palavras-chave em Inglês: Deflection, Asphalt pavements, Flexible pavements - project

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Carlos Yukio Suzuki, Cássio Eduardo Lima de Paiva

Data da defesa: 28/07/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO TIPO FALLING WEIGHT
DEFLECTOMETER PARA MEDIÇÃO DE DEFLEXÃO RECUPERÁVEL
PARA DIFERENTES TIPOS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

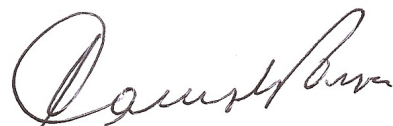
André Denis Luis

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

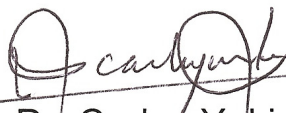


Prof. Dr. João Virgílio Merighi

Presidente e Orientador / Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos aqueles que acreditam que a audácia e impossibilidade são caminhos para as grandes realizações.

Agradecimento

Ao meu Pai Carlos (in memorian), pelo seu esforço e dedicação em ter me proporcionado e incentivado os estudos, muitas vezes se privando e nos privando de certos confortos, em prol da oportunidade de seguir os meus sonhos.

Aos meus familiares, especialmente à minha mãe Catarina e meus irmãos Simone e Sergio, por estarem sempre ao meu lado, pela paciência em tolerar a minha ausência, incentivando principalmente nos momentos difíceis.

À Alessandra Thais, pelo afeto, pela paciência e estima nesses anos de convivência. Ainda um obrigado especial a ela por proporcionar uma de minhas maiores alegrias na vida: a nossa filha Gabriela.

Ao meu Orientador Prof. Dr. João Virgílio Merighi pelo incentivo, dedicação e entusiasmo no auxílio às atividades e discussões sobre o andamento desta dissertação.

À Professora Dra. Rita de Moura Forte, pela sua disciplina nos ensinamentos, simpatia e presteza demonstrados ao longo deste mestrado.

Especialmente ao Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva, por sua vocação inequívoca na tarefa de multiplicar seus conhecimentos.

Aos demais professores, funcionários e secretárias da UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.

Aos Amigos de classe, Ana Paula, Cláudia, Ivo, Luiz, Mirrian e Ricardo pela espontaneidade e alegria na troca de informações e materiais, além da companhia fundamental em momentos árduos.

Ao meu grande amigo Christian, pelo seu incentivo, apoio incondicional, numa rara demonstração de amizade e solidariedade.

Ao Professor Dr. Carlos Yukio Suzuki e aos Engenheiros Santi Ferri e Caio Rubens da Planservi Engenharia Ltda., pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda indeclinável, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu grande amigo Octávio de Souza Campos, por seus ensinamentos e incentivo em iniciar este mestrado, e por seu apoio, compreensão e amizade demonstrados ao longo de minha trajetória pessoal e profissional.

À minha querida revisora Alessandra, sem a qual nossa dissertação não teria a mesma qualidade.

A todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigado!

E, finalmente, a DEUS pela oportunidade e pelo privilégio que me foi dado em compartilhar esta experiência e aprendizado, com os professores e colegas deste curso, ficando o conhecimento em profundidade, para nossas vidas.

RESUMO

LUIS, A. D., **“Utilização do Equipamento Tipo Falling Weight Deflectometer para Medição de Deflexão Recuperável para Diferentes Tipos de Pavimentos Asfálticos”**.

Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2009. 209p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2009.

Esta pesquisa versa sobre a utilização do equipamento FWD - Falling Weight Deflectometer, sendo analisados os diversos aspectos que influenciam nos resultados dos ensaios com o equipamento FWD. Dificuldade de interpretações das especificidades de tipos distintos de estruturas de pavimentos e uma vasta gama de correlações com a Viga Benkelman, as quais foram deduzidas por autores de diversas nacionalidades, demonstram que não há regra harmônica para os estudos. Assim, faz-se imprescindível a percepção acurada, a consciência e experiência adquirida do engenheiro de projeto em cada situação. Esta hipótese foi corroborada pelo estudo dos ensaios realizados em malha viária experimental, abordados nesta dissertação.

São propostos ainda temas relevantes para futuro desenvolvimento que possam agregar em confiabilidade e em economia dos projetos de pavimentação na Engenharia Nacional. Este trabalho foi desenvolvido utilizando-se a bibliografia sobre deflectometria internacional e brasileira, abrangendo os editais de concessões rodoviárias estaduais e federais.

Palavras-Chave: deflectometria; pavimentos de asfalto; pavimentos flexíveis - projetos; equipamentos; ensaios.

ABSTRACT

LUIS, A. D., “**Use of the equipment type Falling Weight Deflectometer for measuring recoverable deflection for different types of asphalt pavements**”. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2009. 209p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2009.

This research is about the use of equipment FWD - Falling Weight Deflectometer, and analyzed the various aspects that influence the results of tests with the FWD equipment. Difficulty in interpretation of the peculiarities of different types of pavement structures and a wide range of correlations with the Benkelman beam, which were derived by authors from different nationalities, shows that there is no rule for harmonic studies. Thus, it is essential to accurate perception, awareness and experience of the design engineer in every situation. This hypothesis was confirmed by the study of tests on experimental road network, discussed in this dissertation.

Are still relevant topics proposed for future development that can add reliability and economy of paving projects in the National Engineering. This work was developed using the literature on international and Brazilian deflection, covering the tenders for state and federal road concessions.

Key Words: deflectometer; asphalt pavements; flexible pavements - project; equipment; assays.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura: 2.1 Seção transversal típica do pavimento flexível.....	9
Figura: 2.2 Avaliação destrutiva do pavimento flexível – Poço de Sondagem.....	14
Figura: 2.3 Técnico realizando avaliação superficial objetiva.....	17
Figura: 2.4 Equipamentos de avaliação superficial subjetiva.....	20
Figura: 2.5 Fases da vida de um pavimento.....	22
Figura: 2.6 Esquema de deslocamento vertical recuperável da superfície do pavimento, denominado de Bacia de Deflexão.....	24
Figura: 2.7 Esquema representativo do raio de curvatura.....	25
Figura: 2.8 Esquema representativo da bacia de deformabilidade.....	26
Figura: 3.1 Organograma dos tipos de equipamentos de medidas de deflexões recuperáveis	52
Figura: 3.2 Ensaio de placa	55
Figura: 3.3 Viga Benkelman.....	57
Figura: 3.4 Posicionamento da Viga Benkelman.....	59
Figura: 3.5 Pontos de avaliação da Viga Benkelman.....	59
Figura: 3.6 Deflectógrafo Lacroix.....	61
Figura: 3.7 Viga Benkelman automatizada.....	62
Figura: 3.8 Equipamento British Pavement Deflection	63
Figura: 3.9 Equipamento California Traveling Deflectograph.....	64
Figura: 3.10 Equipamento Curviâmetro.....	65
Figura: 3.11 Esquema de funcionamento do Curviâmetro.....	65
Figura: 3.12 Gráfico típico da força dinâmica resultante em equipamentos de carregamento vibratório.....	66
Figura: 3.13 Esquema representativo do Dynaflect	68
Figura: 3.14 Gráfico de força Dynaflect.....	69

Figura: 3.15	Equipamento Dynaflect	69
Figura: 3.16	Esquema representativo do Road Rater.....	71
Figura: 3.17	Equipamento Road Rater.....	72
Figura: 3.18	Ilustração do WES 16-kip	73
Figura: 3.19	Princípio de funcionamento do FWD	76
Figura: 3.20	Equipamento Dynatest FWD.....	78
Figura: 3.21	Vista inferior do Deflectógrafo.....	78
Figura: 3.22	Sensores do tipo geofones de medição da deflexão.....	79
Figura: 3.23	Gráfico da bacia de deflexão com o FWD.....	80
Figura: 3.24	Diagrama esquemático Kuab FWD	81
Figura: 3.25	Equipamento Kuab FWD.....	81
Figura: 3.26	Vista interna do Kuab FDW.....	82
Figura: 3.27	Equipamento FWD Jils Aeroportuário	83
Figura: 3.28	FWD Jils instalado na plataforma de veículo utilitário.....	84
Figura: 3.29	Veículo-teste equipado com FWD e GPR.....	84
Figura: 3.30	Equipamento Phoenix FWD.....	85
Figura: 3.31	Detalhe dos sensores do Phoenix FWD.....	86
Figura: 3.32	Equipamento FWD Thumper.....	87
Figura: 3.33	Equipamento americano RWD - Rolling Wheel Deflectometers.....	90
Figura: 3.34	Equipamento sueco RDT - Road Deflection Tester.....	91
Figura: 3.35	Equipamento dinamarquês HSD - High Speed Deflectograph.....	92
Figura: 3.36	Equipamento GPR – Ground Penetrating Radar.....	93
Figura: 3.37	Princípio de funcionamento do GPR.....	93
Figura: 4.1	Pontos de avaliação do FWD.....	103
Figura: 4.2	Gráfico de possíveis correlações entre FWD e Viga Benkelman.....	105

Figura: 5.1	Localização do Estado de São Paulo em relação ao Brasil.....	121
Figura: 5.2	Localização das cidades em relação ao Estado de São Paulo.....	122
Figura: 5.3	Imagem de Satélite com a Localização das rodovias.....	123
Figura: 5.4	Vista geral do levantamento deflectométrico –SP 303.....	126
Figura: 5.5	Levantamento deflectométrico com FWD.....	127
Figura: 5.6	Levantamento deflectométrico com Viga Benkelman.....	128
Figura: 5.7	Correlação Viga Benkelman x FWD – Base Granular.....	130
Figura: 5.8	Correlação Viga Benkelman x FWD – Base SAFL.....	130
Figura: 5.9	Correlação Viga Benkelman x FWD – Base Cimentada.....	131
Figura: 5.10	Correlação Única Viga Benkelman x FWD.....	132

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela: 1.1 Malha Rodoviária - extensão pavimentada e não pavimentada (em quilômetros) Fonte: CNT, 2006.....	3
Tabela: 2.1 Critério para estabelecimento das diretrizes de projeto DNER, 1998.....	35
Tabela: 2.2 Critério para estabelecimento das diretrizes de projeto DNER, 1998.....	38
Tabela: 2.3 Classificação do solo do subleito quanto à percentagem de silte na fração fina. DNER-PRO 269/94.....	40
Tabela: 2.4 Constantes relacionadas com as características da resiliência do subleito. DNER-PRO 269/94.....	41
Tabela: 2.5 Relação de soluções de recapeamento em função da espessura do reforço. DNER-PRO 269/94.....	43
Tabela: 2.6 Procedimentos de solução de recapeamento do reforço do pavimento contemplando reciclagem DNER-PRO 269/94.....	45
Tabela: 3.1 Características dos equipamentos FWD mais difundidos.....	88
Tabela: 4.1 Características dos equipamentos não destrutivos.....	108
Tabela: 4.2 Limite legal de carga por eixo.....	111
Tabela: 4.3 Fatores de correção sazonal para a Viga Benkelman.....	112
Tabela: 5.1 Trechos selecionados para execução de levantamentos deflectométricos.....	124
Tabela: 5.2 Estruturas dos segmentos selecionados e determinados através de cavas.....	125
Tabela: 5.3 Trechos divididos de acordo com o tipo de base.....	129
Tabela: 5.4 Resumo de D_{VB} e R^2	131
Tabela: 5.5 Resumo de módulos dinâmicos e deflexões D_{VB} e D_{FWD}	134
Tabela: 5.6 Resumo métodos PRO-11, 269 e Análise Mecanística Viga D_{VB}	134
Tabela: 5.7 Resumo métodos PRO-11, 269 e Análise Mecanística FWD D_{FWD}	135
Tabela: 5.8 Resumo do Δh ref(cm) função do tráfego, base e deflexão FWD e Viga.....	136

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação: 2.1 Valor de Serventia Atual.....	19
Equação: 2.2 Equação da Curva Bidimensional.....	28
Equação: 2.3 Raio de Curvatura	29
Equação: 2.4 Equação de Ruiz.....	37
Equação: 2.5 Deflexão admissível.....	37
Equação: 2.6 Espessura efetiva.....	40
Equação: 2.7 Deflexão de projeto característica	41
Equação: 2.8 Critério de fadiga	42
Equação: 2.9 Espessura do reforço.....	42
Equação: 2.10 Módulo de resiliência efetivo	43
Equação: 2.11 Relação modular.....	44
Equação: 2.12 Deflexão de projeto característica.....	44
Equação: 3.1 Coeficiente de recalque.....	53
Equação: 3.2 Deflexão máxima da Viga Benkelman.....	58
Equação: 3.3 Força de pico ou carga nominal.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM	American Society for Testing and Materials
CALTRANS	California Transportation
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	Concreto de Cimento Portland
CDH	California Division of Highways
CEPAL	Comissão Econômica para a América Latina e Caribe
CGRA	Canadian Good Roads Association
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CVC	Combinação de Veículo de Carga
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito

DERSA	Desenvolvimento Rodoviário SA.
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
DOT	Department of Transportation
ESRD	Eixo Simples Roda Dupla
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
GEIPOT	Grupo de Estudos Integração da Política de Transportes
GPR	Ground Penetration Radar
HDM	Highway Design and Maintenance Standard Model
HSD	High Speed Deflectometers
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LCPC	Laboratoire Centrales Pontes et Chaussées
L _f	Deflexão final
L _i	Deflexão inicial
LTPP	Long Term Pavement Performance
LVDT	Linear Variability Deflection Transducers

LWT	Loaded Wheel Tester
PIB	Produto Interno Bruto
PSI	Pound per square inches
R	Raio de Curvatura
RDT	Road Deflection Tester
RWD	Rolling Wheel Deflectometers
SAFL	Solo Arenoso Fino Laterítico
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SHRP	Strategic Highway Research Program
SI	Unidade no sistema internacional
TECNAPAV	Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários
USACE	United States Army Corps of Engineers
VSA	Valor de Serventia Atual
WASHO	Western Association of State Highway Officials
WES	Waterways Experiment Station
WSDOT	Washington State Department of Transportation

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xxiii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xxv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxvii
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos	05
1.1.1 Objetivo geral	05
1.1.2 Objetivo específico	05
1.2 Metodologia da Pesquisa	06
1.3 Estrutura do Trabalho	07
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	09
2.1 Conceitos Gerais de Pavimento.....	09
2.1.1 Teoria Elástica.....	10
2.2 Avaliações dos Pavimentos.....	12
2.2.1 Avaliação destrutiva	13
2.2.2 Avaliação não-destrutiva	14
2.3 Avaliação Funcional.....	15

2.3.1	Avaliação Superficial Objetiva.....	16
2.3.2	Avaliação Superficial Subjetiva.....	17
2.4	Avaliação Estrutural.....	20
2.4.1	Raio de Curvatura como parâmetro de projeto.....	24
2.4.2	Métodos e Normas para execução de reforço.....	32
2.5	Comentários.....	46
3	ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS E EQUIPAMENTOS.....	51
3.1	Equipamentos estáticos e quase-estáticos.....	53
3.1.1	Ensaio de Placa.....	53
3.1.2	Viga Benkelman.....	56
3.1.3	Deflectógrafos Digitais.....	60
3.1.3.1	Deflectógrafo Lacroix.....	60
3.1.3.2	Viga Benkelman Automatizada.....	62
3.1.3.3	British Pavement Deflection.....	63
3.1.3.4	California Travelling Deflectometer.....	64
3.1.3.5	Curvâmetro.....	64
3.2	Equipamentos de carregamento vibratório.....	66
3.2.1	Dynaflect.....	67
3.2.2	Road Rater.....	70
3.2.3	WES 16-kip Vibrator.....	73
3.3	Equipamentos de carregamento por impulso.....	74
3.3.1	FWD Dynatest.....	77
3.3.2	FWD Kuab.....	80
3.3.3	FWD Jils.....	83

3.3.4	FWD Phoenix.....	85
3.3.5	FWD Thumper.....	86
3.4	Outros Equipamentos.....	89
3.4.1	High Speed Deflectometer (Deflectómetro Alta Velocidade).....	89
3.4.2	Ground Penetrating Radar – GPR.....	92
3.5	Comentários.....	95
4	GENERALIDADES DO EQUIPAMENTO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER - FWD.....	99
4.1	Viga Benkelman.....	99
4.2	Falling Weight Deflectometer FWD.....	100
4.3	Correlação entre Viga Benkelman e FWD.....	104
4.4	Comparações entre FWD e outros deflectómetros.....	107
4.5	Fatores externos que influenciam no ensaio com FWD.....	109
4.6	Comentários.....	113
5	DESCRIÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	119
5.1	Introdução.....	119
5.2	Localização.....	120
5.3	Trechos selecionados e divisão de segmentos homogêneos.....	123
5.4	Métodos de ensaios de campo.....	126
5.5	Comparação entre a viga Benkleman e o FWD	129
5.6	Análise Crítica das Equações de Correlações de deflexões com os dois Equipamentos: FWD e Viga Benkleman.....	133

5.7	Análise dos Resultados.....	137
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA.....	139
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
	SITES DE INTERNET.....	149
	NORMAS E REGULAMENTAÇÕES.....	150
	REFERÊNCIA DE APOIO	151
	 ANEXOS	
A	Levantamentos deflectométricos com fwd (deflexão máxima normalizada)	153
B	Levantamentos deflectométricos com viga Benkelman.....	163
C	Levantamentos deflectométricos com FWD (dados do campo)..	173
D	Calibração da viga Benkelman.....	183
E	Deflectograma comparativo da viga Benkelman e FWD.....	187
F	Retroanálise com programa Laymod.....	193
G	Critério para previsão de desempenho.....	201

1. INTRODUÇÃO

Diante de um país com grande déficit de infra-estrutura de transporte, o setor rodoviário brasileiro ocupa papel de destaque devido a sua grande importância em promover o transporte de carga e pessoas, propiciando assim a interligação entre diversas regiões, integrando povos e culturas. O modal rodoviário transporta cerca de 62% das cargas e 96% dos passageiros, segundo a Confederação Nacional dos Transportes (órgão ligado ao Ministério dos Transportes) – CNT (2003).

De acordo com RIBEIRO et al. (2005) no Brasil, historicamente, o modo de transporte rodoviário foi prevalecido politicamente. No âmbito econômico, seria possível minimizar os custos de transporte com um planejamento melhor, fazendo o bom uso da intermodalidade. No entanto, a insuficiência de infra-estrutura dos outros modais de transportes fez com que o transporte rodoviário fosse preferencialmente usado.

O aspecto histórico que gerou o contexto supracitado foi conformado ao longo da segunda metade do século XIX, época em que se introduziu a ferrovia no Brasil. Vários planos de viação foram apresentados pelo governo imperial com ênfase nas vias férreas e na navegação fluvial e marítima como sendo solução para os problemas de isolamento das regiões brasileiras. Tal ideal figurou no planejamento da nação até algum tempo após a Proclamação da República (GALVÃO, 1996).

No ano de 1926, o presidente Washington Luís adotou o lema “governar é abrir estradas”. Durante seu governo, com verbas originadas em uma taxa adicional sobre a importação de produtos como gasolina, automóveis, caminhões, câmaras e pneus foram construídos 61 quilômetros da rodovia Rio – Petrópolis e 121 quilômetros do tronco sudoeste da rodovia Rio – São Paulo. Esta foi à etapa inicial de uma série de outras obras viárias implantadas após 1930, pelos governos sucessores. Em meados da década de 40, o Brasil contava com cerca de 420 quilômetros de rodovias pavimentadas entre federais e estaduais. Dez anos mais tarde, eram quase 1 mil quilômetros e nos anos 80 podiam ser computados cerca de 47 mil quilômetros

somente de rodovias federais pavimentadas. Na verdade, a definição da estratégia governamental de concentrar os investimentos em rodovias está associada ao incremento da indústria automobilística, especialmente após 1950, com a implantação de subsidiárias de grandes empresas multinacionais. A indústria automobilística passou a constituir a base do modelo de desenvolvimento econômico brasileiro (ALBANO, et al. 2005).

Até os anos 70, na ausência de um mercado interno forte como consequência de um baixo nível de renda, o volume de tráfego era demasiado baixo para viabilizar economicamente ferrovias e hidrovias. No entanto, o Brasil passou a contar com um mercado interno forte, o que a princípio, deveria ter se tornado um impulsionador dos modais ferroviário e hidroviário, tendo as rodovias como ligações complementares necessárias. A ausência de capacidade empresarial foi um importante fator para o não recrudescimento dos modais hidroviários e ferroviários (ALMEIDA, et al. 2001).

De acordo com ARAÚJO (2006), o sistema de transporte, em particular, ocupa um papel de destaque no processo de crescimento econômico, favorecendo a integração regional em um país de dimensões continentais como o Brasil. Por conta da prevalência rodoviária e da grande amplitude territorial, o conhecimento do estado estrutural da malha rodoviária nacional configura-se um desafio complexo para a alta administração de companhias privadas e órgãos públicos. O contexto atual de retomada de desenvolvimento econômico brasileiro coloca explicitamente a questão da infraestrutura de transporte como sendo um gargalo a este desenvolvimento. Numa pesquisa realizada pela CNT onde foram avaliados a totalidade da malha rodoviária federal pavimentada e os principais trechos sob gestão estadual e sob concessão, revelou que cerca de 55% da malha rodoviária encontra-se com o pavimento em estado de conservação classificado como ruim ou péssimo (CNT, 2006).

Tabela 1.1: Malha Rodoviária - extensão pavimentada e não pavimentada (em quilômetros).
Fonte: CNT, 2006.

	Pavimentada	Não Pavimentada	Total
Federal	58.152	14.857	73.009
Estadual Coincidente	17.016	7.146	24.162
Estadual	98.377	109.942	208.319
Municipal	22.735	1.274.906	1.297.641
Total (Km)	196.280	1.406.851	1.603.131
Fonte PNV-2006-DNIT			

Malha Rodoviária Concessionada – extensão em Km	10.803
Administrada por Iniciativa Privada	9.739
Administrada por Operadoras	1.064
Fonte: ANTT (jul/06)	

PÊGO FILHO, CÂNDIDO JUNIOR & PEREIRA (1999), em uma análise desenvolvida sobre o investimento em infra-estrutura no Brasil para o período de 1999 a 2002, mostram que a incapacidade financeira dos estados, aliada às mudanças de prioridades do governo, acentuou a tendência de queda dos investimentos em infra-estrutura. Estes gastos, que chegaram a 12% do Produto Interno Bruto (PIB) em 1982, no ano de 1999 tiveram apenas a participação de pouco mais de 1% do PIB.

A maior dificuldade, que os atuais governantes da esfera federal e estadual vêm enfrentando na área dos transportes é a necessidade emergencial de restaurações dos pavimentos existentes. Esta dificuldade ocorre devido à falta de uma política de recursos aliada à negligência ocorrida no passado em relação a inexistência de programas de longos prazos de reabilitações (GOMES, GOMES & SALES, et al. 2007). NASCIMENTO (2004) relata que as péssimas condições em que se encontram os pavimentos da malha nacional submetem os usuários a constantes prejuízos financeiros e risco de vida.

A situação precária das rodovias geram maiores custos para todo sistema produtivo, não só no Brasil. Recentes trabalhos realizados pela Comissão Econômica para a América Latina e Caribe (CEPAL) demonstram que o atual sistema de conservação rodoviária exauriu-se e pelo menos um terço da rede rodoviária dos países da América Latina e Caribe apresenta-se em péssimas condições por falta de

conservação adequada. Trafegar nestas rodovias acarreta um aumento de 45% no custo operacional dos veículos, exige o dobro do tempo de viagem e resulta em um acréscimo substancial no custo final dos produtos transportados (TIZZOT, 2004). A mesma fonte comenta que não conservar, deixar deteriorar e reconstruir leva a um gasto de três a seis vezes maior do que se gastaria com a conservação adequada.

Em relação ao Brasil, isto significa um prejuízo anual da ordem de R\$ 10 bilhões. Este valor não leva em conta os prejuízos advindos de mais de 33 mil mortes e cerca de 400 mil feridos e inválidos por ano, segundo o DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2004).

Diante do panorama introduzido, este trabalho se justifica por apresentar uma contribuição de instrumento de projetos, através do aprofundamento técnico no uso do equipamento FWD - Falling Weight Deflectometer, o qual é bastante conhecido internacionalmente, mas que ainda tem relevante campo para fomento de sua utilização no Brasil. Detalhes de procedimentos de uso, bem como o esclarecimento dos parâmetros de projetos típicos de rodovias existentes foram abordados neste trabalho de forma a difundir a utilização do aparelho FWD como ferramenta consagrada de projeto também em nível nacional.

O trabalho realizado no trecho rodoviário experimental também converge para maior familiarização do uso do equipamento FWD, de acordo com os resultados associados a alguns tipos distintos de estrutura de pavimentos, incluindo os aspectos geológicos e ambientais. Desta forma, o conteúdo desta dissertação fornece uma congregação de informações direcionadas à melhoria do panorama nacional de pavimentação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar um estudo para a utilização do equipamento do tipo Falling Weight Deflectometer - FWD, aprimorando a sua confiabilidade para que sejam minimizados os equívocos de análise de pavimentos, o que, consecutivamente, resultará em melhorias factíveis nas atuais execuções de diagnósticos e projetos de pavimentos.

Almejou-se com esta pesquisa apresentar uma contribuição ao rol de soluções de diagnóstico e projeto para o sistema rodoviário brasileiro, realizando um procedimento mais detalhado, visando um incremento na percepção técnica dos engenheiros projetistas de pavimentação, bem como procedimentos executivos que podem interferir diretamente com os resultados dos ensaios, os quais foram idealizados e concebidos em países de condições distintas das do Brasil.

1.1.2 Objetivo específico

O objetivo específico desta pesquisa é a adoção de um procedimento que estabeleça o uso consciente do equipamento do tipo FWD, de forma a minimizar os equívocos no processo de avaliação de pavimentos, tornando o equipamento uma ferramenta mais legítima de solução de projeto.

1.2 Metodologia da Pesquisa

A metodologia desta pesquisa está focada na revisão bibliográfica sobre deflectometria de diversos países, inclusive a do Brasil, abrangendo os editais de concessões de malhas rodoviárias estaduais e federais, analisando o FWD - Falling Weight Deflectometer como ferramenta de previsão de desempenho de estruturas de pavimento, segundo as necessidades atuais do meio técnico de produzir projetos fidedignos aos parâmetros estruturais do corpo estradal.

Foi estabelecido um entendimento mais criterioso de uso do equipamento FWD para que seja possível, com análise dos levantamentos do comportamento estrutural e uma correta interpretação destes dados, obter-se um conjunto de informações confiáveis da estrutura do pavimento, constituindo-se assim o uso do FWD como ferramenta de projeto, controle de execução de camadas e avaliação estrutural, inclusive com previsibilidade de desempenho da estrutura do pavimento.

Para atingir estes objetivos:

- Foram estudados os aspectos práticos de procedimentos de ensaios de Viga Benkelmann e FWD, bem como se existe uma correlação entre estes dois equipamentos.
- Foram interpretados os procedimentos e normas existentes para o uso do FWD.
- Foi realizado um levantamento dos pontos críticos do ensaio com FWD, visando à eliminação de erros sistêmicos e minimização de erros aleatórios.
- Foi avaliada a produtividade e os fatores que interferem no ensaio com o FWD.
- Foram analisados os módulos estáticos e dinâmicos através de retroanálises, e o que isto representa em termos de vida útil para o desempenho das estruturas dos pavimentos.

1.3 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 dessa pesquisa apresenta uma introdução seguida da metodologia e estrutura do trabalho. Também foram elucidados os objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 foi realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos que são utilizados nas avaliações de um pavimento, que possibilitam verificar as condições funcionais, estruturais e os parâmetros intrínsecos.

São apresentados no capítulo 3 os principais tipos de ensaios e equipamentos para medida de deformações recuperáveis, descrevendo resumidamente os procedimentos dos ensaios e fazendo uma análise crítica de possíveis fontes de erro.

O capítulo 4 apresenta descrição mais aprofundada dos equipamentos Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer – FWD, sendo este último o principal equipamento para a presente dissertação sendo estudada, ainda, a potencialidade de sua utilização, para a realização de previsão de desempenho estrutural de pavimentos, visando, minimizar os equívocos de avaliação, resultando em melhorias factíveis ao rol de soluções ao sistema rodoviário brasileiro.

O capítulo 5 apresenta a descrição de trechos experimentais e a análise dos resultados das medidas de Viga Benkelman e o Falling Weight Deflectometer – FWD, fazendo uma análise crítica de possíveis correlações e previsão de desempenho estrutural em termos de vida útil do pavimento.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões obtidas e sugestões para continuidade do tema proposto, com possibilidades de seqüências em trabalhos de pesquisas futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Gerais de Pavimento

Um pavimento viário é uma estrutura de camadas, sendo todas estas camadas superpostas e assentes sobre a camada final de terraplenagem regularizada, que permanece acima do terreno natural, o qual é definido como subleito (figura 2.1).

O pavimento tem a função de resistir às solicitações oriundas das tensões verticais geradas pelo tráfego, distribuindo-as ao subleito, proporcionar condições de rolamento cômodas e seguras aos usuários da rodovia e, resistir aos esforços horizontais que nele atuam, no sentido de proporcionar maior durabilidade à superfície de rolamento, adiando ao máximo aos processos de desgaste, deformação ou trincamento, que são características da fase de fadiga do pavimento (DAROUS et al., 2003).

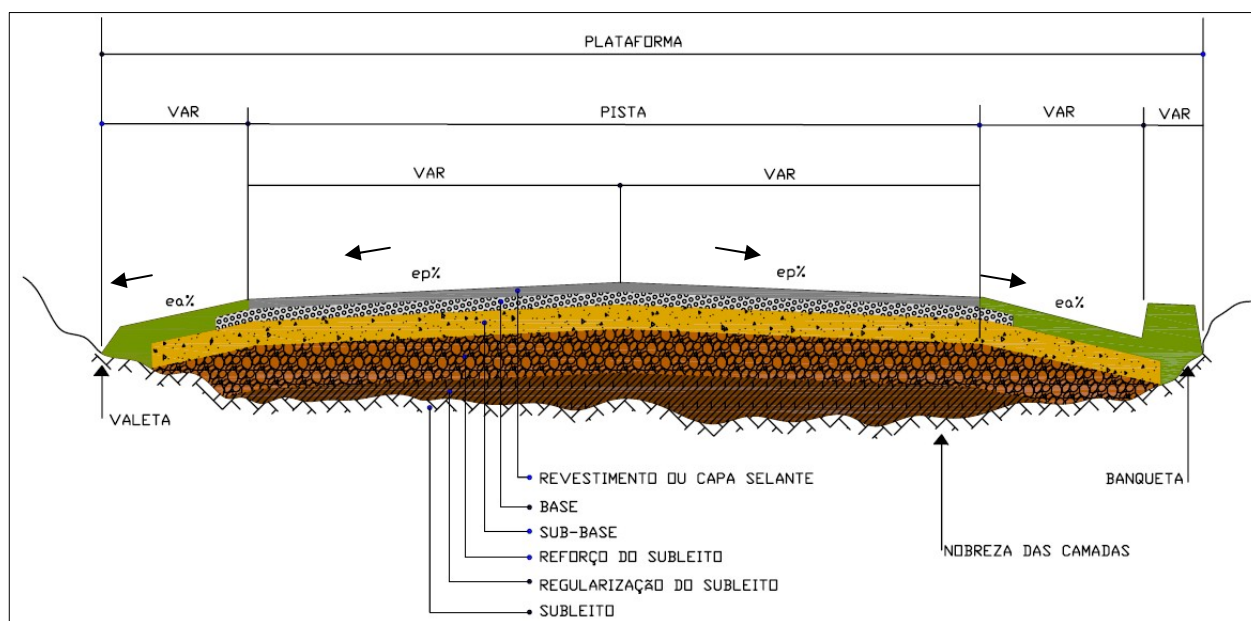


Figura 2.1 – Seção transversal típica do pavimento flexível.

GONÇALVES, CERATTI, RODRIGUES & SOMACAL et al. (2000) detalharam, em estudo conjunto do desempenho de pavimento, que um pavimento flexível com revestimento em concreto asfáltico deteriora-se gradualmente ao longo do tempo devido a dois mecanismos diretamente associados à passagem repetida das cargas do tráfego: o trincamento por fadiga das camadas asfálticas e os afundamentos em trilha de roda decorrentes do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas da estrutura. Os autores do estudo informaram também que as condições ambientais às quais o pavimento está sujeito, onde se incluem as condições de temperatura do ar, insolação, pluviometria e ainda as condições de drenagem profunda e próxima à superfície pavimentada, afetam as velocidades com que a degradação estrutural se processa.

Estes fatores interferem nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais das camadas do pavimento por gerarem tensões quando a própria estrutura tende a restringir movimentações volumétricas de natureza térmica ou de variação de umidade. (FABRÍCIO et al., 1994).

Todos estes aspectos são decorrentes da redução do módulo de resiliência, o qual é relacionado aos aspectos de elasticidade. Este assunto será detalhado no próximo tópico.

2.1.1 Teoria Elástica

O matemático e físico francês Joseph Valentin Boussinesq, em 1885, apresentou estudo para determinação de tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto, com determinados valores de profundidade e espaçamento / afastamento da carga em um sistema elástico linear, com base na teoria formulada pelo cientista inglês Robert Hooke (Lei de Hooke). E este foi o início da teoria elástica, sendo que esta solução foi concebida em um sistema homogêneo, isotrópico e generalizada em espaço semi-infinito sob um ponto de carregamento. (ULLIDTZ, 1987).

Na década de sessenta com o incremento da informática, houve a adoção dos computadores e o cálculo dos módulos elásticos das diversas camadas do conjunto pavimento/subleito, bem como das leis de fadiga das misturas asfálticas, sendo estes materiais ensaiados em laboratório para a determinação destes módulos elásticos, que posteriormente passaram a ser denominados como módulos de resiliência. Desta forma iniciou-se o desenvolvimento da avaliação estrutural, baseada principalmente na teoria elástica linear, originalmente desenvolvida pelo professor Donald M. Burmister, em 1945 (ULLIDTZ, 1987).

O pesquisador Francis Hveem foi quem realizou os primeiros estudos sistemáticos da deformabilidade dos pavimentos. Em 1938, através da implantação de sensores eletromagnéticos no pavimento, o Órgão Rodoviário da Califórnia iniciou as medidas de deslocamento vertical recuperável associadas ao tráfego, que tinha por objetivo conhecer a deformabilidade do pavimento mensurável. Com o avanço destes estudos por mais de uma década, Hveem concluiu que a deformação resiliente das camadas inferiores, em especial o subleito, era o elemento responsável pelas patologias de trincamento progressivo do pavimento asfáltico. Atualmente, as organizações nacionais e internacionais ligados à pavimentação mantêm o interesse no aspecto de avaliação estrutural de pavimentos com a consideração não apenas dos deslocamentos verticais recuperáveis na superfície dos pavimentos, mas também, das tensões e deformações atuantes na estrutura, correlacionando-as com a definição da vida de fadiga (MEDINA et al. 1997).

A consideração das deformações resilientes no dimensionamento dos pavimentos foi uma evolução alcançada através da análise de tensões e deformações de estruturas de pavimentos como sistemas de múltiplas camadas com a aplicação da teoria da elasticidade e dos métodos dos elementos finitos. Os ensaios laboratoriais de tração indireta por compressão diametral para materiais asfálticos e cimentados, sob ação de carga repetida, bem como os ensaios triaxiais também de carga repetida para solos proporcionaram a determinação das características resilientes e o comportamento

em relação à fadiga destes materiais. Assim, estes ensaios simulam condições que se aproximam daquelas existentes em campo (PINTO & PREUSSLER, 1994).

2.2 Avaliações dos Pavimentos

HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI et al. (1994) citam que as avaliações de pavimentos consistem numa série de atividades que fornecem informações sobre o estado atual, particularmente no que diz respeito às condições estruturais do pavimento e da capacidade de oferecer aos seus usuários conforto e segurança durante o tráfego de veículos. Estas informações são utilizadas no planejamento e projeto de serviços de gerência de pavimentos, norteando os serviços de manutenção e restauração da rodovia, bem como fornecendo respaldo para a melhoria de tecnologia de projeto, construção e manutenção.

Deve ser procedida a inspeção de avaliação prévia do pavimento frente à ação do tráfego, dos fatores climáticos e do meio ambiente. Esta avaliação consiste na análise de sua condição funcional, a qual descreve a qualidade da rodovia quanto ao conforto, segurança, influência do meio ambiente e aspectos estéticos. Ainda, a avaliação prévia consiste também na análise da condição estrutural, a qual está relacionada à capacidade de suporte do pavimento, abrangendo as características de resistência e deformabilidade das camadas de pavimento e do subleito sob a ação das cargas atuantes, averiguando-se as deflexões recuperáveis, comportamento elástico e deformações permanentes, ou seja, as que apresentam uma deformação residual por sobrecarga ou fadiga. (BORGES et al. 2001).

A identificação das condições estruturais de um pavimento pode ser efetuada por meio de avaliações destrutivas e não destrutivas:

2.2.1 Avaliação destrutiva

A avaliação destrutiva tem esta denominação porque invalida, para futuros testes a área do pavimento onde foi feita a análise, através de remoção e coleta de material de concreto asfáltico, subleito ou outros materiais da base e sub-base da estrutura. O procedimento consiste na abertura de poços ou valas de sondagem (figura 2.2) para identificação da natureza e das espessuras dos materiais das camadas do pavimento, bem como da coleta de amostras destinadas a ensaios de laboratório. Desta maneira, pode-se verificar se as espessuras das camadas são suficientes, bem como se a natureza dos materiais utilizados para as camadas são adequados ao tráfego. É possível, ainda, obter características do subleito e fatores construtivos, os quais também podem ser fatores que afetem a deterioração dos pavimentos (STRIEDER, GONÇALVES, SALVADORETTI, CERATI, KLEIN & HIRAKATA et al. 2004).

A norma DNER-PRO 010/79 define que sondagens complementares a pá e picareta devem ser procedidas, conforme o resultado dos estudos procedentes, executando-se poços de sondagens com espaçamento máximo de 200 metros. Ainda, a mesma norma recomenda a sondagem rotativa processada nas camadas betuminosas integrantes da superestrutura do pavimento, utilizando-se uma coroa diamantada de 10 centímetros de diâmetro, com a qual são extraídos corpos de prova cilíndricos onde podem ser identificadas as diversas camadas do pavimento betuminoso, quando o corpo de prova estiver íntegro. O material ainda extraído é ensaiado em análises laboratoriais.

Alguns ensaios no local nas camadas de solos e de materiais granulares podem ser realizados, como CBR – California Bearing Ratio “in situ” e determinações de umidade e densidade (MARCON, et al. 1996).



Figura 2.2 – Avaliação destrutiva do pavimento flexível – poço de sondagem.

2.2.2 Avaliação não-destrutiva

A avaliação não-destrutiva consiste no registro de defeitos da superfície e na realização de provas-de-cargas, onde medidos os parâmetros de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento, atuando dentro do regime elástico de deformação do pavimento, ou seja, o regime em que as deformações recuperáveis (elásticas) retornam ao estado inicial assim que cessa a aplicação de carga. O deslocamento vertical da superfície é o parâmetro de resposta cuja medida é mais simples e confiável, em comparação com tensões ou deformações, razão pela qual, quase a totalidade dos equipamentos para ensaios não destrutivos é composta de equipamentos do tipo medidores de deflexões (CARDOSO, 1992).

Obtidos os dados que respaldem os tipos de intervenções corretivas na estrutura do pavimento, podem ser executadas operações de manutenção corretiva, intervenções parciais ou totais em relação à largura da via, espessura da camada betuminosa, até a restauração mais invasiva, que é a reconstrução total do pavimento, inclusive nas camadas de base. Desta forma, busca-se restabelecer as características de conforto, segurança e economia aos usuários das rodovias, independentemente de quais atividades sejam efetuadas para proporcionar tal estado. Este diagnóstico é realizado com base em uma série de parâmetros que definem o comportamento do pavimento (GONTIJO, GUIMARÃES & NOGUEIRA et al., 1994).

2.3 Avaliação Funcional

A avaliação funcional do pavimento destina-se a avaliar a condição do pavimento em um determinado tempo, de acordo com a percepção do usuário, de modo a serem detectadas as características de conforto em termos de qualidade de rolamento. O fornecimento de uma superfície adequada quanto à qualidade de rolamento é a função principal do pavimento (SILVA, 2006).

Pode-se, ainda, associar a avaliação funcional os aspectos de segurança, custo do usuário das vias, que se traduz pelo gasto de combustível e frequência de manutenção do veículo, influências do meio ambiente e fatores estéticos, sendo estes aspectos obtidos através da realização de medições de irregularidade superficial, de resistência a derrapagem, além de contagem de defeitos que aparecem na superfície de rolamento (MEDINA, MACEDO & MOTTA et al., 1994).

Para que seja constatado o nível de deterioração da via através da análise de patologias superficiais e estado funcional do pavimento, podem-se utilizar métodos objetivos ou subjetivos. Os métodos objetivam conhecer a representatividade do problema, realizando, desta forma, o registro e quantificação dos defeitos superficiais.

O DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (antigo DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) elaborou uma série de normas e procedimentos inter-relacionados com os dois tipos de avaliação superficial existentes, que são explicados a seguir:

2.3.1) Avaliação Superficial Objetiva

As avaliações objetivas (figura 2.3) quantificam, numericamente, os locais onde estão distribuídos os defeitos, classificando em diversos níveis de severidade, como apresentado na norma DNIT 006/2003 – PRO, - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento (antiga DNER PRO-08/94).

Na aplicação da DNIT 007/2003 – PRO - Levantamento para avaliação da condição de superfície de sub-trecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos, estudos e projetos - Procedimento (antiga DNER ES-128/94) é recomendado que a extensão de cada sub-trecho homogêneo seja inferior ou igual a 20 quilômetros e a extensão mínima seja igual ou superior a 300 metros.

Na execução do DNIT 006/2003 – PRO é exigido que nas rodovias de pista simples sejam demarcadas superfícies de avaliação a cada 20 metros, alternadas em relação ao eixo da pista de rolamento, perfazendo assim a conformação de 40 em 40 metros em cada faixa de tráfego. No caso de pistas duplas as demarcações na superfície devem ocorrer a cada 20 metros, na faixa de tráfego mais solicitada de cada pista.



Figura 2.3 – Técnico realizando avaliação superficial objetiva.

2.3.2) Avaliação Superficial Subjetiva

A norma DNIT 009/2003 – PRO - Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento (antiga DNER PRO-07/94), elaborada pela Diretoria de Planejamento e Pesquisa do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), tem por objetivo fixar os procedimentos exigíveis para a avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos com base no Valor de Serventia Atual (VSA). A norma entende como “Serventia Atual” a capacidade de proporcionar o conforto e suavidade ao rolamento proporcionado pelo pavimento ao usuário. Ainda, indica as peculiaridades de seleção do grupo de avaliação, do procedimento experimental abrangendo a escolha dos trechos a serem

avaliados e as condições impostas para a investigação de tais trechos para obter o VSA.

Segundo BALBO (1997) as condições funcionais de uma via devem ser estudadas por uma equipe de avaliadores devidamente preparada para tal fim. O Valor de Serventia Atual varia numa escala de 0 a 5. Quanto maior for o índice apontado, melhores são as condições de serventia da estrada. A serventia de uma estrada pode ser entendida, independentemente da condição climática, como sendo a “habilidade de servir” de um pavimento no instante da observação dos avaliadores. A serventia de uma estrada, hipoteticamente, atende ao tráfego misto sob o ponto de vista de conforto e segurança.

Em suma, é uma avaliação baseada em conceitos qualitativos na definição do estado de degradação em que o pavimento se encontra, através da passagem de veículos de teste com técnicos especializados ou equipamentos (figura 2.4), procedendo-se a atribuição de notas ao pavimento, como apresentado na norma DNIT 009/2003 – PRO.

A Norma DNIT 009/2003 indica um procedimento durante a fase preliminar de reconhecimento do sistema viário que se deseja avaliar, sendo possível correlacionar avaliações subjetivas com as objetivas. O avaliador deve proceder à análise de maneira imparcial e idônea, considerando as seguintes indagações:

- a. Como se portaria um trecho de pavimento, tendo em vista à finalidade para a qual foi construído, durante um período de 24 horas por dia, se ele estivesse localizado em uma rodovia principal?
- b. Qual o conforto que o referido trecho da via proporcionaria ao avaliador se tivesse que utilizá-lo dirigindo um veículo durante 8 horas?
- c. Como o mesmo se sentiria dirigindo ao longo de 800 quilômetros sobre esta estrada?

São então assinaladas as notas de cada avaliador, sem uma preocupação com a exatidão do número, sempre que possível evitando-se retornar sobre um trecho já avaliado, ou seja, percorrendo os trechos em uma direção, com velocidade próxima à máxima permitida. Para a avaliação são usados dois veículos no mínimo, sendo eles de passeio e médio padrão, dentre os fabricados no país. Os avaliadores devem ser distribuídos de dois a três em cada veículo (DNIT 009/2003 - PRO).

Os resultados para cada trecho avaliado são relacionados separadamente, com o uso da fórmula:

$$VSA = \frac{\sum X}{n}$$

Equação 2.1

Onde:

VSA → Valor de Serventia Atual;

X → Valores de Serventia Atual individuais atribuídos por cada membro do grupo;

n → número de membros de cada avaliação.

PINTO & PREUSSLER (2001) são outros autores que destacaram a importância da opinião do usuário no processo de avaliação das condições funcionais de um pavimento. Esse procedimento subjetivo de avaliação de serventia de um pavimento foi inicialmente estudado por ocasião da pista experimental da antiga AASHO (American Association of State Highway Officials), atualmente AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).



Figura 2.4 – Equipamentos de avaliação superficial subjetiva. Fonte: acervo Copavel Engenharia e Consultoria Ltda.

2.4 Avaliação Estrutural

A condição estrutural de um pavimento denota sua adequação ou sua capacidade de resistir à deterioração provocada pela passagem das cargas do tráfego, as quais são transmitidas pelas rodas dos veículos ao pavimento. Realizando-se uma interpretação correta dos levantamentos deflectométricos que apontam o estado estrutural de um pavimento, obtém-se a informação de capacidade das camadas de pavimento em resistir aos efeitos deteriorantes produzidos pela repetição das cargas de tráfego (BORGES, 2001).

É conhecido como “Avaliação Estrutural” o conjunto de procedimentos que determinam as respostas da estrutura quando sujeita às cargas de tráfego, traduzida na forma de tensão, deformação e deflexão em determinados pontos do pavimento, de forma que seja possível verificar sua capacidade de resistir às exigências mecânicas responsáveis pela degradação do pavimento. A partir deste diagnóstico, torna-se possível definir quais serviços serão necessários ao restabelecimento das condições admissíveis aos usuários da rodovia (RODRIGUES, 1995).

De acordo com SILVA (2006), o antigo DNER (atual DNIT) objetivava padronizar uma avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis existentes para a coleta de informação para o cálculo da vida restante ou do reforço necessário. O reforço de pavimentos flexíveis tem como função a recuperação das características funcionais e estruturais do pavimento através da colocação de uma espessura adicional de concreto asfáltico que deve ser executada sobre o pavimento antigo, possibilitando a recuperação da serventia e da capacidade estrutural para a reabilitação ou prolongamento da vida útil da via a um novo número de solicitação do eixo padrão, segundo os procedimentos A e B do DNER:

.DNER-PRO 010/79: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento “A”.

.DNER-PRO 011/79: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento “B”.

O DNER PRO-10/79 baseia-se no método de dimensionamento adotado pela *Califórnia Division of Highways* – CDH (atual CALTRANS) na década de 60. Este método fundamenta-se na relação entre a grandeza das deflexões recuperáveis e o desempenho dos pavimentos asfálticos (PEREIRA, 1975).

O método considera que na hipótese de um projeto satisfatório de pavimento com boa execução da construção, a evolução das deflexões recuperáveis ao longo da

vida de um pavimento pode se dar nas fases de: Consolidação devido a ação do tráfego que ocasiona decréscimo na deflexão; Elástica em que a deflexão permanece constante e Fadiga que se caracteriza por um acelerado crescimento no valor da deflexão e a perda de capacidade estrutural das camadas do pavimento conforme figura 2.5:

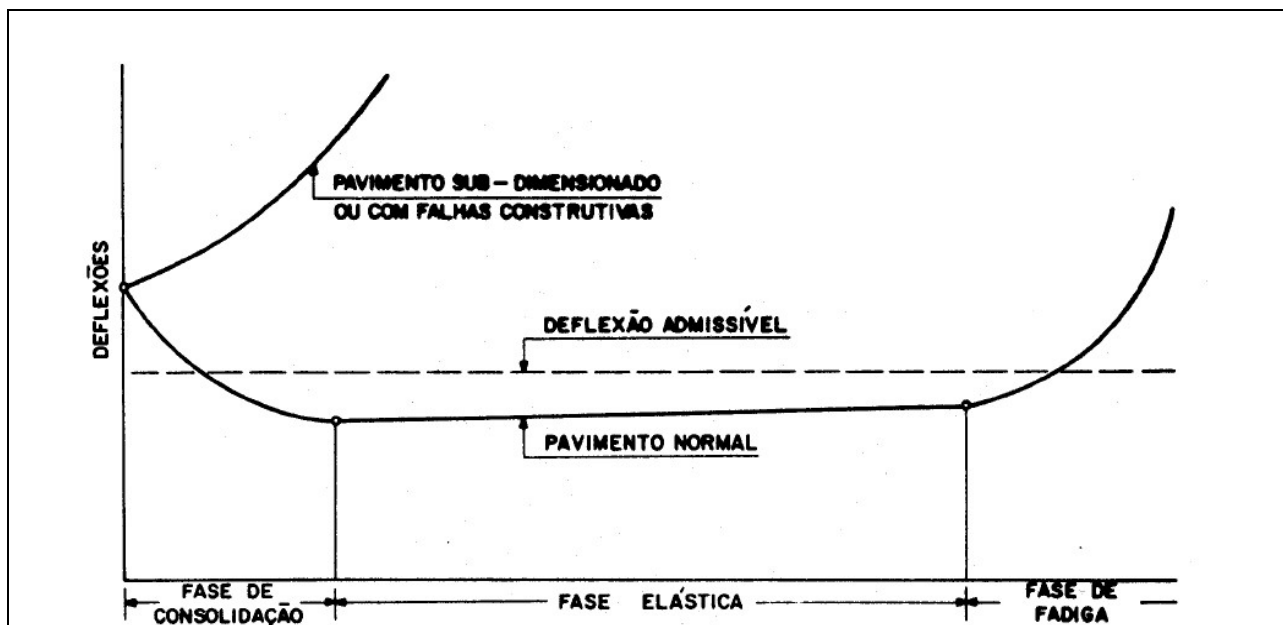


Figura 2.5 – Fases da vida de um pavimento. Fonte: DNER, 1998

Os procedimentos A e B percorrem as conceituações básicas acerca da vida útil do pavimento, conforme ilustrado na figura 2.5. Sucédida imediatamente à construção do pavimento, a fase da consolidação é caracterizada por um valor decrescente de deflexão até a estabilização da consolidação adicional nas diversas camadas do pavimento, decorrente do início das solicitações do tráfego. A fase seguinte, que é a elástica, define a vida útil do pavimento, os valores de deflexão mantêm-se constantes ou crescem ligeiramente. Quando o nível deflectométrico do pavimento começa a acelerar gradativamente, associado às falhas aparentes na superfície do pavimento, ocorre a fase da fadiga. Caso não sejam tomadas medidas para recuperação do pavimento em tempo hábil, a expansão do processo de degradação será marcante.

Quanto às diferenças, o procedimento A é mais pormenorizado nos aspectos que definem as diretrizes para projetos de reforço de pavimento, com o uso de medidas da bacia de deflexão (figura 2.6) enquanto o Procedimento B realiza também o uso de medidas de deflexão, porém, adotando os valores deflectométricos de projeto (inicial) do pavimento, para que seja estimada a vida útil restante do pavimento. Em ambos os procedimentos é recomendado, em dois ou três pontos para cada quilômetro, o levantamento da bacia de deflexões (FABRÍCIO, GONÇALVES & FABRÍCIO et al., 1988).

Ambos os procedimentos fazem referências às seguintes normas:

- DNIT 005/03 (atualizada da DNER-TER 001/78) – Terminologia: Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos.

- DNIT 006/2003 – PRO – Procedimento: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

- DNER – ME 024/94 – Método: Determinação das Deflexões no Pavimento pela Viga Benkelman.

Na DNER-PRO 010/79 (Procedimento A) também são feitas referências às seguintes normas:

- DNIT – 009/2003 – PRO (atualizada da DNER – PRO 008/94) – Procedimento: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

- DNER – ME 061/94 – Método: Delineamento de Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por Intermédio da Viga Benkelman.

- DNER – PRO 102/97 – Procedimento: Sondagem de Reconhecimento pelo Método Rotativo.

2.4.1 Raio de Curvatura como Parâmetro de Projeto:

Um aspecto importante que deve ser ressaltado é que a obtenção da deflexão recuperável máxima não é suficiente para caracterizar a capacidade estrutural com precisão. Segundo os autores CARNEIRO & SILVA (1981), o parâmetro que comumente se associa a deflexão recuperável é a curvatura do círculo que mais se ajusta à linha elástica do ponto de aplicação de carga, sendo que para a medida deste parâmetro dá-se o nome de raio de curvatura (figura 2.7).

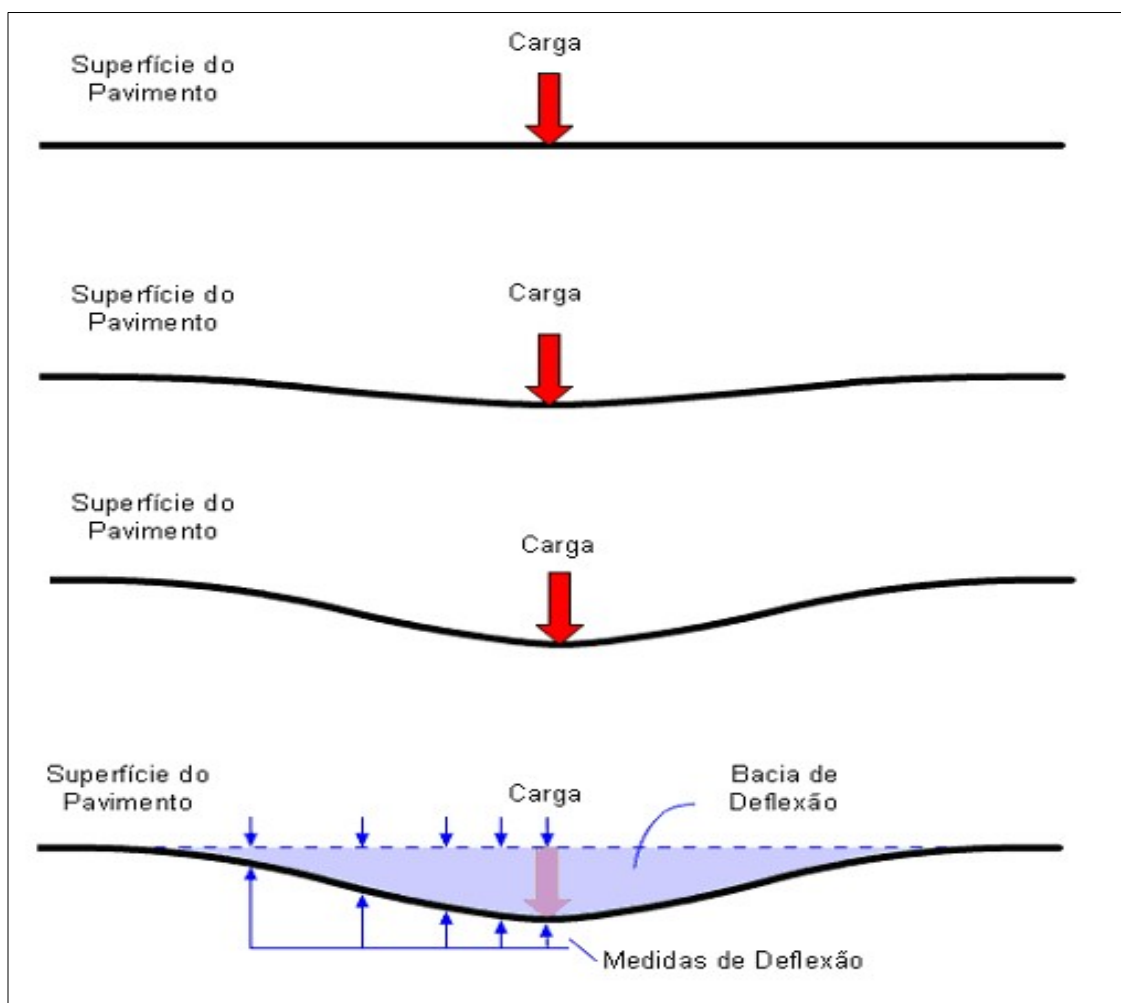


Figura 2.6 – Esquema de deslocamento vertical recuperável da superfície do pavimento, denominado de “Bacia de Deflexão”.

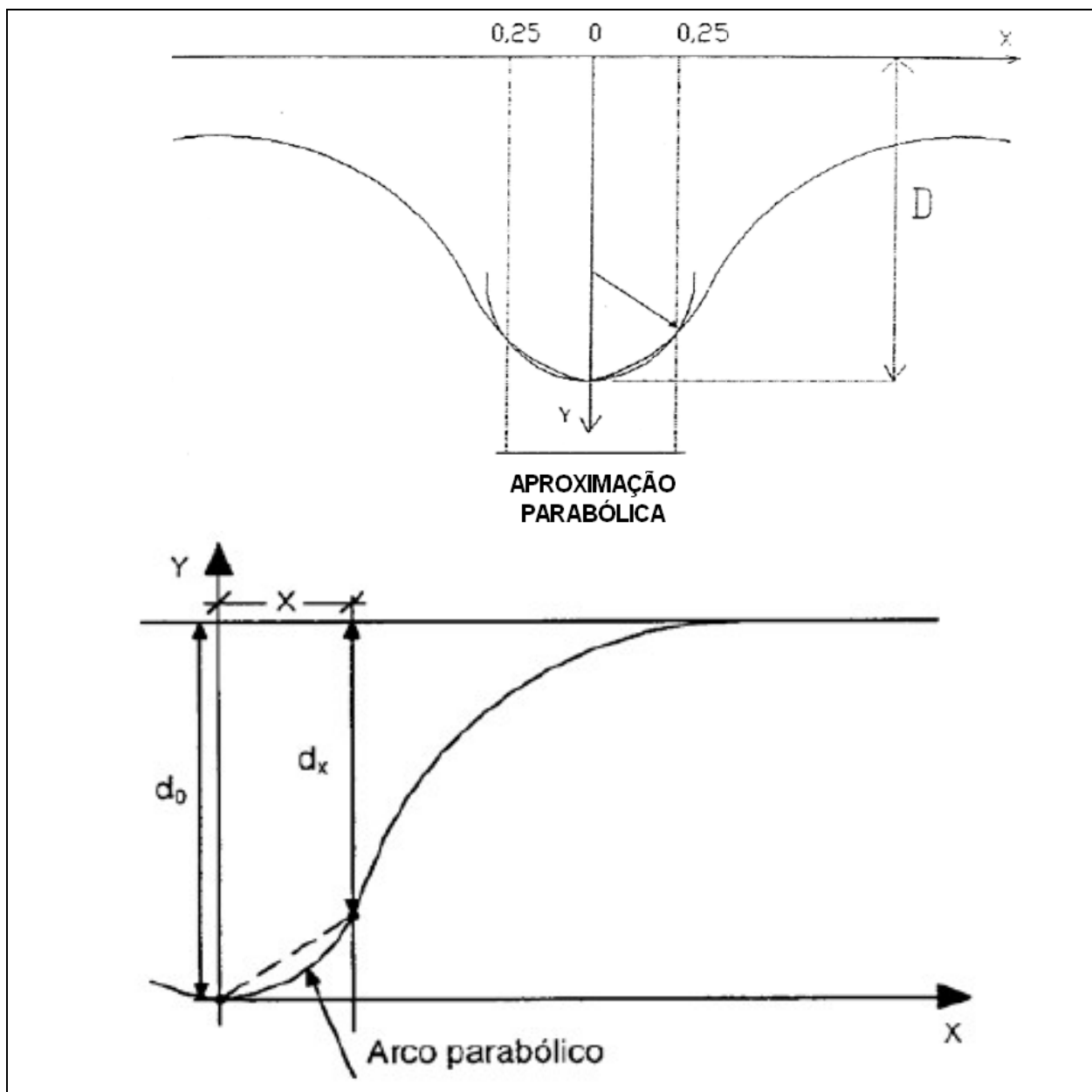


Figura 2.7 – Esquema representativo do raio de curvatura.

Desta forma, faz-se importante estabelecer a linha elástica da deformação, representada pela bacia de deformabilidade ou bacia de deflexão do pavimento quando solicitado por uma carga (figuras 2.6 e 2.7), verificando-se a influência desta em diversos pontos do pavimento. Resumidamente, a forma assumida pela bacia da deformação indicará a maior ou menor capacidade do pavimento em assimilar e

distribuir as cargas para as camadas subjacentes, constituintes da estrutura (MOREIRA et al. 1977)

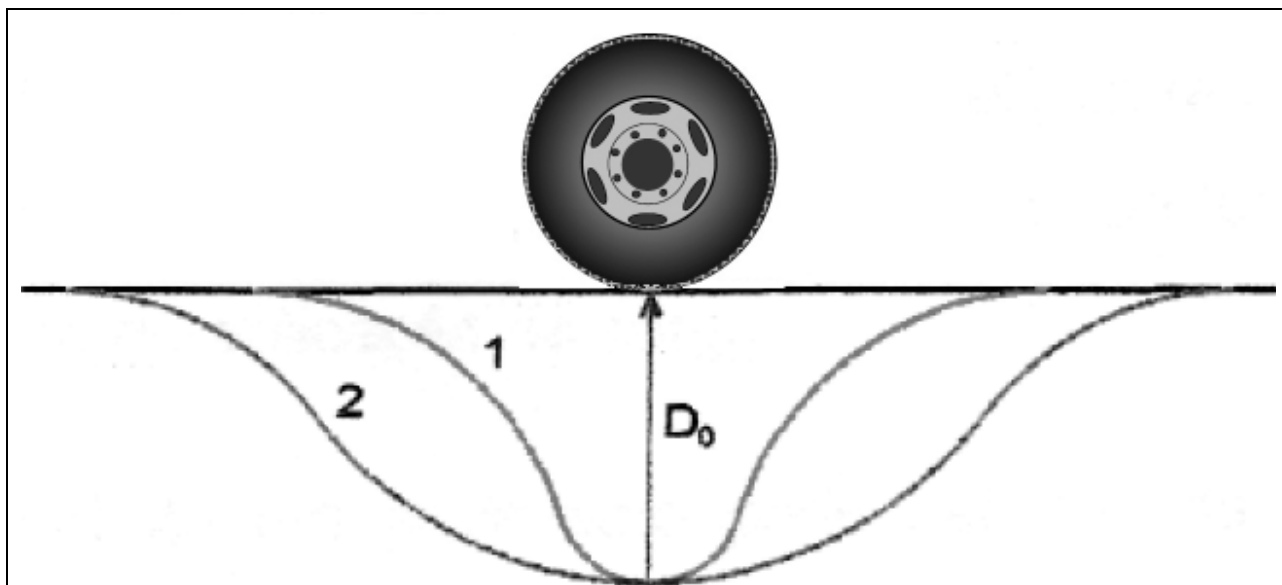


Figura 2.8 – Esquema representativo da bacia de deformabilidade (deflexão D_0)

Ainda segundo MOREIRA et al. (1977), as curvas 1 e 2 demonstradas na figura 2.8 representam as deformações obtidas em dois diferentes locais da superfície de um mesmo tipo de estrutura de pavimento, causadas pela aplicação de uma mesma intensidade de carga de roda. Observa-se que o deslocamento vertical recuperável do pavimento (D_0) é o mesmo em ambos os casos, indicando aparentemente uma mesma capacidade estrutural. Entretanto, a análise da bacia de deformação indica condições estruturais diferentes, expressas por um mesmo valor de deslocamento vertical máximo reversível. Presumidamente pode-se concluir que, o deslocamento vertical máximo recuperável do pavimento não é um critério suficiente para indicar ou mesmo explicar por si só o estado estrutural de um determinado pavimento, sendo necessário levar em consideração a forma assumida pela bacia deflectométrica e o raio de curvatura. Para tanto, o DNER – PRO 011/79 desenvolveu procedimentos com base no critério de deformabilidade dos pavimentos flexíveis, sendo a mesma expressa pela medida de deflexões recuperáveis.

Esses procedimentos visam definir qual critério de dimensionamento o projeto de um reforço ou recapeamento do pavimento deve seguir, seja o critério defletoométrico ou o critério de resistência.

Os procedimentos são aceitos pelo DNIT para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Porém, segundo o DNER-PRO 10/79, as normas não são precisas o suficiente para que seja possível vislumbrar o limiar dos campos de aplicação dos critérios de deformabilidade e de resistência ao projeto de reforço de pavimentos existentes. Somente quando a estrutura do pavimento existente está trabalhando em regime elástico é que se pode aceitar os critérios de deformabilidade para cálculo do reforço. No caso de deformações mais significativas ocasionadas por evolução dos processos de ruptura, são aceitos os critérios de resistência para cálculo do reforço.

O raio de curvatura, que permite analisar a capacidade da estrutura do pavimento em receber e distribuir, para as camadas subjacentes, as tensões das cargas do tráfego e avaliar o efeito dos esforços de tração que estarão atuando na fibra inferior das camadas asfálticas e seus reflexos na vida de fadiga do pavimento (ROCHA FILHO & RODRIGUES, 1998), está incorporado às Normas DNER-ME-024/94 e DNER-PRO-011/79. Juntamente com a determinação da deflexão de projeto, o raio de curvatura complementa os critérios de Avaliação Estrutural do Método de Projeto de Restauração correspondente.

Segundo MOREIRA (1977), para a definição do raio de curvatura, muitas funções têm sido pesquisadas com variações circulares, polinomiais ou trigonométricas, sendo a seguir, abordado o método de ajustamento clássico através de uma parábola do 2º grau.

Assim, genericamente, a equação representativa da curva bidimensional onde x é o eixo das ordenadas e y é o eixo das abscissas, seria da seguinte forma:

$$y = a + bx + cx^2$$

Equação 2.2

Os coeficientes "a", "b" e "c" serão obtidos, considerando-se:

Primeira condição: No ponto de aplicação da carga, a deformação deve ser máxima, ou seja:

$$\frac{dx}{dy} = 0$$

Lembrando-se que: $\frac{dy}{dx} = b + 2cx \Rightarrow \frac{dy}{dx} = b + 2c \times 0 \Rightarrow \frac{dy}{dx} = b$

Assim:

$$y = a + cx^2$$

Segunda condição: Para $x = 0$, deve-se ter $y = y_0 = D$ (deformação reversível máxima) Obtém-se, portanto: $a = y_0$, e a equação se transforma em:

$$y = y_0 + cx^2$$

Terceira condição: Para $x=0$, deve-se ter a 2ª condição de máximo: $d^2 y \div dx^2 < 0$

Lembrando-se que: $d^2 y \div dx^2 = 2 \times c \Rightarrow c < 0$

Fazendo-se $c = -m$, obtém-se: $m = (y - y_0) \div x^2$

Como o limite de aproximação parabólica equivale a $x = 25$ cm e o “m” trata-se de uma constante numérica, tem:

$$m = (y - y_0) \div 25^2 = (y - y_0) \div 625$$

Aplicando-se o cálculo diferencial, obtém-se:

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

Como:

$$\frac{dy}{dx} = -2mx = 0 \quad \text{e} \quad \frac{d^2y}{dx^2} = -2m,$$

Unificando-se as equações supracitadas para determinação do raio de curvatura :

$$R = \frac{1}{2m} \times 10 = \frac{1}{2 \times \left(\frac{y_0 - y_{25}}{625} \right)} \times 10 = \frac{625}{2(y_0 - y_{25})} \times 10$$

Onde: $x \rightarrow$ em cm e $y \rightarrow$ em mm/100

Lembrando – se que:

$$R = \left(\frac{x^2}{2(y_0 - y_{25})} \right) = \frac{6250}{2(y_0 - y_{25})}$$

Equação 2.3

Onde:

R - Raio de Curvatura em metros

y_0 - Deflexão Benkelman em 0,01 mm medida na vertical do eixo traseiro entre as rodas duplas do caminhão de prova.

y_{25} - Deflexão Benkelman em 0,01mm medida na vertical do eixo traseiro a 25 cm de distância d_0 entre as rodas duplas do caminhão de prova.

A deflexão " d_0 " e o raio de curvatura "R" são calculados no plano de simetria entre as rodas duplas traseiras do caminhão de prova.

As características elásticas dos componentes da porção superior da estrutura do pavimento afetam, essencialmente, o raio de curvatura. Assim, um baixo raio de curvatura é, normalmente, um parâmetro indicativo de que os módulos elásticos das camadas superiores do pavimento apresentam valores inferiores aos desejáveis (FABRÍCIO, GONÇALVES & FABRÍCIO 1988).

NEBLAUER (2002) opina que o prolongamento da vida de serviço do pavimento com execução de reforço é fruto do aumento da capacidade de carga da estrutura, adiando o aparecimento de deformações plásticas e a reflexão de trincas no revestimento.

Segundo SUZUKI, SOUZA & NAGAO et al. (1998), mesmo em pavimentos com boas condições funcionais podem ocorrer valores elevados de deflexões máximas, mesmo com a ausência ou pequena quantidade de fissuras e de deformações permanentes. A situação inversa também pode ocorrer. A determinação da bacia deflectométrica proporciona análises mais acuradas.

Existem vários métodos computacionais que permitem a análise da bacia deflectométrica, o que possibilita a determinação das características elásticas do

pavimento a ser reforçado. Técnicas chamadas de retroanálise podem estimar os módulos de resiliência das camadas do pavimento, utilizando-se as deflexões levantadas em ensaios não-destrutivos. Baseando-se na teoria da elasticidade, pode-se dimensionar a espessura necessária de reforço com o auxílio de programas computacionais, que podem fornecer resultados confiáveis e ágeis, consistindo em uma alternativa aos métodos empíricos que possuem grande influência das experiências locais (MEDINA , MACÊDO & MOTTA et al. 1994).

A partir da análise estrutural é possível obter-se a vida útil remanescente dos pavimentos avaliados e ser calculado o reforço superficial. O dimensionamento do reforço, através de camada asfáltica adicional ou recapeamento, é o procedimento mais utilizado na reabilitação de pavimentos. A camada de reforço tem o papel fundamental de recuperar as características funcionais e estruturais, prolongando a vida útil do pavimento. Até os anos 1960, a abordagem, para o dimensionamento do reforço de um pavimento era baseado na experiência regional e no critério da resistência (deformações permanentes). A partir da década de 1960, surgiram métodos baseados em ensaios defletoométricos (não destrutivos) que tiveram aceitação generalizada e foram gradualmente difundidos. Na década seguinte, equipamentos mais sofisticados foram produzidos e programas computacionais capazes de calcular às características elásticas dos materiais constituintes dos pavimentos foram desenvolvidos. Por conseguinte, começaram a ser introduzidos os métodos mecanísticos ou analíticos, que se fundamentam na análise de tensões e deformações nas camadas dos pavimentos (PINTO & PREUSSLER, 2002).

Os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs) foram desenvolvidos nos anos 1980, com o uso de metodologias de reforços fundamentadas em modelos de previsão de desempenho e que procuram analisar diversas estratégias de intervenção com vistas a diminuir o custo de ciclo de vida do pavimento (DNER, 1998).

Todo este avanço científico e tecnológico tem por objetivo a conservação dos pavimentos. Segundo RODRIGUES (1991), os objetivos específicos a serem atingidos quando se projeta a restauração de um pavimento são os seguintes:

- Trazer a condição funcional (conforto ao rolamento e segurança) a níveis compatíveis com a de um pavimento novo;
- Garantir uma vida de serviço mínima para o pavimento restaurado, de modo que uma nova intervenção desse mesmo porte seja requerida apenas após este período;
- Utilizar técnicas disponíveis e aplicáveis e, que atendam a requisitos operacionais e às restrições orçamentárias;
- Controlar os mecanismos pelos quais a deterioração das estruturas de pavimento vem se processando ao longo do tempo.

2.4.2 Métodos e Normas para Execução de Reforço

Antes da execução do projeto de reforço de um pavimento é preciso que seja levantado o estado de degradação atual (MEDINA et al. 1997). Tal levantamento é realizado mediante realizações de avaliações estruturais e funcionais no pavimento em estudo, para que o reforço seja dimensionado.

Segundo PINTO & PREUSSLER (2002), o procedimento para o cálculo de reforço de pavimentos flexíveis é similar ao necessário para um pavimento novo. A concepção do reforço se diferencia da concepção de pavimento novo no que se refere a consideração do atual estado de conservação ou da vida remanescente da estrutura existente.

- DNER – PRO 10/79;

- DNER – PRO 11/79;
- DNER – PRO 159/85 (Método da Irregularidade);
- DNER – PRO 269/94 (Método da Resiliência ou TECNAPAV - Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários);

Estes quatro procedimentos de dimensionamento de pavimentos flexíveis são normalizados pelo DNER (1998), sendo que existem mais métodos não normalizados empregados atualmente no Brasil:

- Método do Instituto do Asfalto;
- Método da AASHTO;

Este conjunto de métodos de dimensionamento são classificados pelos seguintes enfoques:

- Enfoque Empírico – Análise Deflectométrica
 - . DNER-PRO 10/79 – Procedimento A;
 - . DNER-PRO 11/79 – Procedimento B;
 - . Método do Instituto do Asfalto.
- Enfoque Empírico – Análise da Deficiência Estrutural e Funcional
 - . DNER-PRO 159/85 (DNER, 1985);
 - . Método da AASHTO;
 - . Método do Instituto do Asfalto.

- Enfoque Mecanístico – empírico

. DNER-PRO 269/94 – Método da resiliência (TECNAPAV) (DNER, 1994i).

Os métodos DNER – PRO 010/79, DNER – PRO 011/79 e DNER – PRO 269/94 dimensionam o projeto, baseados nas deflexões máximas medidas antes da execução do reforço e nas previstas para o pavimento após o reforço. Para estes casos, a norma define obtenção dos levantamentos deflectométricos através da viga Benkelman e em avaliações funcionais, enquanto a estrutura do pavimento a ser reforçada estiver funcionando conforme projetado, ou seja, dentro da vida útil do pavimento. Estes métodos não contemplam deformações plásticas, que são as deformações oriundas de processos de ruptura por cisalhamento.

Ainda as normas DNER – PRO 159/85 e DNER – PRO 269/94 definem os procedimentos a serem seguidos para a restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Sendo que a norma DNER – PRO 159/85 se baseia em dados de ensaios de deflexão recuperável, sondagens destrutivas e ensaios de laboratório, bem como dados de irregularidade, Índice de Suporte Califórnia, resiliência, entre outros aspectos, resultando em alternativas de restauração para correção do processo de trincamento e irregularidades longitudinais. Já a norma DNER-PRO 269/94, que também se baseia em dados de levantamento de campo e laboratório, utiliza o método da Resiliência – TECNAPAV para definir os procedimentos de restauração.

As diretrizes a serem consideradas no projeto, são baseadas tanto no inventário do estado do pavimento (DNIT PRO- 006/2003), bem como nos da análise deflectométrica conforme tabela 2.1:

Tabela 2.1– Critério para estabelecimento das diretrizes de projeto (DNER, 1998).

IGG	F e AP	Do e D _{adm}	Decisão quanto ao aproveitamento da estrutura existente e quanto as medidas corretivas a serem levadas em conta no projeto
IGG < 180	F < 30mm e AP < 33%	$d_o < d_{adm}$	1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente; 2. Programação de reparos locais, se necessário; 3. Programação de tratamento de rejuvenescimento, se necessário.
		$3d_{adm} > d_o > d_{adm}$	1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente; 2. Programação de reparos locais, se necessário; 3. Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade.
		$d_o > 3d_{adm}$	1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente; 2. Programação de reparos locais, se necessário; 3. Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade e projeto de reforço com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente. Projeto de nova estrutura com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento parcial do valor residual do pavimento.
	F > 30mm ou AP > 33%	-	1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente; 2. Programação de reparos locais; 3. Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade e projeto de reforço com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente. Projeto de nova estrutura com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento parcial do valor residual do pavimento.
IGG > 180	-	-	Remoção parcial ou total do pavimento e sua substituição parcial ou total por nova estrutura projetada com base no critério de resistência.

Onde:

IGG → Índice de Gravidade Global (DNER PRO 08/94);

F → valor médio das flechas nas trilhas de roda;

AP% → porcentagem de afundamentos plásticos percebidos como graves;

d_0 → deflexão de projeto;

d_{adm} → deflexão admissível pelo pavimento existente;

Os valores de deflexão de projeto e deflexão admissível pelo pavimento existente são referenciados à carga de 6,8 tf, ao volume de tráfego de projeto bem como período de projeto, ou seja, o tempo de vida útil do pavimento.

O DNER PRO 11/79 possui procedimentos preliminares de obtenção dos dados da PRO 10/79, que são os dados de levantamento histórico, da prospecção preliminar, e dados da prospecção definitiva.

Através do inventário de superfície (DNIT PRO– 006/20034) e das deflexões recuperáveis (DNER – ME 24/94), o trecho é dividido em segmentos homogêneos, onde é determinada estatisticamente a deflexão de projeto para cada segmento conforme descrito na PRO 10/79 (DNER, 1998).

As espessuras de reforço obtidas pelo método B podem conduzir a valores inferiores as que são obtidas no método A. Baseia-se no conhecimento do número “N” de repetições da carga padrão 8,2t, equivalente a ação do tráfego que irá solicitar o pavimento, e em medidas de deflexões recuperáveis, obtidas por viga Benkelman (ANDREATINI, 1988).

A espessura de reforço pode ser obtida pela equação conhecida como Equação de Ruiz (deduzida pelo engenheiro argentino Celestino Ruiz, em 1964):

$$hcb = k \cdot \log \frac{D_{VB}}{D_{adm}}$$

Equação 2.4

Sendo:

$hcb \rightarrow$ espessura de reforço em concreto asfáltico, em cm;

$D_{VB} \rightarrow$ deflexão Benkelman de projeto, sob carga de 8,2 tf (mm/100);

$D_{adm} \rightarrow$ deflexão admissível após execução do reforço, (mm/100).

$k \rightarrow$ fator de redução da deflexão ($k = 40$ para concreto asfáltico).

O método possibilita o desmembramento da espessura de reforço em duas ou mais camadas permitindo se determinar às espessuras das camadas não constituídas de concreto asfáltico, isto pode ser feito considerando-se os coeficientes estruturais definidos pelo método, conforme tabela 2.2.

A deflexão admissível é determinada pela seguinte equação:

$$\log(D_{adm}) = 3,01 - 0,176 \cdot \log(N)$$

Equação 2.5

Onde:

$N \rightarrow$ número de solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2tf;

Tabela 2.2–Critério para estabelecimento das diretrizes de projeto (DNER, 1998).

Hipótese	Dados defletométricos obtidos	Qualidade estrutural	Necessidade de estudos complementares	Critério para cálculo do reforço	Medidas corretivas
I	$DP \leq D_{adm}$ $R > 100$	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície
II	$DP > D_{adm}$ $R < 100$	Se $DP < 3D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Defletométrico	Reforço
		Se $DP > 3D_{adm}$ MÁ	SIM	Defletométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$DP > D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR para MÁ	SIM	Defletométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$DP > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	-	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG > 180)	SIM	Resistência	Reconstrução

Onde:

$DP \rightarrow$ deflexão de projeto (Deflexão Característica x Fator correção sazonal);

$D_{adm} \rightarrow$ deflexão admissível pelo pavimento existente;

IGG $\rightarrow$ Índice de Gravidade Global.

Segundo DNER (1998), o procedimento 159/85 leva em consideração a análise de várias alternativas de reforço para um pavimento, mediante estudo do desempenho funcional e estrutural de cada uma das alternativas e respectivas viabilidades financeiras.

De acordo com SANTANA (1989), uma das desvantagens do método 159/85 é a pouca validade dos coeficientes utilizados nas equações de desempenho, tendo em vista que as experiências foram realizadas em uma área contínua que representa apenas cerca de 5% da malha rodoviária do Brasil. No entanto, com mais experiências, pode permitir estabelecer valores mais precisos para tais coeficientes para, desta forma, obter-se um ótimo método para as condições usuais, reservando-se os métodos baseados em modelos elásticos para os casos especiais.

PREUSSLER & PINTO (1983) são autores do DNER-PRO 269/94, este método, que é resultante de pesquisa promovida pelo IPR/DNER, utiliza o programa TECNAPAV. Este programa determina a espessura necessária de camada de reforço em concreto asfáltico a ser aplicada. Com a realização desta intervenção, a vida de serviço do pavimento é reintegrada ao nível de trincamento a ser atingido no pavimento rodoviário, ou a vida de fadiga das camadas asfálticas, no pavimento aeroportuário. (RODRIGUES, 1991).

O procedimento tem como fundamento o modelo de fadiga de misturas betuminosas, obtida indiretamente, utilizando-se como parâmetro de referência a deflexão máxima prevista de estrutura proposta para uma determinada expectativa de vida de fadiga, no comportamento resiliente típico de solos finos e materiais granulares e o cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não linear (DNER, 1998).

Como nos outros métodos, a rodovia é dividida em segmentos homogêneos, considerando-se as condições de tráfego, subleito, deflexão recuperável, estrutura do pavimento e condições superficiais. O número “N” é calculado em função dos fatores de equivalência do USACE (United States Army Corps of Engineers), diferindo do PRO 159/85 que utiliza os da AASHTO e do antigo GEIPOT (Grupo de Estudos Integração da Política de Transportes, extinto em 2008). O método estima uma estrutura de referência, composta por três camadas, betuminosa, granular e subleito, que irá representar o trecho homogêneo em análise.

Além desses critérios, o método leva em consideração os parâmetros de espessura do revestimento existente, a deflexão característica, o trincamento, a espessura da camada granular e o tipo de subleito. O método classifica o material do subleito de acordo com o CBR apresentado e a porcentagem de silte (S%) na fração que passa na peneira nº 200, conforme tabela 2.3

Tabela 2.3– Classificação do solo do subleito quanto à porcentagem de silte na fração fina. (DNER-PRO 269/94).

CBR (%)	S (%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

A determinação da espessura efetiva do revestimento betuminoso (H_{EF}) é obtida através da seguinte expressão:

$$H_{EF} = -5,737 + 807,961 / D_c + 0,972.I_1 + 4,101.I_2$$

Equação 2.6

Onde :

H_{EF} → espessura efetiva, em cm;

D_c → deflexão característica;

I_1, I_2 → constantes relacionadas com as características da resiliência do subleito.

Vale ressaltar que os valores que devem ser utilizados para as constantes relacionadas com as características da resiliência do subleito seguem a seguinte metodologia:

- se a espessura da camada granular for inferior ou igual a 45 cm, deve-se utilizar os valores constantes da tabela 2.4, em função das características do subleito;

- Se a espessura da camada granular for superior a 45 cm, utilizar $l_1 = 0$ e $l_2 = 1$;

Tabela 2.4 – Constantes relacionadas com as características da resiliência do subleito. (DNER-PRO 269/94).

Solo Tipo	l_1	l_2
I	0	0
II	1	0
III	0	1

A deflexão de projeto característica, D_c , é dada pela expressão:

$$D_c = \bar{D} + s$$

Equação 2.7

Sendo:

$D_c \rightarrow$ deflexão de projeto, 0,01mm.

$\bar{D} \rightarrow$ média aritmética das deflexões de campo, 0,01mm.

$s \rightarrow$ desvio padrão, 0,01mm.

Determinado o H_{EF} , este deve estar compreendido no intervalo $0 \leq H_{EF} \leq H_E$, adotando-se;

- Se $H_{EF} < 0$ – $H_{EF} = 0$
- Se $H_{EF} > H_E$ – $H_{EF} = H_E$

Sendo;

$H_E \rightarrow$ espessura da camada betuminosa existente.

Determina-se o critério de fadiga através da equação 2.8;

$$\log \overline{\overline{D}} = 3,148 - 0,188 \cdot \log N_P$$

Equação 2.8

Onde:

$D \rightarrow$ deflexão máxima admissível.

$N_P \rightarrow$ número acumulativo de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf para o período de projeto.

Assim, calcula-se a espessura do reforço em concreto asfáltico através da equação 2.9;

$$HR = -19,015 + \frac{238,14}{\sqrt{\overline{\overline{D}}}} - 1,357H_{EF} + 1,016I_1 + 3,893I_2$$

Equação 2.9

Onde:

$HR \rightarrow$ espessura do reforço.

Em função da espessura de reforço calculado pode-se verificar a solução adequada de recapeamento conforme tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Relação de soluções de recapeamento em função da espessura do reforço (DNER-PRO 269/94).

Espessura do Reforço	Solução de Recapeamento
HR < 3	- lama asfáltica. - tratamento superficial.
3 < HR < 12,5	- subdivisão em camadas integradas de CBUQ e pré-misturado. - camada única de CBUQ (binder e capa).
12,5 < HR < 25	- utilização de camadas integradas dos tipos CBUQ e pré-misturado, sendo que da HR 60% será de pré-misturado e 40% será em concreto asfáltico.
HR > 25	- camadas não devem ser constituídas exclusivamente de misturas betuminosas. - verificação da necessidade de remoção do revestimento existente ou camadas com a reconstrução da estrutura do pavimento.

Para a determinação do módulo de resiliência efetivo do revestimento existente a norma preceitua a seguinte equação (DNER–PRO 269/94):

$$\log M_{ef} = 11,19 - 2,753 \log D_c - 1,714 \log h_e - 0,0053 I_1 + 0,2666 I_2$$

Equação 2.10

Onde:

$M_{ef} \rightarrow 1000 \text{ kgf/cm}^2$.

$D_c \rightarrow$ deflexão de projeto, 0,01mm.

$I_1, I_2 \rightarrow$ constantes relacionadas às características resilientes da terceira camada da estrutura de referência.

$h_e \rightarrow$ espessura da camada betuminosa existente.

$M_{ef} \rightarrow$ módulo de resiliência efetivo do pavimento existente, kgf/cm².

Faz-se o cálculo da relação modular, e a partir deste parâmetro determina-se a solução de recapeamento:

$$\mu = MR_C / M_{EF}$$

Equação 2.11

Sendo:

$\mu \rightarrow$ relação modular.

$MR_C \rightarrow$ módulo de resiliência da mistura reciclada.

$M_{EF} \rightarrow$ módulo de resiliência efetivo do revestimento existente.

Lembrando que:

- se $\mu = 1$, a restauração deve ser realizada sem reciclagem;
- se $\mu > 1$ deve-se realizar o cálculo da deflexão de projeto característica utilizando a equação 2.12.

$$\overline{D_C} = D_C \left[\frac{h_e}{h_c} \left(\mu^{\frac{1}{3}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1,324}$$

Equação 2.12

Sendo:

$D_C \rightarrow$ deflexão de projeto, 0,01mm.

$h_e \rightarrow$ espessura de camada betuminosa existente.

$H_C \rightarrow$ espessura de corte.

$\mu \rightarrow$ relação modular.

$\overline{D_C} \rightarrow$ deflexão de projeto característica do pavimento reciclado correspondente a espessura h_c , 0,01mm.

Vale ressaltar que para vários valores de alturas de corte deve-se avaliar a melhor solução de recapeamento segundo a tabela 2.6:

Tabela 2.6 – Procedimentos de solução de recapeamento de reforço de pavimento contemplando reciclagem (DNER-PRO 269/94).

$\overline{D_c} = \overline{D}$	- reciclagem com espessura de corte h_c constitui alternativa de solução;
$\overline{D_c} > \overline{D}$	- restauração mista. - Corte de espessura h_c. - Recapeamento de espessura HR.

2.5 Comentários

Neste capítulo foi apresentada a evolução histórica do dimensionamento de pavimentos, baseando-se na teoria elástica, e posteriormente com outras variáveis como o módulo de resiliência e fatores de correção, através do auxílio de programas computacionais para efetivação dos cálculos. A análise das tensões e deformações nas estruturas de pavimentos com múltiplas camadas com o uso do método dos elementos finitos e da teoria da elasticidade proporcionaram avanços em relação ao dimensionamento de pavimentos.

Contudo, a utilização de parâmetros e modelos de dimensionamento de forma isolada ainda é praticada e pode gerar valores de dimensionamento dispares em relação aos requeridos para as reais condições de campo.

Em relação às normas do DNIT (antigo DNER), o procedimento B (DNER – PRO – 011/79) incorpora, de forma simplificada, o cálculo do raio de curvatura, o que subestima a potencialidade da bacia de deflexões. É sabido que, conhecendo-se a bacia pode-se fazer uma retroanálise para que sejam encontrados os módulos das camadas de pavimento. O uso simplificado do raio de curvatura, simplifica o cálculo e desperdiça um conjunto de parâmetros bastante úteis para a avaliação estrutural por completa, que seria um incremento para o dimensionamento estrutural eficiente dentre tantas variáveis possíveis.

Seguindo-se a norma, a avaliação estrutural do pavimento e o cálculo do reforço são executados pelos critérios deflectométricos e da resistência. O cálculo da espessura do reforço em concreto asfáltico é efetuado em função da deflexão de projeto e da deflexão admissível. Na opinião de alguns técnicos, o DNER-PRO 011/79 tende a subdimensionar o reforço quando a espessura resultante é menor que 7,0 centímetros e tende a recomendar uma intervenção mais dispendiosa que a realmente necessário quando os reforços recomendados têm espessuras maiores que 10,0 centímetros. Contudo, de forma geral os métodos DNER-PRO 010/79 e DNER-PRO

011/79 fornecem resultados confiáveis para pavimentos em estado mau e péssimo e resultados exagerados para pavimentos em estado bom e regular.

O método DNER - PRO 269/94 também fornece espessuras razoáveis para pavimentos em mau ou péssimo estado, porém espessuras muito pequenas para pavimentos em estado regular. Já o método DNER-PRO 159/85, fornece resultados confiáveis apenas nos casos de pavimentos em estado regular, com deflexões características medianas e raio de curvatura elevado. Para pavimentos em estado mau ou péssimo, o método apresenta espessuras de recapeamento insuficientes, quando comparado a outros métodos.

Pode-se concluir que não existe um método universalmente aceito de restauração de pavimentos; Cada método deve ser utilizado apropriadamente. Sendo que os métodos supracitados devem ser aplicados sem prejuízo da análise e sensibilidade dos engenheiros especialistas, inclusive com vistorias em campo, embora a sensibilidade de cada profissional seja um aspecto subjetivo.

Quando o nível deflectométrico do pavimento começa a acelerar gradativamente, associado às falhas aparentes na superfície do pavimento, ocorre a fase de fadiga. Caso não sejam tomadas medidas para recuperação do pavimento em tempo hábil, a expansão do processo de degradação será marcante. O reconhecimento do “timing” da intervenção do pavimento é outro fator subjetivo, assim sendo todos os equívocos em relação aos processos de avaliação do pavimento precisam ser minimizados, uma vez que o limiar do período certo para a restauração estrutural já é um aspecto tênue por si só; Qualquer imprecisão adicional integrará a somatória de potenciais erros ao processo como um todo, bem como a conseqüente onerosidade nos custos da obra. Os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs) tem se mostrados importantes aliados na manutenção dos pavimentos.

Diversos autores questionam a validade de fatores e coeficientes adotados nos modelos de dimensionamento. Segundo ANDREATINI (1988), o valor atribuído para k (constante elástica) em reforços asfálticos, não parece provável que seja função

exclusivamente do material. SANTANA (1989) questionou outro método (DNER – PRO 159/85) pelo fato da amostragem que embasou a norma ser muito restrita para que fosse cravado um modelo de dimensionamento.

Diante destes pontos de subjetividade e imprecisão, ainda se somam outros agravantes. É prática comum que gestores de projetos ajustem os dados após os trabalhos dos engenheiros calculistas, por razões executivas e/ou financeiras da obra, por vezes embasando todo o projeto em *guide – lines* isolados, como por exemplo, dados de tráfego - não raro minorados - e/ou valores de deflexão recuperável máxima (d_0). Estes ou outros parâmetros levados em consideração isoladamente ou em substituição de um número maior de levantamentos não são suficientes para caracterizar a capacidade estrutural com precisão.

Não bastando estas imprecisões na parte de projetos, as obras ainda são submetidas aos riscos inerentes da execução da obra propriamente dita, seja por falta de acompanhamento e fiscalização, despreparo técnico da mão de obra e contratemplos não previstos, que resultam em cronogramas constantemente atrasados. Juntando-se estes aspectos é gerado um sério problema cultural, a negligência e falta de comprometimento em decorrência da avidez por lucro por parte de numerosas empreiteiras. O cenário se torna desolador do ponto de vista técnico.

É necessário que sejam adotadas boas práticas de engenharia, e que sejam desenvolvidas novas normas e modelos de procedimentos atualizados, de maneira a balizar todas estas imprecisões e subjetividades. A experiência da primeira década das concessões rodoviárias no Brasil demonstra que é possível obter lucratividade e bons resultados em projetos de pavimentação, seguindo-se as normas atualmente vigentes.

Este autor acredita que este cenário não deveria ficar restrito às concessões rodoviárias(setor privado) , é uma das formas de fazer frente à evolução tecnológica internacional de pavimentação seria com a elaboração de novas normas e especificações técnicas, alinhadas com a realidade de projeto e obra neste início de século.

3. ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS E EQUIPAMENTOS

Há tempos as medidas deflectométricas têm sido os meios para avaliação da condição estrutural de pavimentos. De acordo com ALBERNAZ et al. (1997), podem ser usadas na medição de bacias deflectométricas oriundas do carregamento do pavimento os seguintes ensaios e equipamentos: ensaios de placa, viga Benkelman convencional ou automatizada (Deflectógrafo Lacroix), Dynaflect ou Road Rater e equipamentos FWD (carregamento pela queda livre de um peso). Este último recentemente vem sendo utilizado com mais frequência, principalmente nas regiões sul e sudeste do país.

Existem diversos tipos de equipamentos para medidas de deflexões recuperáveis. Segundo MEDINA, MACÊDO & MOTTA et al. (1994), quanto à forma de aplicação da carga, há três classes de equipamentos utilizados na avaliação estrutural não-destrutiva, que são:

1. Equipamentos de carregamento estático e quase-estático: ensaio de placa, viga Benkelman, viga Benkelman automatizada, deflectógrafo Lacroix, entre outros;
2. Equipamentos de carregamento vibratório: Dynaflect, Road Rater, etc.,
3. Equipamentos de carregamento por impulso: Falling Weight Deflectometer (FWD).

De acordo com NÓBREGA (2003), alguns métodos alternativos têm surgido com a finalidade de se avaliar a capacidade estrutural dos pavimentos, como por exemplo, o Ground Penetration Radar e os equipamentos que usam ondas sísmicas em sua análise. Nestes equipamentos, são medidas a fase e velocidade de propagação de onda de tensões e deformações.

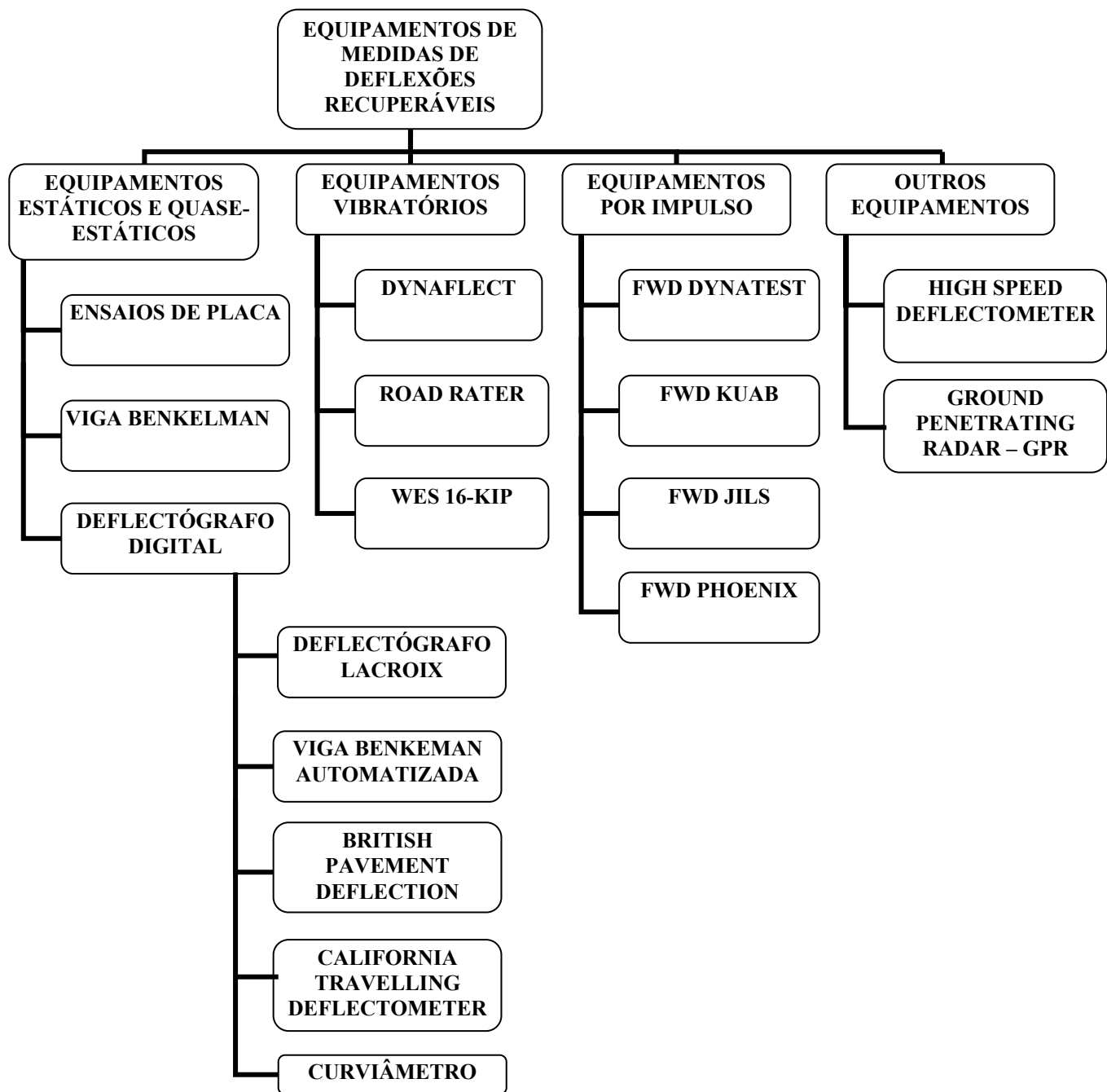


Figura 3.1: Organograma dos tipos de equipamentos de medidas de deflexões recuperáveis.

3.1 Equipamentos estáticos e quase – estáticos

De acordo com MOMM & DOMINGUES (1996), equipamentos estáticos medem a deflexão do pavimento sujeito à aplicação de uma carga estática ou que se desloca a velocidade muito baixa (quase estática). Segundo HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI et al., (1994), estão incluídos nesta classe os ensaios de placa, a viga Benkelman manual e automatizada.

3.1.1 Ensaio de Placa

Conforme ALBERNAZ (1997), o ensaio de placa (também denominado como prova de carga) é um dos primeiros métodos desenvolvidos para a medição de deflexões (figura 3.2).

Segundo NAGAO (2001), trata-se de um ensaio limitado, visto que os resultados obtidos através da aplicação de carga estática sobre o pavimento não traduzem a realidade, pois as rodas dos veículos em movimento produzem cargas dinâmicas. Neste equipamento, as medidas de deflexão não são tomadas sob o carregamento das rodas do veículo, ao contrário dos outros equipamentos quase-estáticos (HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI et al., 1994).

O carregamento é aplicado diretamente numa placa circular rígida de 30 polegadas (762 milímetros) por um macaco hidráulico, sobre a superfície do pavimento (PEREIRA et al., 2007). No entanto, este ensaio de placa corresponde ao procedimento necessário para a determinação do coeficiente de recalque k , utilizado para o dimensionamento de pavimento rígido de concreto, que é definido pela relação:

$$k = \frac{P}{\delta}$$

Equação 3.1

Onde:

$k \rightarrow$ coeficiente de recalque ($kgf/(cm^2 \times cm)$).

$P \rightarrow$ pressão unitária aplicada a uma placa circular rígida de 76,2 cm de diâmetro, necessária para produzir um recalque de 0,127 cm (kgf/cm^2).

$\delta \rightarrow$ recalque correspondente a 0,127 cm.

O coeficiente k é determinado a partir de resultados obtidos em provas de carga aplicadas sobre a camada desejada.

Os procedimentos para a execução das provas de carga e determinação do coeficiente de recalque k são realizados conforme estabelecem:

-DNIT ME-055 (2004) - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque do subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos;

-ASTM D1196-64 (1977) - Standard method for non repetitive static plate load tests of soils and flexible pavement components, for use in evaluation and design airport and highway pavements;

-ABCP ET-44 (1982) - Determinação do coeficiente de recalque k .

Para as provas de carga, utilizam-se:

- carreta com reação superior a 10 toneladas;
- macaco hidráulico de 15 toneladas de capacidade, provido de manômetro;
- placa de prova circular de aço com diâmetro igual a 76,2 centímetros;
- três deflectômetros graduados em centésimos de milímetro;
- dispositivo de suporte dos deflectômetros;

- areia para regularização da superfície (colchão);
- outras ferramentas: nível de pedreiro, trena de aço, 1 enxada, 1 alicate e conjunto de calços metálicos rígidos.

Este ensaio é necessário para a determinação da capacidade de suporte do subleito utilizado em pavimento rígido de CCP (Concreto de Cimento Portland). No entanto, diante do nível de dificuldade dos procedimentos e do tempo demandado, executam-se de 4 a 6 ensaios por dia de trabalho. Correlações deste parâmetro k com o valor de CBR do subleito foram efetuadas. Existem, também, correlações com o deslocamento vertical máximo recuperável medido com a viga Benkelman, visando à execução de whitetopping, que é a aplicação de uma camada de concreto de cimento Portland sobre a capa de pavimento asfáltico deteriorado.

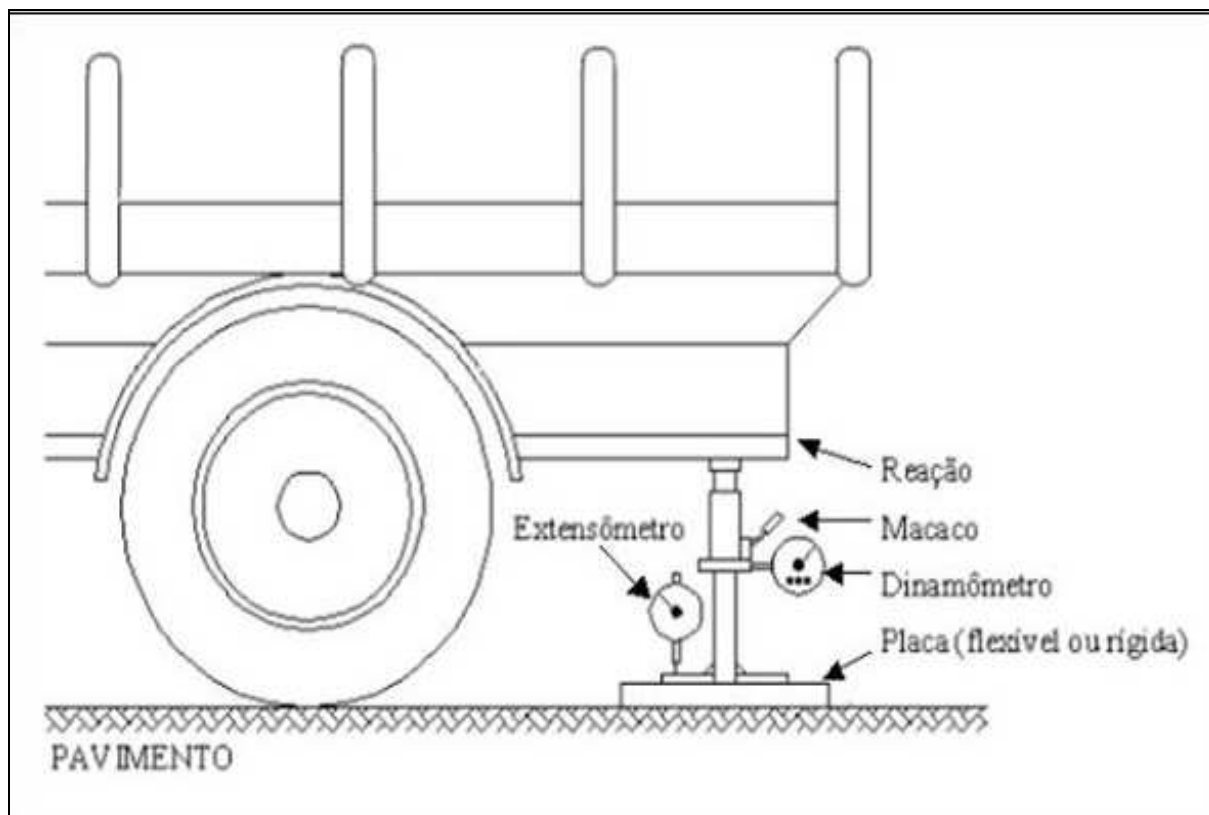


Figura 3.2 – Ensaio de placa. Fonte: adaptado da norma DNIT-ME 055/2004.

O ensaio de placa, em relação aos outros métodos, é considerado demorado, sendo necessária cerca de meia hora a 50 minutos por ponto realizado. Esta é uma das razões que torna este ensaio não usual nos procedimentos de avaliação de pavimentos (PEREIRA, 2007).

3.1.2 Viga Benkelman

A viga Benkelman (figura 3.3) foi desenvolvida na década de 1950, na *WASHO Road Test*, nos Estados Unidos, pelo Engenheiro Alvin Carlton Benkelman. O aparelho tem sido usado extensivamente desde então por órgãos rodoviários para trabalhos de pesquisa, avaliação e projeto de reforço de pavimentos em todo o mundo (HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI *et al.*, 1994).

ALBERNAZ (1997) cita que a necessidade de reduzir os custos e agilizar as avaliações dos pavimentos através das provas de carga foi o contexto que levou o demorado ensaio de placa a ser substituído por um procedimento mais rápido e simples. Assim sendo, a viga foi desenvolvida com a finalidade de medir deflexões no pavimento quando submetido ao carregamento estático dos próprios pneus do veículo de teste, o qual é um caminhão Eixo Simples Roda Dupla (ESRD) carregado.

Embora os equipamentos mais modernos tenham maior precisão e rapidez, considera-se que a viga Benkelman, pela sua simplicidade, baixo custo e larga divulgação no país ainda possa e deva ser usada, especialmente na versão automatizada (MEDINA , MACÊDO & MOTTA *et al.* 1994).

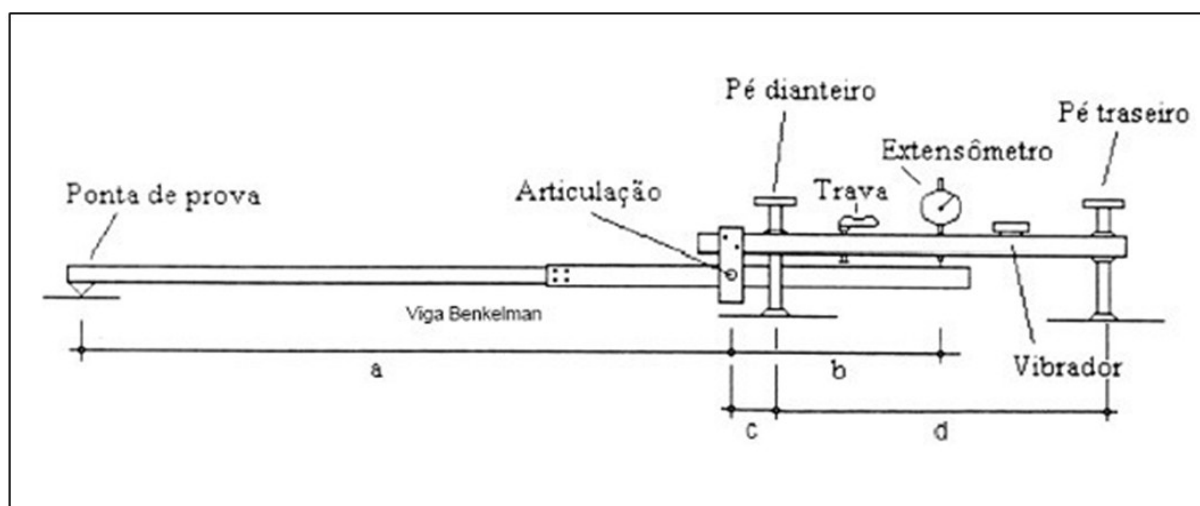


Figura 3.3 – Viga Benkelman. Fonte: adaptado da norma DNER – ME 024/94.

A viga Benkelman é formada por um conjunto de sustentação em que se articula uma haste metálica com uma ponta de prova em contato com o pavimento. A articulação divide a haste em partes proporcionais, sendo que a ponta de prova fica no braço maior da haste, entre as rodas do eixo simples de rodas duplas do caminhão-teste (figura 3.4) carregado com 8,2 toneladas de carga no eixo traseiro, simetricamente, distribuída em relação às rodas. Os pneus do caminhão devem estar calibrados à pressão de 80 P.S.I., o que equivale a 5,6 quilograma-força por centímetro quadrado. Um extensômetro com precisão de centésimos de milímetro é fixado na extremidade do braço menor da haste. Já com o caminhão-teste posicionado, é ativado um pequeno vibrador para acurar a medição do extensômetro, de acordo com procedimento normatizado do DNER (1994).

É realizada uma leitura inicial (L_0). Em seguida, o caminhão se desloca à frente em velocidade baixa e constante, onde são feitas as demais leituras nos pontos pré – estabelecidos (figura 3.5), até que o peso não influencie mais a viga (ALBERNAZ et al., 1997), momento em que deve ser realizada a leitura final (L_f), sendo este o método *Creep Speed Normal Deflection*. Quando o caminhão se desloca e pára em cada ponto de medição, realiza-se o método conhecido como *Creep Speed Rebound Deflection*, o mais usado no Brasil (ROCHA FILHO & RODRIGUES, 1996). Os mesmos autores ainda citam que embora seja um equipamento versátil e fácil de operar, o ensaio com a

viga é lento e trabalhoso, sendo que em alguns casos, particularmente em pavimentos com maior rigidez, os pés de suporte podem estar dentro da área de influência do carregamento, o que resulta em medidas imprecisas já que a viga foi projetada de maneira que a deformação não atinja nem os pés dianteiros nem a ponta de prova (BORGES, 2001).

As deflexões da viga são calculadas pelas expressões abaixo relacionadas:

$$D_i = (L_i - L_f) \times a/b$$

Equação 3.2

Onde:

$D_i \rightarrow$ deflexões intermediárias (correspondentes aos pontos pré-estabelecidos).

$L_i \rightarrow$ leitura inicial.

$L_f \rightarrow$ leitura final.

$a/b \rightarrow$ relação de braço da viga.

Para levar em conta o afundamento dos pés da viga principal, faz-se necessário o uso de uma segunda Viga Benkelman (HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI et al., 1994).

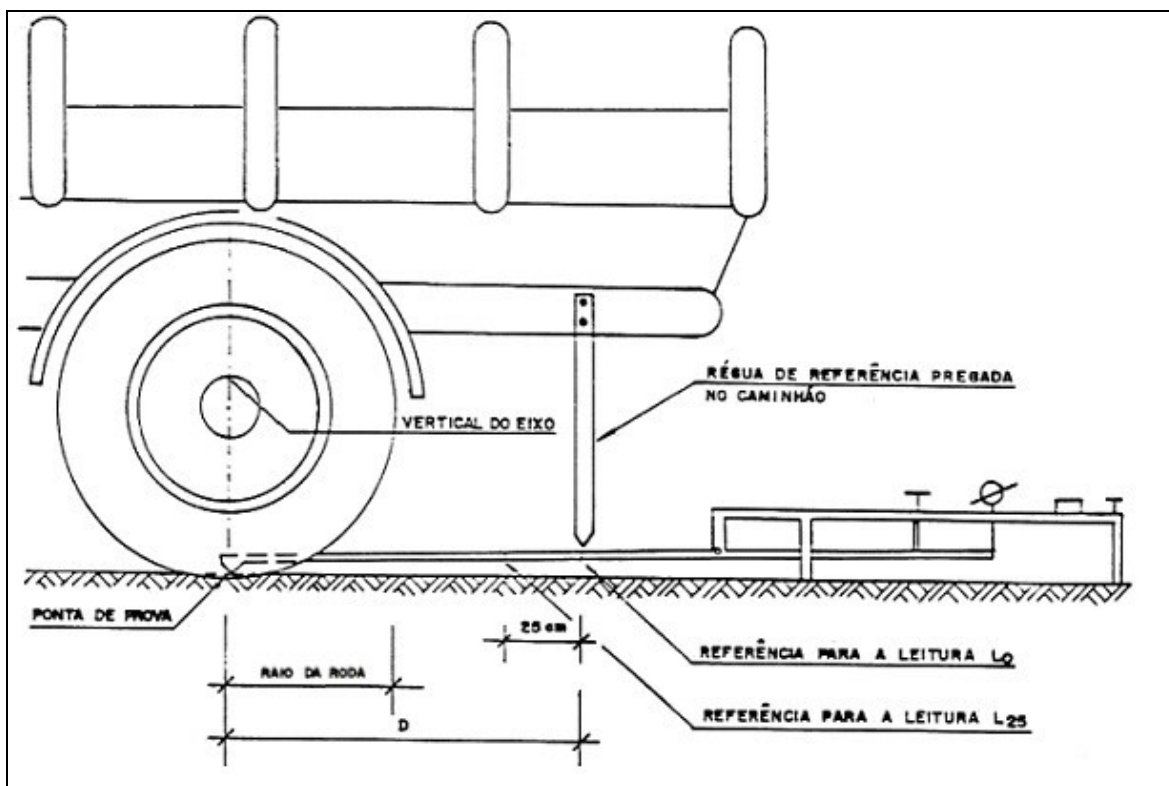


Figura 3.4 – Posicionamento da Viga Benkelman. Fonte: adaptado da norma DNER – ME 024/94.

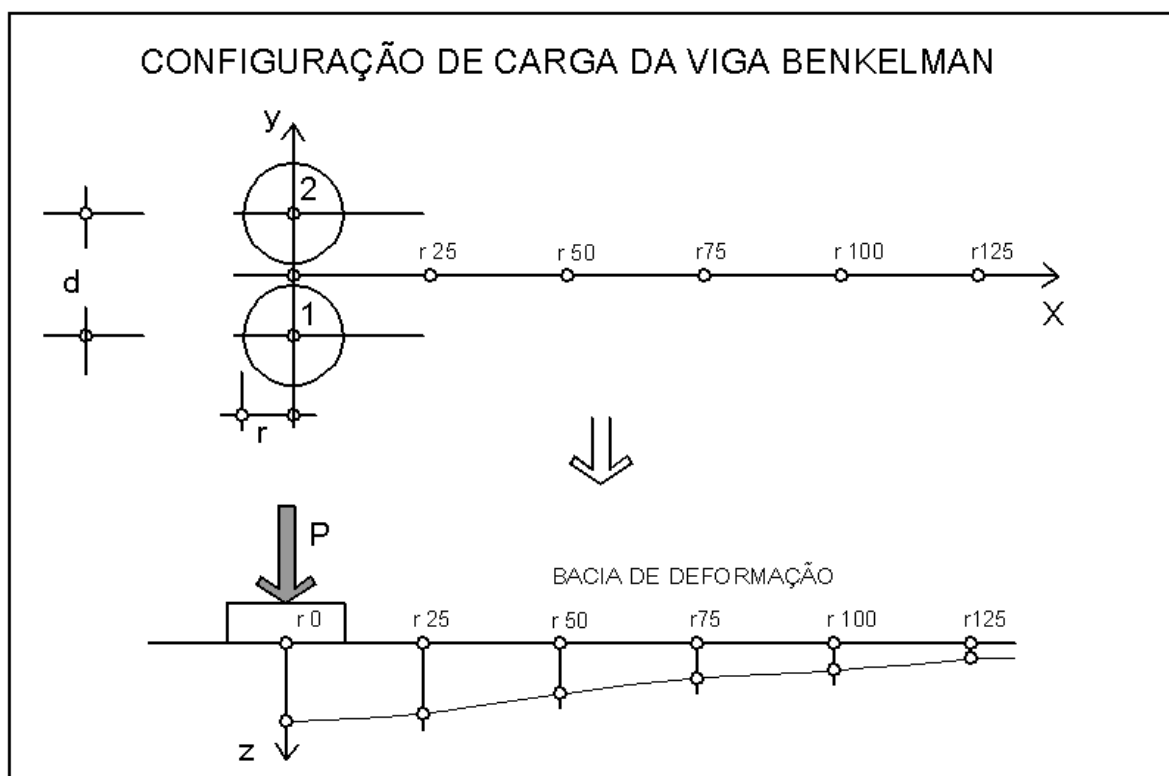


Figura 3.5 – Pontos de Avaliação da Viga Benkelman.

3.1.3 Deflectógrafos Digitais

Os deflectógrafos digitais são equipamento computadorizado, que utiliza sensores e realiza as medições automaticamente. A medição realizada pode ser visualizada instantaneamente, permitindo que sejam detectadas quaisquer anomalias de imediato. Segundo NÓBREGA et al. (2003) são exemplos deste tipo de equipamento:

- a. O Deflectógrafo Lacroix, desenvolvido na França;
- b. A Viga Benkelman Automatizada ou Deflectógrafo Digital Solotest, desenvolvido no Brasil;
- c. O British Pavement Deflection, desenvolvido no Reino Unido;
- d. O California Traveling Deflectometer, desenvolvido no Estados Unidos;
- e. O Curviâmetro, desenvolvido inicialmente na França e depois por toda Europa.

3.1.3.1 Deflectógrafo Lacroix

O Deflectógrafo Lacroix foi desenvolvido na França e popularmente difundido na Europa, trata-se de um equipamento do mesmo princípio da Viga Benkelman, por ser composto vigas metálicas associadas a um caminhão teste (figura 3.6). A melhoria em relação à Viga Benkelman é o processo automatizado de medição e o registro das deflexões através de sensores instalados nas vigas (LYTTON & SMITH et al. 1985). As vigas são posicionadas no pavimento próximo do eixo traseiro e o caminhão inicia a aproximação a uma velocidade baixa (3 quilômetros por hora). Após a passagem das

rodas, a estrutura se recolhe automaticamente e o procedimento é reiniciado em outro ponto de ensaio.



Figura 3.6 – Deflectógrafo Lacroix (acima e à esquerda) e viga em posição de ensaio (à direita) Fonte: site <http://www.cedex.es/cec>.

3.1.3.2 Viga Benkelman Automatizada – Deflectógrafo Digital Solotest

A Viga Benkelman automatizada se diferencia da Viga Benkelman comum devido a automação da medição e gravação das deflexões durante a condução do veículo teste (HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI *et al.* 1994). De acordo com GONÇALVES, CERATTI, RODRIGUES & SOMACAL *et al.* (2000), o uso de um equipamento automatizado (figura 3.7) possibilita leitura de deflexões com espaçamento de 5 centímetros, desde o ponto de aplicação da carga até os limites da bacia deflectométrica, bem como os registros de deslocamentos, da temperatura da superfície e da linha de influência longitudinal da bacia. O equipamento é acompanhado de softwares desenvolvidos com exclusividade para a operação deste deflectógrafo.



Figura 3.7 – Viga Benkelman automatizada. Fonte: acervo empresa Solotest.

BORGES (2001) opina que, dentre as principais vantagens deste equipamento, destacam-se a sensibilidade e precisão das medições, bem como o registro automático das deflexões e da distância radial da bacia deflectométrica.

Por utilizar o sensor do tipo LVDT (Linear Variability Deflection Transducers), que possui resolução de milésimo de milímetro, a sensibilidade das medidas efetuadas apresenta 98% de precisão.

3.1.3.3 British Pavement Deflection

O British Pavement Deflection segundo PEREIRA (2007), é um equipamento fabricado no Reino Unido que funciona segundo o mesmo princípio do Defletógrafo *Lacroix*, mas foi desenvolvido nos padrões britânicos (figura 3.8)



Figura 3.8 – Equipamento British Pavement Deflection. Fonte: KENNEDY & GARDINER, 1982.

3.1.3.4 California Travelling Deflectometer

O California Travelling Deflectometer é um equipamento norte-americano, também com o mesmo princípio de funcionamento Deflectógrafo *Lacroix*. Foi desenvolvido e construído pelo Departamento de Transportes da Califórnia (figura 3.9). De acordo com HAAS et al. (1994), as deflexões são medidas a intervalos de 6,22 metros com o veículo se movimentando a uma velocidade constante de 0,8 quilômetros por hora.

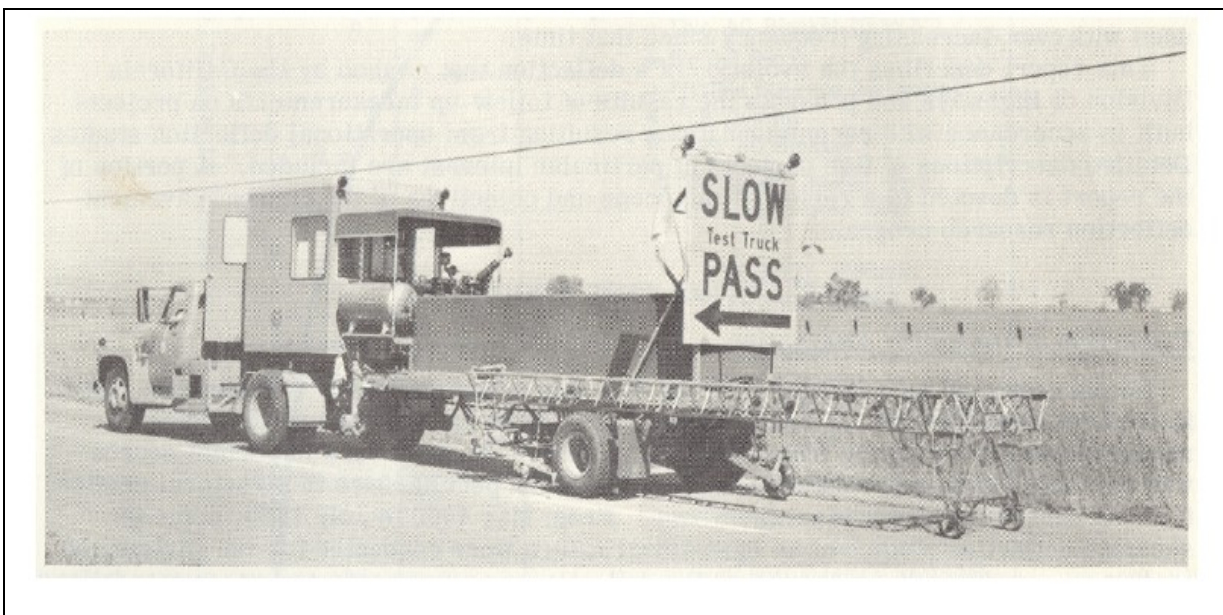


Figura 3.9 – Equipamento California Traveling Deflectograph. Fonte: ZUBE & FORSYTH, 1966.

3.1.3.5 Curviâmetro

O Curviâmetro, neste equipamento são medidas as deflexões em velocidade na ordem de 18 quilômetros por hora. Geofones são usados para que sejam medidas as acelerações verticais nos pontos da superfície do pavimento, entre as rodas duplas do veículo de teste (figura 3.10). Estas medições fornecem os valores da curvatura da

bacia deflectométrica, ou seja, o deflectograma. (HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI et al., 1994).



Figura 3.10 – Curviâmetro (acima e à esquerda) e corrente do Curviâmetro (à direita). Fonte: acervo Euroconsult.

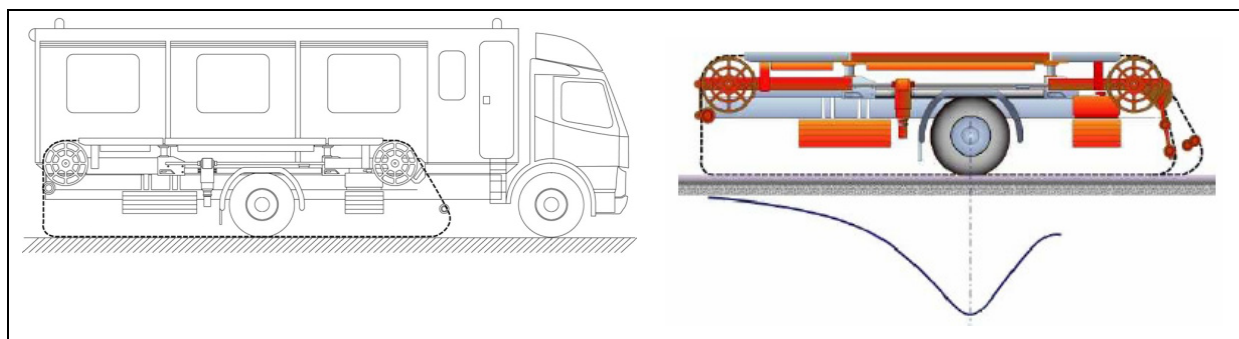


Figura 3.11 Esquema de funcionamento do Curviâmetro Fonte: acervo Euroconsult

3.2 Equipamentos de carregamento vibratório

Segundo HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI *et al.* (1994), os equipamentos de carregamento vibratório geram uma força senoidal (força dinâmica) superposta a um carregamento estático (figura 3.12), também denominados de vibradores. Os ensaios com estes equipamentos consistem na aplicação de uma carga no pavimento sob influência do vibrador, o que simula uma carga dinâmica na superfície do pavimento. A leitura do ensaio mede a magnitude da influência do pico da força dinâmica.

PEREIRA (2007) opina que este tipo de equipamento apresenta a vantagem de não requerer um ponto de referência como nos equipamentos estáticos e apresenta, como desvantagem, o fato das cargas reais aplicadas aos pavimentos não estarem em um estado invariável de magnitude e vibração. São exemplos destes equipamentos o Dynaflect, o Road Rater e o WES 16-kip.

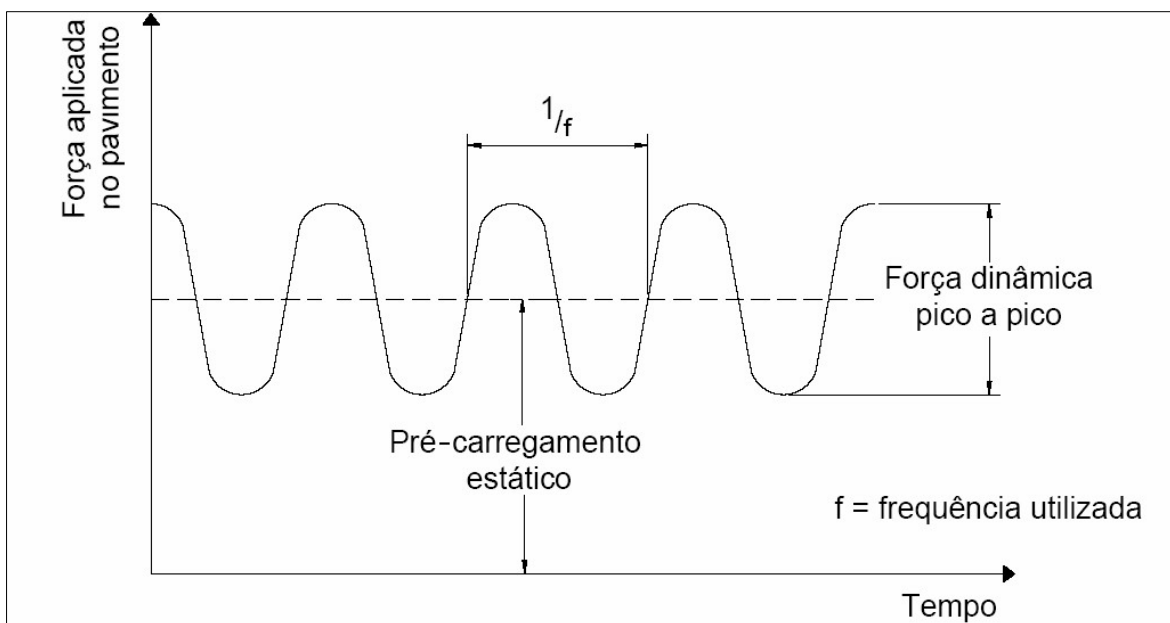


Figura 3.12 – Gráfico típico da força dinâmica resultante em equipamentos de carregamento vibratório. Fonte: adaptado de HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI, 1994.

3.2.1 Dynaflect

De acordo com HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI *et al.* (1994) o Dynaflect é um aparelho que realiza medições de deflexão do pavimento em cinco pontos, através de um vibrador com ciclos de frequência e amplitude conhecidas. As aplicações de carga no pavimento ocorrem por duas rodas de aço, em um sistema com sensores regulados por um módulo de calibração. Este sistema fica em um reboque do veículo teste, que está ligado com a unidade de controle e um painel de leitura na cabine do veículo teste, permitindo que sejam realizadas medições rápidas e precisas de deflexões na superfície do pavimento.

O procedimento de ensaio com o Dynaflect se inicia com a aplicação de uma carga estática de 907 a 925 quilogramas - força sobre a superfície do pavimento, através de um par de rodas rígidas de aço coberto por borracha de 10,6 centímetros de largura e 40,6 centímetros de diâmetro externo, com 50,8 centímetros de espaçamento entre estas rodas. Após este pré-carregamento, passa-se a transmitir uma carga vibratória constante e igual a 454 quilograma-força gerada por um sistema de massas desbalanceadas, efetuando um movimento vertical oscilatório (figura 3.14) com amplitude de 127×10^{-6} metros e frequência de 8 Hertz.

Depois da Viga Benkelman, o Dynaflect desenvolvido no Texas em 1965 é o equipamento mais utilizado nos Estados Unidos (figura 3.13 e 3.15). Foi o primeiro aparelho disponível comercialmente a utilizar o modo dinâmico de carregamento (BORGES, 2001).

As deformações verticais são registradas mediante informações de cinco geofones (sensores de ondas sísmicas) instalados em uma barra perpendicular ao eixo do veículo, sendo um deles instalado no eixo das rodas de aplicação da carga e os outros na mesma direção, a cada trinta centímetros de espaçamento. As leituras são efetuadas a 0, 30, 60, 90 e 120 centímetros, sendo que este espaçamento pode ser modificado dependendo das necessidades do ensaio a ser realizado. O método de

ensaio está estabelecido em norma no Brasil, pelo DNER em seu ME 39/94 - Determinação das deflexões no pavimento pelo Dynaflect.

LYTTON & SMITH (1985) citam as principais limitações técnicas deste equipamento:

- Um pré-carregamento estático em cada estação de ensaio é necessário, com valor superior a duas vezes o valor da carga que será utilizada no ensaio;
- O carregamento aplicado ao pavimento é de baixa magnitude;
- A frequência e carga não podem ser variados;
- Não é possível que seja registrada a deflexão diretamente sob o ponto de aplicação da carga, ou seja, sob as rodas de aço.

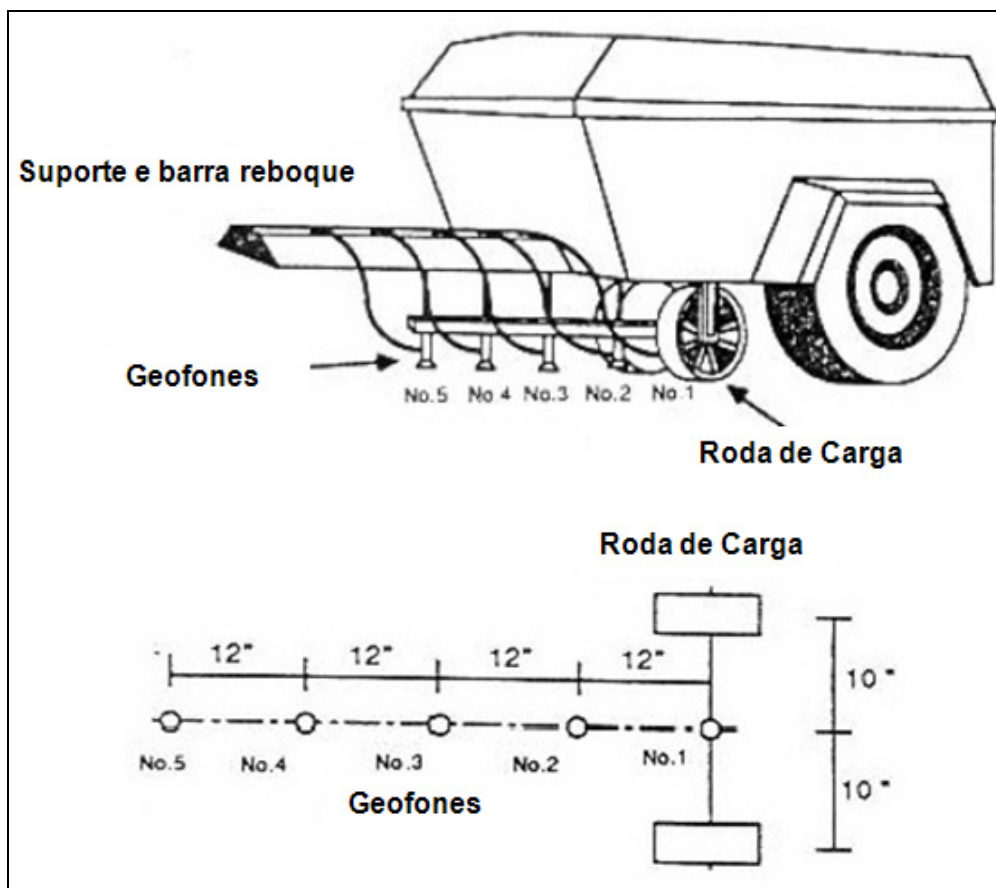


Figura 3.13 Esquema representativo do Dynaflect. Fonte: adaptado de Haas et al., 1994.

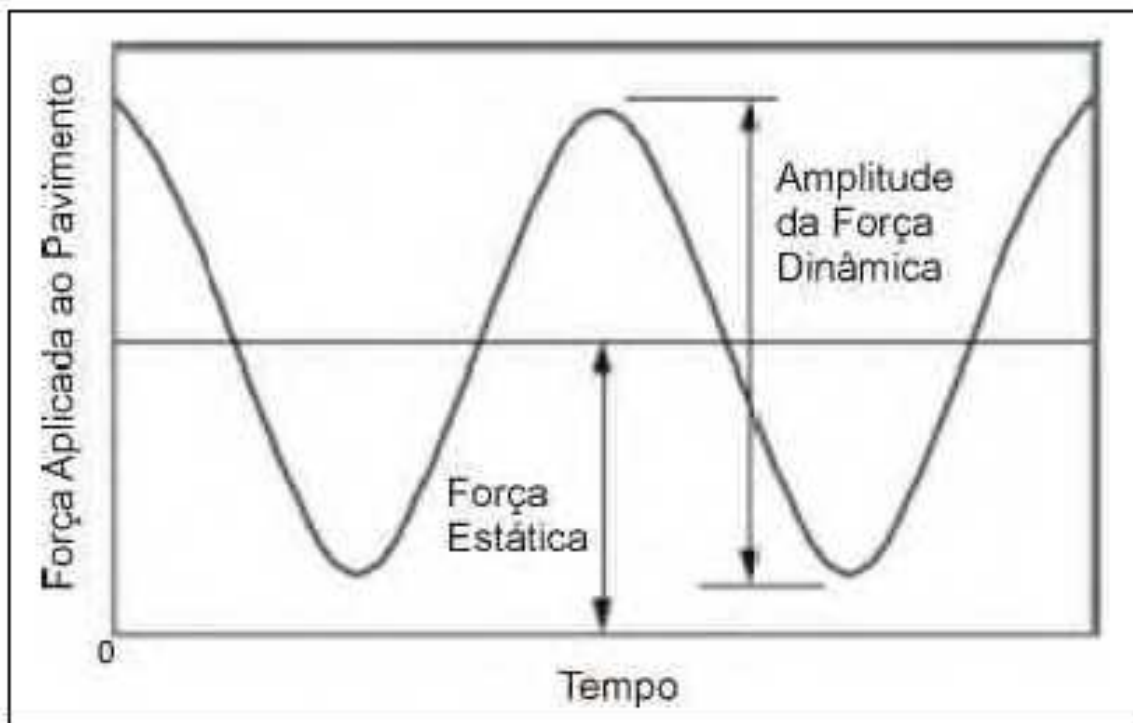


Figura 3.14 Gráfico de Força do Dynaflect. Fonte: adaptado de Haas et al., 1994



Figura 3.15 Equipamento Dynaflect. Fonte: acervo WSDOT.

3.2.2 Road Rater

De acordo com HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI et al. (1994), o Road Rater é um equipamento vibratório onde os valores de magnitude e frequência do carregamento podem ser variados. O carregamento dinâmico é gerado com o aumento ou redução da massa, através de um sistema eletro-hidráulico que desenvolve a aceleração de uma massa alternadamente acima e abaixo de um ponto médio (figura 3.16).

O Road Rater foi o segundo aparelho disponível comercialmente a utilizar o modo dinâmico de carregamento (figura 3.16). O equipamento é montado em um veículo do tipo furgão, onde estão instalados o sistema de carregamento e quatro transdutores são utilizados para medição de deflexão no pavimento: sendo, um no centro da placa de carga e três localizados ao longo do sentido longitudinal da rodovia, distando cerca de 30 centímetros um do outro.

As vantagens deste equipamento são:

- Há modelos que aplicam cargas elevadas ao pavimento;
- Possibilidade de variação do carregamento aplicado ao pavimento, dentro da faixa de cargas disponíveis em cada modelo;
- Permite que seja registrada a deflexão máxima sob o ponto de aplicação da carga.

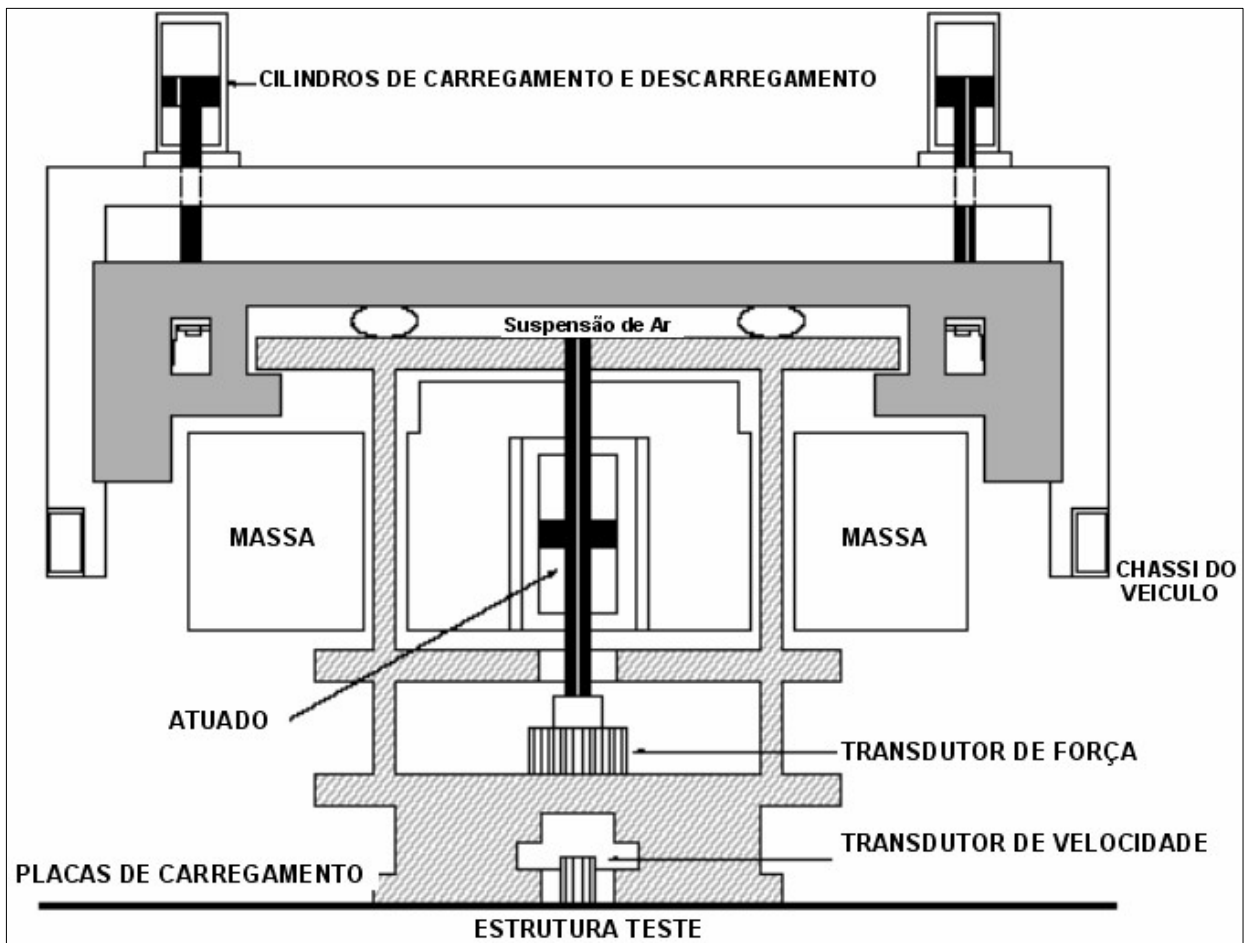


Figura 3.16 Esquema representativo Road Rater. Fonte: adaptado de Haas et al., 1994.

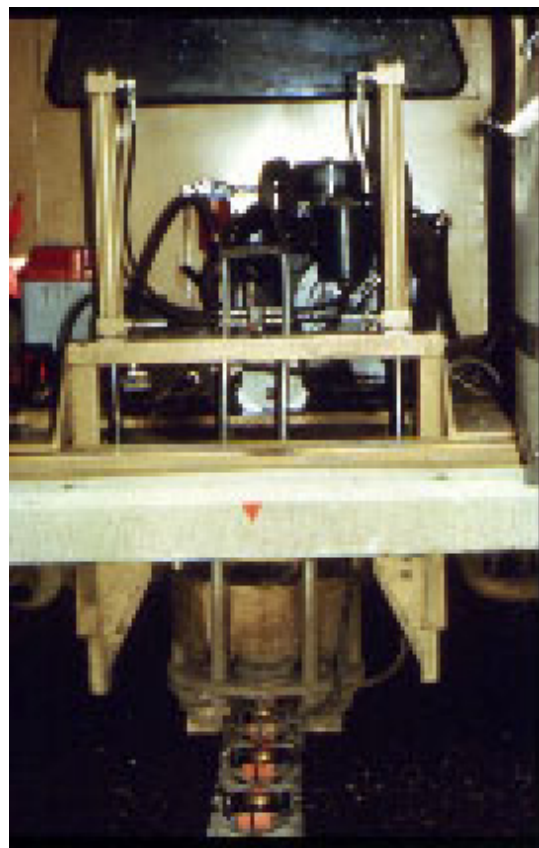
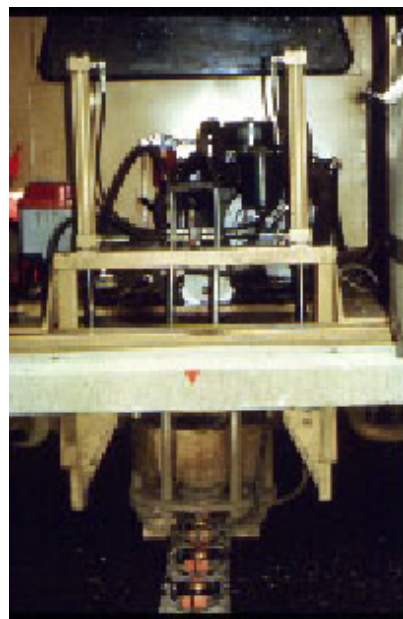


Figura 3.17 – Equipamento Road Rater. Fonte: acervo WSDOT.

3.2.3 WES 16-kip Vibrator

O WES 16-kip Vibrator foi concebido inicialmente para ser um equipamento de avaliação de pavimentos aeroportuários, o WES 16-kip foi desenvolvido e construído pelo U. S. Army Waterways Experiment Station (WES).

O equipamento é montado em um caminhão com compartimento de carga de 11 metros de comprimento, onde estão instalados o sistema de vibração e os sensores de deflexão, que são posicionados simetricamente no mesmo alinhamento do centro de aplicação da carga. Três células de carga identificam e medem o carregamento (figura 3.18).

É necessário um pré-carregamento de 7265 quilogramas-força. As cargas dinâmicas situam-se ao redor de 13.620 quilogramas-força, sob aplicação de 5 a 100 Hertz de vibração.

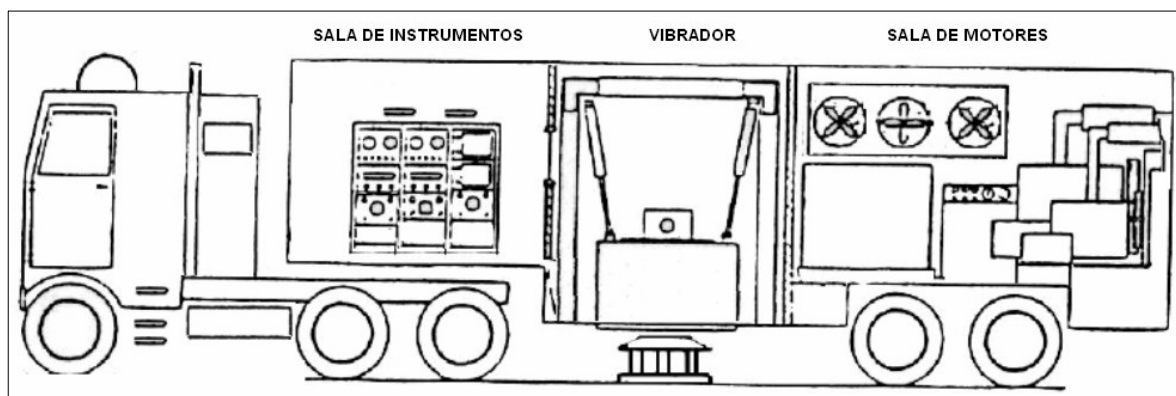


Figura 3.18 – Ilustração do WES 16-kip. Fonte: adaptado Epps, Monismith, 1986.

3.3 Equipamentos de Carregamento Dinâmico Transiente (Por Impulso)

Estes equipamentos aplicam uma força transiente ao pavimento pelo impacto causado pela queda de um conjunto de massas de uma altura determinada sobre sistema de amortecedor de borracha associado a uma placa circular de trinta centímetros de diâmetro que transmite a força ao pavimento (ROCHA FILHO et al. 1996). Medem-se as deflexões máximas segundo um alinhamento que passa pelo centro da placa através de sensores (Geofones ou LVDTs - Linear Variability Deflection Transducers). A categoria dos deflectômetros de impacto compreende os equipamentos de medidas de deflexão que empregam um sistema de massa que colide em uma placa amortecida, estes deflectômetros são tipicamente conhecidos como *Falling Weight Deflectometer* -FWD (BORGES et al, 2001).

O FWD é um equipamento projetado para simular no pavimento o efeito produzido por uma carga de roda em movimento. Basicamente, a simulação da carga aplicada por um veículo trafegando sobre o pavimento é realizada pela queda de um conjunto de massas, a partir de uma altura com diferentes configurações possíveis (de altura e massas), podendo simular diferentes tipos de eixos (MACEDO, 1996).

A carga aplicada é medida através de uma célula de carga e tem duração de 25 a 33 milissegundos (figura 3.19), tempo correspondente ao da passagem de um veículo com velocidade de 60 a 80 km/h. O funcionamento do FWD consiste na aplicação de 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 por sete sensores, dispostos um no centro da placa e outros em distâncias pré-definidas, ao longo de uma barra metálica de até 4,5 metros de comprimento, com o uso de diferentes composições de massa e alturas de queda ajustáveis, de forma a simular os efeitos de diversos eixos rodoviários ou de eixos aeroportuários (MACEDO et al., 1996).

O veículo de teste do FWD conta com um computador que, além da distância percorrida mensurada por um odômetro de precisão, simultaneamente armazena as

deflexões medidas, temperatura da superfície do revestimento, temperatura do ar, altura de queda, massa e rigidez do pavimento. (CARDOSO, 1995). Estas variáveis são indispensáveis para que seja assegurada a distinção do nível de carga real do nível de carga nominal (MACEDO et al., 1996). Segundo RICCI et. al. 1985 apud MACÊDO 1996, o nível de carga real é medido pela carga em função das variáveis supracitadas, enquanto o nível de carga nominal é obtido pela equação:

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

Equação 3.3

Onde:

F → Força de pico ou carga nominal

M → Massa do peso em queda

g → Aceleração da gravidade

h → Altura do conjunto de peso

k → Constante elástica do sistema de borracha

Segundo PEREIRA et al. (2007), a força transitória de impulso criada pelo FWD em pavimentos aproxima-se mais das situações reais de cargas móveis do que as desenvolvidas pelos equipamentos estáticos e vibratórios. Desenvolvidos na Europa, estes equipamentos tornaram-se populares nos Estados Unidos a partir de meados da década de 80 no estudo de Long Term Pavement Performance (LTPP) dentro do Strategic Highway Research Program (SHRP). Os equipamentos FWD existentes no mercado são: Dynatest (fabricado na Dinamarca e aperfeiçoado nos Estados Unidos), Phoenix (Dinamarca), Kuab (Suécia) e Nagaoka Kuab (Japão).

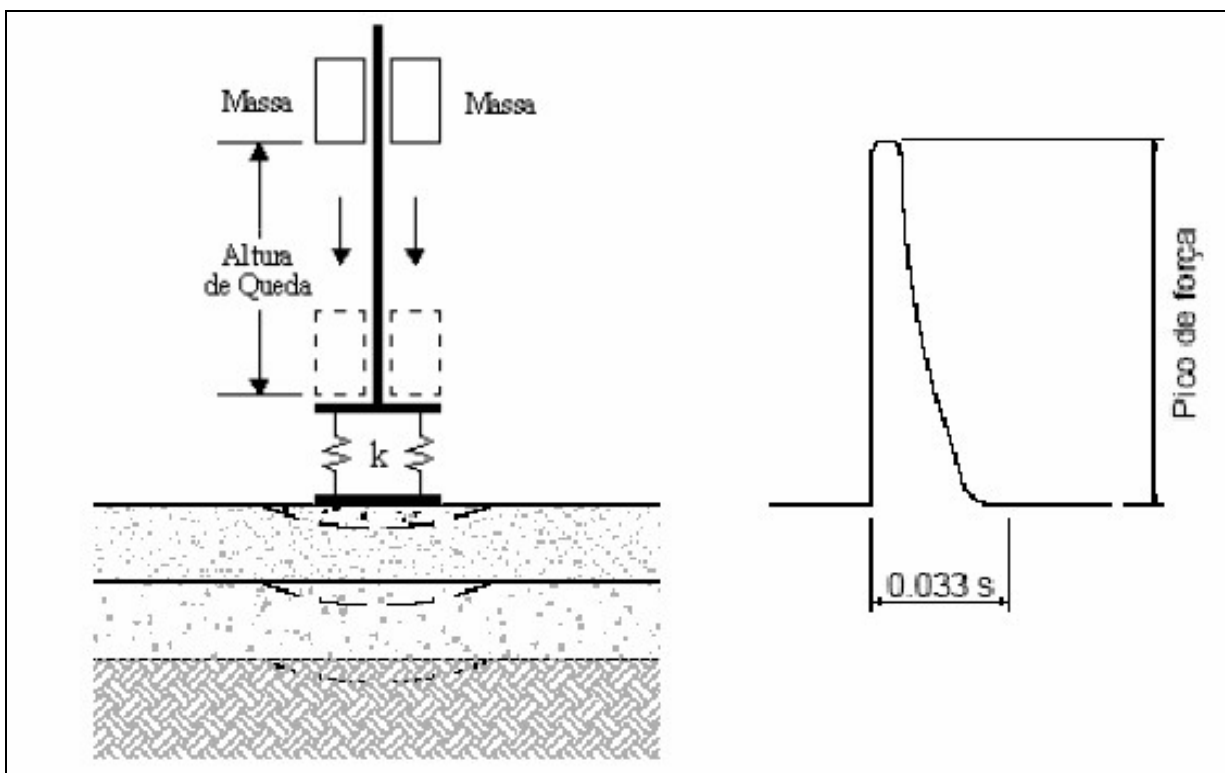


Figura 3.19 – Princípio de Funcionamento do FWD. Fonte: adaptado de HAAS et al. 1994.

Em comparação com a Viga Benkelman, o FWD possui maior acurácia nas deflexões medidas, com pouca dispersão das mesmas. Ainda, possui registro automático de temperaturas do ar e da superfície do pavimento, da distância percorrida e existe possibilidade de variação dos níveis de carga aplicados sobre um mesmo ponto, sendo que a viga Benkelman possui nível de carga único. Os ensaios com o FWD são realizados com mais rapidez e facilidade de operação sob as condições de tráfego, as quais são muito mais impactadas com a ocupação de via de tráfego pelo ensaio da viga Benkelman (PINTO & PREUSSLER et al. 2002).

Segundo HOFFMAN & THOMPSON (1982), as deflexões produzidas pelos equipamentos por impulso, são as que mais se aproximam dos deslocamentos verticais do pavimento produzidos por um caminhão carregado em movimento, medidas a partir de acelerômetros instalados no pavimento.

Além dos aspectos mencionados, a partir de um levantamento com o equipamento FWD podem ser obtidos parâmetros para um eficiente controle de qualidade de serviços de pavimentação, por meio de controles defletoométricos para avaliar o grau de atendimento da estrutura aos valores especificados antes da liberação ao tráfego, bem como a implantação de sistemas de gerência de pavimentos em nível de rede, permitindo assim identificar às condições do pavimento no que diz respeito à sua vida útil e obtendo-se a otimização técnica e econômica das alternativas de restauração (PINTO & PREUSSLER et al. 2001).

Ainda Segundo THOLEN, SHARMA & TERREL et. al. (1985), todos os equipamentos FWD comercialmente disponíveis possuem o mesmo princípio de funcionamento, mas com três diferenças importantes:

- forma de geração de carga impulsiva (quantidade de massas em queda);
- forma de distribuir a carga à superfície do pavimento (placa circular fixa ou articulada);
- tipo de transdutor utilizado para medir as deflexões (geofones, LVDTs, acelerômetros).

3.3.1 FWD Dynatest

O equipamento FWD Dynatest (figuras 3.20 e 3.21) foi idealizado na Dinamarca e aperfeiçoado posteriormente nos Estados Unidos. Para este equipamento a força de ensaio ao pavimento pode ser ajustada entre 7 quilonewtons e 111 quilonewtons e a deformação superficial do pavimento é captada por 7 geofones (figura 3.22), sendo um deles instalado na placa de carga e os demais distribuídos em uma barra metálica de 2,25 metros (MACEDO, 1996).



Figura 3.20 – Equipamento Dynatest FWD. Fonte: site <http://www.dynatest.com/>.



Figura 3.21 – Vista inferior do Deflectógrafo. Fonte: <http://www.dynatest.com/>.



Figura 3.22 – Sensores tipo geofones de medição da deflexão. Fonte: WSDOT.

O equipamento permite a medida e o registro automático das bacias de deformações (figura 3.23) geradas por diferentes níveis de cargas, temperatura do ar e da superfície do pavimento e as distâncias percorridas.

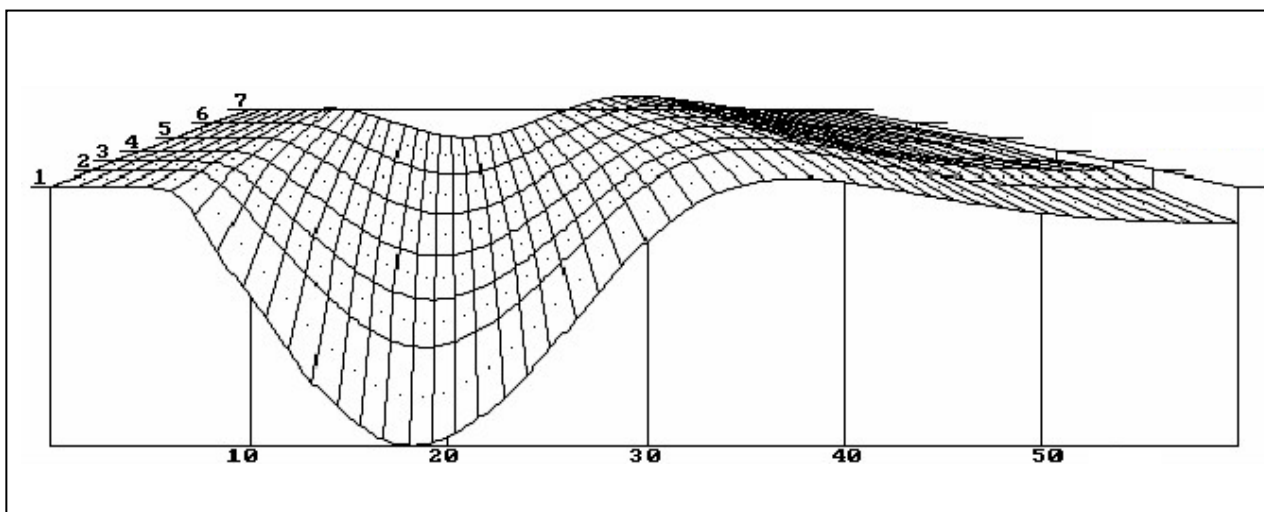


Figura 3.23 – Gráfico da bacia de deflexão com o FWD. Fonte: adaptado de MACEDO, 1996.

3.3.2 FWD Kuab

O equipamento FWD Kuab foi concebido pela empresa sueca Konsult & Utveckling AB (figuras 3.25 e 3.26). Neste equipamento a força de impulso é gerada por um sistema duplo de carga, sendo ajustável na massa e na altura de queda. A amplitude da força criada pode variar de 1.223 a 15.875 quilogramas. A carga é transferida por uma placa circular segmentada de 30 centímetros de diâmetro e as medidas lidas por cinco transdutores de deflexão (sismógrafos). O sistema duplo de cargas (massas 1 e 2 da Figura 3.24) cria um pulso de carga mais longo do que os outros equipamentos FWD, representando melhor a duração de tensões criada por caminhões. A placa circular segmentada possibilita melhor uniformização na distribuição de carregamento no pavimento (ROCHA FILHO & RODRIGUES, 1996).

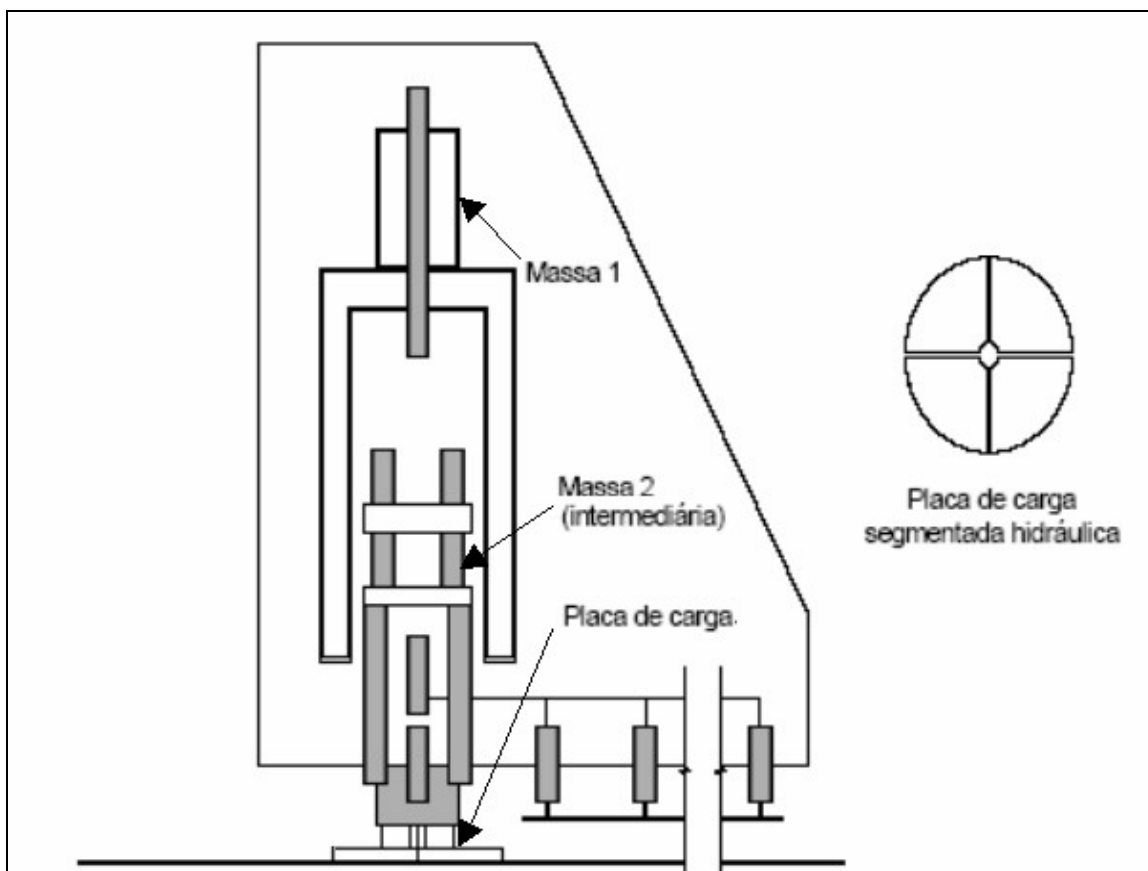


Figura 3.24 – Diagrama esquemático Kuab FWD. Fonte: HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI 1994.



Figura 3.25 – Equipamento Kuab FWD. Fonte: site <http://www.ssc.sk/user/>.



Figura 3.26 – Vista interna do Kuab FWD. Fonte: site <http://www.ssc.sk/user/>.

Além dos sensores, as principais diferenças, entre os deflectômetros FWD Dynatest e FWD Kuab, são em relação à placa de aplicação do carregamento e ao número de pesos usados para simular a ação do tráfego. Enquanto o modelo da Dynatest possui uma placa rígida e um conjunto de massa, o modelo KUAB possui placa segmentada em quatro partes unidas por êmbolos e dois conjuntos de massas (NÓBREGA et al., 2003).

3.3.3 FWD Jils

O FWD Jils é produzido pela empresa norte-americana Foundation Mechanics, Inc.. A empresa comercializa, entre outros produtos, equipamentos de ensaios de pavimentos aeroportuários (figura 3.27) e equipamentos FWD associados com GPR (Ground Penetration Radar) (figura 3.29), de forma a fornecer um espectro da estrutura rodoviária, assim avaliando melhor o processamento dos dados deflectométricos com os diversos tipos de estruturas, detectando-se os locais de transição da estrutura de pavimentação e assim resultando em um projeto compatibilizado com as estruturas existentes com menor necessidade de ensaios destrutivos.

Algumas versões do equipamento FWD deste fabricante possibilitam a execução do ensaio pelo próprio motorista do veículo de teste, instalando-se o equipamento Jils FWD embutidas em veículos utilitários, conforme demonstrado na (figura 3.28). Além deste aspecto, o veículo com as instalações do FWD possui manobrabilidade superior ao equipamento instalado no reboque, o que resulta em vantagens operacionais.



Figura 3.27 – Equipamento FWD para ensaios em pavimentos aeroportuários. Fonte: site <http://www.jilsfwd.com/>.



Figura 3.28 –FWD Jils instalado na plataforma de veículo utilitário. Fonte: site [http:// www.jilsfwd.com/](http://www.jilsfwd.com/).



Figura 3.29 – Veículo-teste equipado com FWD e GPR (à frente do veículo). Fonte: site [http:// www.jilsfwd.com/](http://www.jilsfwd.com/).

3.3.4 FWD Phoenix

O Phoenix FWD, originário da Dinamarca, pertence aos equipamentos de aplicação de carga por impulso, sendo uma versão primitiva dos deflectômetros comercialmente disponíveis na Europa e nos Estados Unidos (figuras 3.30 e 3.31).



Figura 3.30 – Equipamento Phoenix FWD. Fonte: Dynatest A/S PHOENIX 1965.



Figura 3.31 – Detalhe dos Sensores do Phoenix FWD. Fonte: Dynatest A/S PHOENIX 1981.

3.3.5 FWD Thumper

Não disponível comercialmente, o Federal Highway Administration (FHWA) possui o Thumper (figura 3.32), considerado como um aparelho de sofisticada tecnologia para sua época início da década de 80, sendo classificado como um equipamento multimodo para sua época.



Figura 3.32 – Equipamento FWD Thumper. Fonte: acervo FHWA 1984.

Dentre os equipamentos de carregamento dinâmico transiente por impulso citados, o portfólio de produtos dos fabricantes Kuab e Dynatest são os mais difundidos atualmente pelas empresas de avaliações técnicas e engenharia consultiva na área de pavimentação (MEDINA , MACÊDO & MOTTA et al. 1994). A tabela 3.1 demonstra as principais características entre estes equipamentos:

Tabela 3.1 - Características dos equipamentos FWD mais difundidos (adaptado de MEDINA , MACÊDO & MOTTA et al. 1994).

CARACTERÍSTICAS	DYNATEST	JILS	KUAB
Montagem	trailer aberto	Caminhonete	trailer fechado
Pulso de Carga	queda de 1(um) conjunto de massas	queda de 1(um) conjunto de massas	queda de (2) dois conjuntos de massas
Tempo de duração do pulso	30 ms	24 ms	34 a 50 ms
Amortecimento	colchões de borracha	colchões de borracha	colchões de borracha
Placa rígida de carga	uma com 30 cm de diâmetro e outra com 45 cm	placa sólida com 30,5	placa segmentada em 4 partes unidas por êmbolos
Ajuste a superfície do pavimento	inclinação da placa até 6° em relação a horizontal	placa rígida a 90° em relação a superfície	Segmentação da placa
Força aplicada	7 kN a 111 kN	14 kN a 93 kN	14 kN a 150 kN
Medida de deflexão	7 geofones	9 geofones	7 sismômetros
Deflexão máxima	2 mm	2 mm	5 mm
Registro de temperatura	Sim	Sim	Sim
Registro de carga	Sim	Sim	Sim
Controle de ensaio	automático	automático	automático
Pontos ensaiados por dia	500 a 700	500 a 700	500 a 700

3.4 Outros Equipamentos

3.4.1 High Speed Deflectometer (Deflectómetro de Alta Velocidade)

Iniciaram – se na década de 90 vários estudos em diversos países tencionando o desenvolvimento de equipamento que proporcione a medição da capacidade estrutural de um pavimento a uma velocidade de tráfego. Com o incremento nos volumes de tráfego nas rodovias, a execução de ensaios com equipamentos estacionários fica mais difícil operacionalmente a cada dia, inclusive em questões relacionadas à segurança dos técnicos que operam o equipamento e dos usuários das rodovias (FORMAT, 2004).

Conceberam-se a partir destas pesquisas os Deflectómetros de Alta Velocidade, chamados de High Speed Deflectometers, e esta modalidade de equipamento está em desenvolvimento em países como os Estados Unidos da América, a Suécia e a Dinamarca. O protótipo americano é o Rolling Wheel Deflectometer (RWD), o protótipo sueco é o Road Deflection Tester (RDT), enquanto que o protótipo em desenvolvimento na Dinamarca é o High Speed Deflectograph (HSD) figura 3.35. Todos estes equipamentos utilizam sensores a laser e efetuam medições de deflexão à velocidade de tráfego aproximadamente de 80 km/h. (FORMAT, 2004).

O RWD (ver Figura 3.33) e o RDT (ver Figura 3.34), utilizam sensores a laser de medição da distância que determinam as deflexões com base na diferença entre o perfil do pavimento sujeito à ação da carga aplicada pelas rodas e o perfil do pavimento quando não está sujeito à aplicação de cargas (FORMAT, 2004).



Figura 3.33 - Equipamento americano RWD (acima) barra com sensor (à esquerda) e sensor laser posicionado entre as duas rodas (à direita) Fonte: Format, 2004.

Desenvolvido entre 1996 e 2001, o HSD (Figura 3.35) tem um princípio de medição diferente do descrito para os equipamentos RWD e RDT. Neste equipamento dois sensores laser montados na parte frontal na roda de carga medem a velocidade vertical da superfície do pavimento resultantes da aplicação da carga do eixo traseiro do veículo (FORMAT, 2004). Este equipamento foi desenvolvido a partir da segunda metade da década de 1990 para o Instituto Rodoviário Dinamarquês, sendo que o protótipo se mostrou muito promissor, com os resultados dos testes apresentando boa concordância na comparação entre o High Speed Deflectograph e o Falling- Weight- Deflectometer (DANISH ROAD INSTITUTE, 2002).



Figura 3.34 – Equipamento sueco RDT- Road Deflection Tester Fonte: Format, 2004.

O defléctógrafo de alta velocidade tem se mostrado bastante promissor. Os resultados de seus testes têm razoável concordância na comparação com os resultados dos ensaios realizados com equipamento tipo FWD. Pelo fato de ter produtividade bastante superior ao FWD, com velocidade de operação de até 95 km/h. O Instituto Rodoviário Dinamarquês permanece estudando os protótipos do equipamento para que seja comercialmente viável em toda a engenharia mundial (DANISH ROAD INSTITUTE, 2002).



Figura 3.35 Equipamento Dinamarquês HSD-High Speed Deflectograph Fonte: Format, 2004.

3.4.2 – Ground Penetrating Radar – GPR (Georadar)

O Ground Penetrating Radar – GPR (figura 3.36 e 3.37) é um tipo de radar que emite ondas eletromagnéticas de frequência alta, as quais retornam ao aparelho com alterações em suas características físicas. Essas alterações da ondulatória (amplitude e frequência) são relacionadas às propriedades de cada material, o que permite detectar a natureza das camadas que compõem o pavimento, as profundidades do sistema de camadas em estudo e as interfaces das camadas de pavimentos através das constantes dielétricas de cada meio que a onda atravessa (GONÇALVES & CERATTI, 1988; MASER et. al., 2001).

Segundo GONÇALVES, CERATTI, RODRIGUES & SOMACAL (2000), a caracterização de zonas fraturadas em maciços rochosos, a identificação do nível do lençol freático, estudos de barragens e perfis estratigráficos, e até a investigação de tubulação soterrada pode ser realizada com este equipamento, entre outros procedimentos. No campo da engenharia de pavimentos a sua aplicação abrange a

identificação de camadas dos pavimentos, presença de vazios sobre camadas cimentadas e integridade da estrutura (UDDIN & HUDSON, 1985).



Figura 3.36 Equipamento GPR Fonte: MASER, 2001.

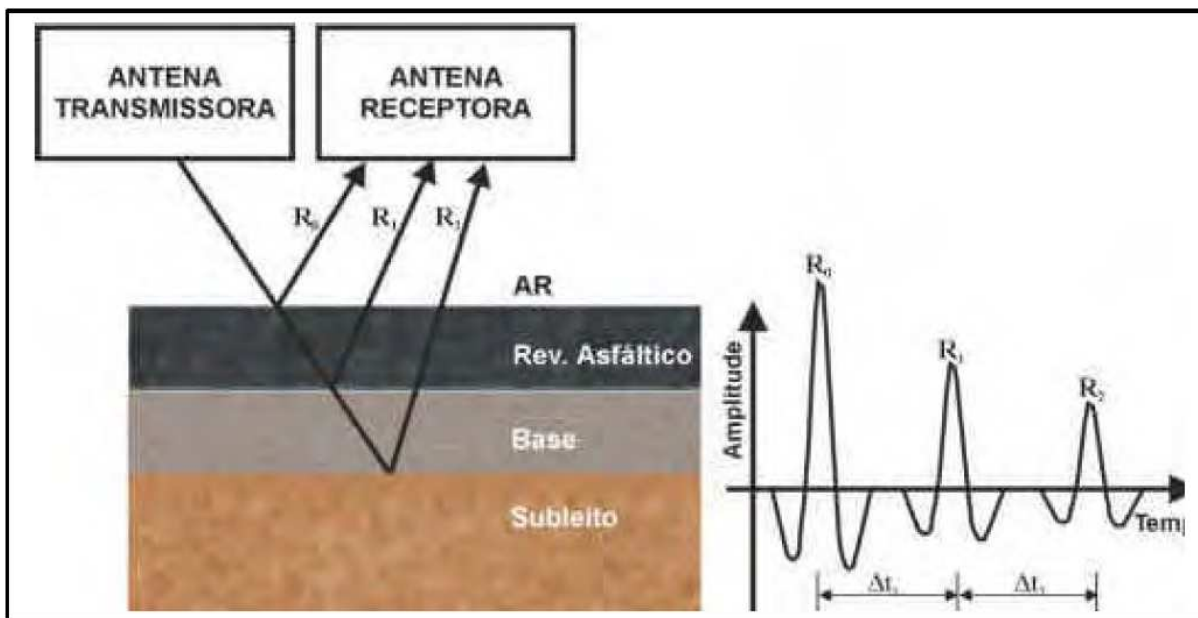


Figura 3.37 Princípio de Funcionamento do GPR Fonte: MASER, 2001.

O funcionamento deste equipamento se dá pela medição da fase da velocidade de propagação de onda de tensões e deformações. O equipamento consiste em vibradores eletrodinâmicos ou magnéticos restritivos, um amplificador, um gerador de frequência (de 20 a 25 Hertz), um acelerômetro, um filtro estreito e um medidor de fase (de 0° a 360°). Através deles pode-se tentar estimar os módulos complexos dinâmicos dos pavimentos.

3.5 Comentários

Os deslocamentos verticais recuperáveis de um pavimento sob a ação de uma determinada carga constituem elemento indispensável para a avaliação das condições estruturais do pavimento, visto que o arqueamento das camadas estruturais do pavimento e a repetição do carregamento são responsáveis pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas. Também se sabe que o valor do deslocamento vertical máximo recuperável não explica, por si, só o comportamento estrutural e o processo de distribuição de cargas no interior do pavimento. Assim, observam-se, em alguns casos, deslocamentos verticais máximos recuperáveis elevados em locais avaliados com um bom conceito funcional (ausência ou pequena quantidade de fissuras e deformações superficiais) e, inversamente, locais em que o pavimento se apresenta com vários defeitos (conceito mau ou péssimo) com deslocamentos verticais máximos recuperáveis baixos.

Estas deformações elásticas representam a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto da superfície do pavimento, todas as camadas sofrem flexão devido às tensões e deformações geradas pelo carregamento, sendo que o valor do deslocamento geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga, pela distribuição das forças.

Diante do disposto, relatamos os seguintes comentários acerca dos equipamentos apresentados no capítulo 3:

- Ensaio de placa: para muitos profissionais este tipo de ensaio apresenta limitações, pelo aspecto de que a aplicação de carga é estática e a qualificação de carga estática sobre o pavimento não traduz a realidade, pois as rodas dos veículos em movimento produzem cargas dinâmicas.

- Viga Benkelman: algumas das desvantagens apresentadas pela viga Benkelman são: a baixa produtividade (apenas 8 quilômetros por dia); medida realizada

de forma quase-estática; não representando a aplicação da carga dinâmica produzida pelos veículos; as medidas não apresentam uma boa repetibilidade; a precisão das medidas diminui sensivelmente nos pontos mais afastados em relação ao ponto de aplicação da carga; o processo de execução é todo manual; o que propicia erros eventuais aleatórios e sistêmicos. Mas há que se considerar que apresenta, também, algumas vantagens, tais como: o fácil manuseio; o equipamento é de custo muito baixo; de fácil transporte e armazenamento e o uso prático em controle de camadas em obra de pavimentação.

- Deflectógrafo Digital: A diferença deste equipamento para a Viga Benkelman comum é a automação da medição e gravação das deflexões durante a condução do veículo teste, o uso de um equipamento automatizado possibilita leitura de deflexões com espaçamento de 5 centímetros, desde o ponto de aplicação da carga até os limites da bacia deflectométrica, bem como os registros de deslocamentos, a temperatura da superfície e da linha de influência longitudinal da bacia. Contudo, ainda se trata de um equipamento com carregamento estático, o que afasta o ensaio da condição de deflexão real de um pavimento em uso.

- Curviâmetro: Trata-se de um equipamento mais ágil que os outros deflectógrafos, Recentemente notou-se um aumento da utilização deste tipo de equipamento principalmente na Europa, contudo trata-se de um equipamento de grandes dimensões, sem vantagens à operacionalidade no que tange a ocupação de via de tráfego em relação aos equipamentos tipo FWD, que é mais compacto e com maior praticidade para acomodação em períodos entre ensaios.

- Dynaflect: é um aparelho que utiliza o modo dinâmico de carregamento, o que representa uma melhoria em relação aos equipamentos estáticos. Ainda assim, apresenta as desvantagens de baixa velocidade de locomoção com as rodas de carga pico a pico limitada, a frequência e intensidade das cargas invariáveis.

- Road Rater: trata-se de um equipamento vibratório onde os valores de magnitude e frequência do carregamento podem ser variados. É vantajoso em relação ao Dynaflect por permitir variação de carregamentos

- WES 16-kip Vibrator: Este equipamento foi concebido inicialmente para ser um equipamento de avaliação de pavimentos aeroportuários. Desta forma, o uso deste aparelho em pavimentação rodoviária pode apresentar algumas especificidades passíveis de tornar a avaliação estrutural imprecisa sob o ponto de vista de projeto.

Quanto aos equipamentos de carregamento dinâmico transiente por impulso do tipo FWDs, os modelos Dynatest (concepção dinamarquesa e produção norte-americana) e o KUAB (projetado e produzido na Suécia), são os mais difundidos no Brasil. As principais diferenças quanto aos modelos se resumem à placa de aplicação de carga, que é segmentada no KUAB e inteiriça no Dynatest e ao formato padrão dos trailers, fechado no Kuab e aberto no Dynatest. Notadamente os valores de deflectometria provenientes do Kuab, que são utilizados no software do próprio equipamento para cálculos de retrodimensionamento apresentam valores mais razoáveis que os valores provenientes do equipamento Dynatest sendo o retrodimensionados feito com a utilização do software Elmod. Entretanto, o equipamento Dynatest é ligeiramente mais ágil, o que confere praticidade aos levantamentos de campo no que se refere a questões operacionais.

Embora não seja fornecedora de equipamentos FWDs entre as empresas de consultoria de engenharia de pavimentos, a Foundation Mechanics Inc., produtora do FWD Jils, foi a pioneira em apresentar produtos com diferenciais úteis como equipamentos FWD associados ao GPR, bem como equipamentos deflectométricos já instalado na própria carroceria de veículos utilitários.

O GPR foi caracterizado neste trabalho como equipamento de ensaio não destrutivo, contudo, não é possível a averiguação de deflexão com este equipamento, já que seu funcionamento não se dá por impulsos mecânicos. Sua utilização se justifica

pela possibilidade de estimativa da natureza da estrutura de pavimentos. A alteração nas características dos perfis estratigráficos auxilia a subdivisão dos trechos homogêneos de rodovias, de forma a prover um dimensionamento mais fidedigno com as características reais do pavimento. Por este motivo iniciou-se a produção de FWD associados ao GPR, inicialmente pela Jils, sendo que hoje já esta sendo disponibilizado esta tecnologia por outros fabricantes.

Mostram-se como equipamentos promissores os deflectómetros de alta velocidade, como o RDT, sueco, o RWD, americano e o HSD, dinamarquês. Estes equipamentos são os pioneiros em medição de deflectometria com muito pouca ou nenhuma interferência operacional durante a execução dos ensaios, devido às altas velocidades desenvolvidas com o equipamento em uso. No Brasil ainda não figuram entre as ferramentas de projeto estes novos equipamentos de alta velocidade, o que é um aspecto desfavorável, visto o desenvolvimento que o país vem experimentando nas últimas décadas com o incremento das concessões rodoviárias e o conseqüente aumento da demanda por infraestrutura de transporte.

O que se pode concluir é que os diferentes tipos de equipamentos desenvolvidos para medição de deflexões objetivaram um aumento de acurácia no que tange ao tempo e à magnitude do carregamento, bem como um aumento de produtividade e conseqüente redução de custos.

4. GENERALIDADES DO EQUIPAMENTO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER - FWD

4.1 Viga Benkelmann

Conforme citado no capítulo 3, a viga Benkelman foi idealizada por A.C. Benkelman e utilizada pela primeira vez na pista experimental da WASHO (Western Association of State Highway Officials) em 1953.

No Brasil, o procedimento de medição do deslocamento vertical recuperável da superfície do pavimento foi introduzido pelos engenheiros Francisco Bolívar Lobo Carneiro e Nesíor José Aratangy, na década de 1960. A viga Benkelman foi baseada no método da CGRA (Canadian Good Roads Association), modelo do Bureau of Public Roads dos Estados Unidos (NAGAO, 2001).

Trabalhos pioneiros no Brasil com a viga Benkelman incluem Aratangy (1962), Aratangy e Andreatini (1969), Carneiro (1965), Oliveira e Fabrício (1968) e Andreatini (1967, 1970), entre outros. O uso da viga Benkelman como meio de controlar a construção de pavimentos é relativamente mais recente (Porto, 1978; Rabaça et al., 1995; Koehler et al., 1996; Ramos et al., 2000). Porto (1978), o pioneiro a divulgar resultados de controle de construção com a viga no Brasil, relata a experiência de uso na construção da Rodovia dos Bandeirantes pela DERSA (Desenvolvimento Rodoviário SA.), obra de grande vulto, concluído pelo sucesso do emprego das deflexões na liberação de camadas bem como na correção de eventuais defeitos (apud SOARES & SOARES, 2006).

No Brasil e no mundo, o equipamento para avaliação estrutural de pavimentos mais difundido é, indubitavelmente, a viga Benkelman. Este aparelho vem sendo utilizado desde os anos 60 neste país. Entretanto, vem ocorrendo um crescimento no uso dos equipamentos do tipo FWD, a partir de 1980. O equipamento está apto a

fornecer grande quantidade de informações, as quais são obtidas em uma única rodada de ensaios, de forma a proporcionar uma elevada produtividade (ALBERNAZ et al., 1997).

Com o crescente aumento da utilização do equipamento FWD no Brasil foram pouco utilizadas as versões da viga Benkelman automatizada nacional, bem como o deflectógrafo *Lacroix*, desenvolvido na França e o *Travelling Deflectometer*, de origem californiana (EUA). Estes instrumentos, que existem há cerca de 40 anos, poderiam aumentar a produtividade quanto ao número de medições em função do tempo. Pelo fato destes equipamentos não terem sido explorados de maneira mais ampla e sistemática. Os dois equipamentos predominantemente utilizados para avaliação estrutural no Brasil são a viga Benkelman e o FWD (MEDINA , MACÊDO & MOTTA et al. 1994).

4.2 Falling Weight Deflectometer – FWD

O Falling Weight Deflectometer (FWD) foi concebido no Laboratoire Centrales Pontes et Chaussées (LCPC), na França, sendo posteriormente desenvolvido por estudantes da Universidade de Tecnologia da Dinamarca em 1964, com a justificativa de criar um instrumento confiável para medições – testes para capacidade de suporte dos pavimentos das estradas, que não poderiam ser medidas por meio de um método estático de ensaio (BOHN, 1985).

Os pesquisadores franceses tencionaram desenvolver um equipamento de queda de peso, mas estes estudos foram interrompidos com a utilização da versão francesa da Viga Benkelman, o Deflectógrafo Lacroix, que ainda se mostrava mais eficaz que os equipamentos de queda de peso daquela época. Neste ínterim, várias modificações foram feitas com base em informações obtidas a partir da experiência francesa, consolidando um novo equipamento construído na Universidade Técnica da

Dinamarca. Ainda com dificuldades operacionais nesta versão, que era bastante pesada, a empresa de consultoria A / S Phoenix construiu um pequeno sistema de queda de pesos em uma conformação mais prática (BOHN, 1985).

Data do ano de 1975 há substituição do sistema de molas por amortecedores de borracha. O conjunto de massas passou a ser elevado hidraulicamente através de uma bomba manual e montado em um dispositivo de reboque. A deformação passou a ser aferida eletronicamente (BOHN, 1985).

Na Inglaterra, o sistema de aferição de deflexões de estruturas de pavimento por sistemas de queda peso também sofreu resistência, como na França. A argumentação para este ceticismo no equipamento era a baixa interferência do equipamento nas camadas mais profundas do pavimento, devido à curta duração da deformação do pavimento sob a ação da queda de uma massa. Além disso, foi alegado que a inércia dos materiais consolidados na estrutura do pavimento também seria um componente atenuador do propósito do ensaio. As objeções levantadas pela França e Grã-Bretanha resultaram em medições comparativas entre os efeitos da queda de uma massa e de um pneu se deslocando em velocidade. Estas medições foram realizadas na Dinamarca e os primeiros resultados foram muito positivos, com deformações similares em ambos os casos (BOHN, 1985).

Segundo BOHN (1985), na década de 1980 diversas empresas começaram a construir o FWD para uso próprio, o que trouxe por consequência uma grande variedade de métodos para a interpretação dos dados de deflexões, consideradas as particularidades de cada equipamento. Em meados dos anos 80, nos Países Baixos, foi composto um comitê para harmonizar a metodologia de testes de deflexão com os vários equipamentos disponíveis comercialmente.

É notório o uso crescente do FWD para se medir deflexões, já que este apresenta maior acurácia e produtividade do que a viga. Outro fator que é relevante nas medições realizadas com a viga consiste em que os resultados, frutos deste ensaio,

apresentam grande dispersão, aumentando à medida que a distância radial dos pontos de leitura se afasta do ponto de aplicação da carga, o que acontece em menor intensidade nas medições realizadas com o FWD (ROCHA FILHO & RODRIGUES, 1998).

Segundo FARIAS & MONTEIRO et al. (1996), a maior vantagem do uso do FWD em relação à viga Benkelman é a capacidade do FWD de simular as condições de uma carga transiente em termos de magnitude e frequência, o que não ocorre nos levantamentos feitos com o uso da viga Benkelman. Desta forma, as deflexões recuperáveis se aproximam da deflexão promovida por um carregamento dinâmico. Outro fator importante é que o FWD proporciona leituras rápidas e apuradas, com sistema de aquisição de dados automático.

Observa-se que o FWD é mais preciso do que a viga Benkelman, mas que o primeiro apresenta um custo elevado quando utilizado em trechos de curta extensão, sendo mais viável para serviços menores, como para trechos urbanos (Prefeituras), o uso da viga, torna-se mais acessível em termos de custos (PAIVA & CAUSIM, 2000).

Da mesma forma que a viga Benkelman, os deflectômetros de impacto medem os deslocamentos verticais na superfície quando da aplicação de um carregamento. A diferença está no modo que esta carga é aplicada. As cargas são aplicadas por impacto no FWD e as deflexões obtidas resultam da propagação de ondas elásticas nas diversas camadas que compõe o pavimento, inclusive o subleito (MEDINA , MACÊDO & MOTTA et al. 1994).

HUANG (1993) relata que a maioria dos ensaios não destrutivos nos EUA é feita, a partir da década de 1990, com o uso do FWD. Segundo HAAS et al. (1994), são exemplos de equipamentos de carregamento por pulso o Dynatest FWD, o Kuab FWD e o Phoenix FWD.

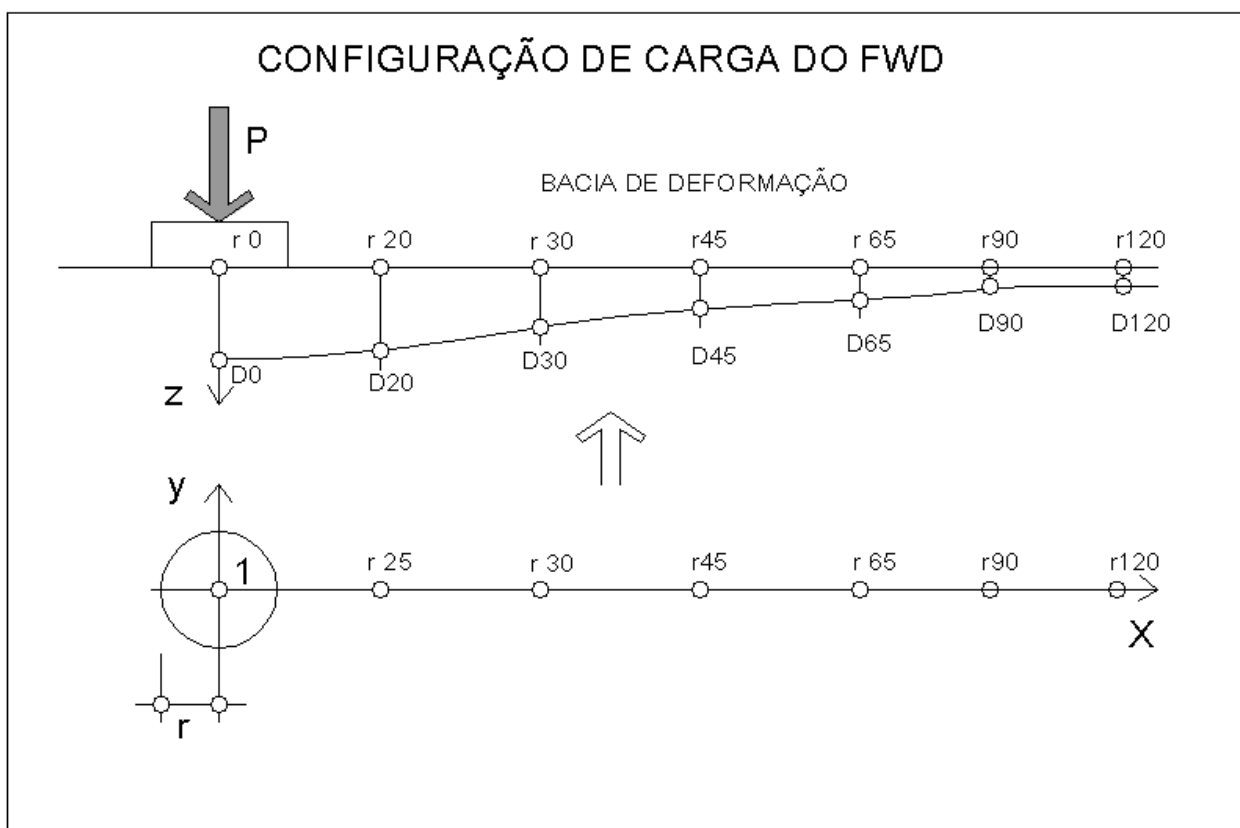


Figura 4.1 – Pontos de Avaliação do FWD.

No Brasil existem duas linhas de deflectômetros de impacto FWD: do fabricante Dynatest versão norte-americana e do fabricante Kuab, sueco, perfazendo um total de 9 (nove) equipamentos em uso no ano de 2003, segundo NÓBREGA (2003). As principais diferenças entre as duas linhas de deflectômetros de impacto existentes no país são em relação à placa de aplicação do carregamento e ao número de pesos usados para simular a ação do tráfego.

Enquanto o modelo da Dynatest possui uma placa rígida e um conjunto de massas, o modelo KUAB possui placa segmentada em 4 (quatro) partes unidas por êmbolos e dois conjuntos de massa. Segundo (MEDINA, MACÊDO & MOTTA et al. 1994), a carga gerada pelo impacto de 2 pesos parece preferível a de um peso estático, quando da simulação da carga de roda em movimento. Outro fator que merece destaque é que o pulso gerado por uma massa apresenta distorções. Se estas distorções ocorrerem antes do pico da carga principal, a carga de pico medida não é

compatível com as leituras de deflexão obtidas nos sensores mais distantes do carregamento imposto. Segundo PINTO & DOMINGUES (2001), a utilização do FWD apresenta as seguintes vantagens:

- Grande acurácia na medição de deflexões e pequena dispersão das medidas;
- Possibilita a aplicação de vários níveis de carga num mesmo ponto;
- Rapidez e facilidade de operação, independente das condições climáticas;
- Medida e registro automáticos da temperatura do ar e do pavimento e distância entre pontos pré-estabelecidos.

4.3 Correlação entre FWD e Viga Benkelman

A viga Benkelman é usada no Brasil desde a década de 60. Com o desenvolvimento dos procedimentos de avaliação estrutural do DNER, as medidas feitas com a viga Benkelman são usadas no cálculo de reforço de pavimentos flexíveis. Nos últimos anos, têm surgido equipamentos para a medição de deflexões como os FWD's, que apresentam maior apuração e rendimento. Apesar disso, a viga Benkelman é tida como referência universal para medida de deflexões, pois muitos métodos foram concebidos para uso de suas medidas.

Por exemplo, no Brasil, o Sistema de Gerência de Pavimentos do DNIT, antigo DNER e o modelo HDM (Highway Design and Maintenance Standard Model), adotado pelo Banco Mundial, fazem uso das deflexões obtidas pela viga Benkelman como critério de projeto e de estudos. Dessa forma, muitos estudiosos do meio rodoviário pesquisam formas de se estabelecer correlações entre as medidas realizadas com outros equipamentos mais sofisticados com as medidas feitas com a viga Benkelman.

No Brasil, em particular, tem-se procurado correlacionar os valores de leituras feitas com o FWD com os da viga, pois o uso do FWD apresenta grande aceitação no meio rodoviário nacional (DUARTE, SILVA & FABRÍCIO et al., 1996).

Segundo Borges et al. (2001), vários autores fizeram estudos de curvas de correlação entre eles Himero et al. (1989), no Japão; Pinto (1991) no Rio Janeiro; Romero et al. (1994), na Espanha; Fabrício et al. (1994), no Rio Grande do Sul; Cardoso(1992) em São Jose dos Campos; Pinto e Domingues (2001) no Rio Janeiro; Sestini et al (1998) em São Paulo; entre outros o gráfico de correlações é apresentado na figura 4.2

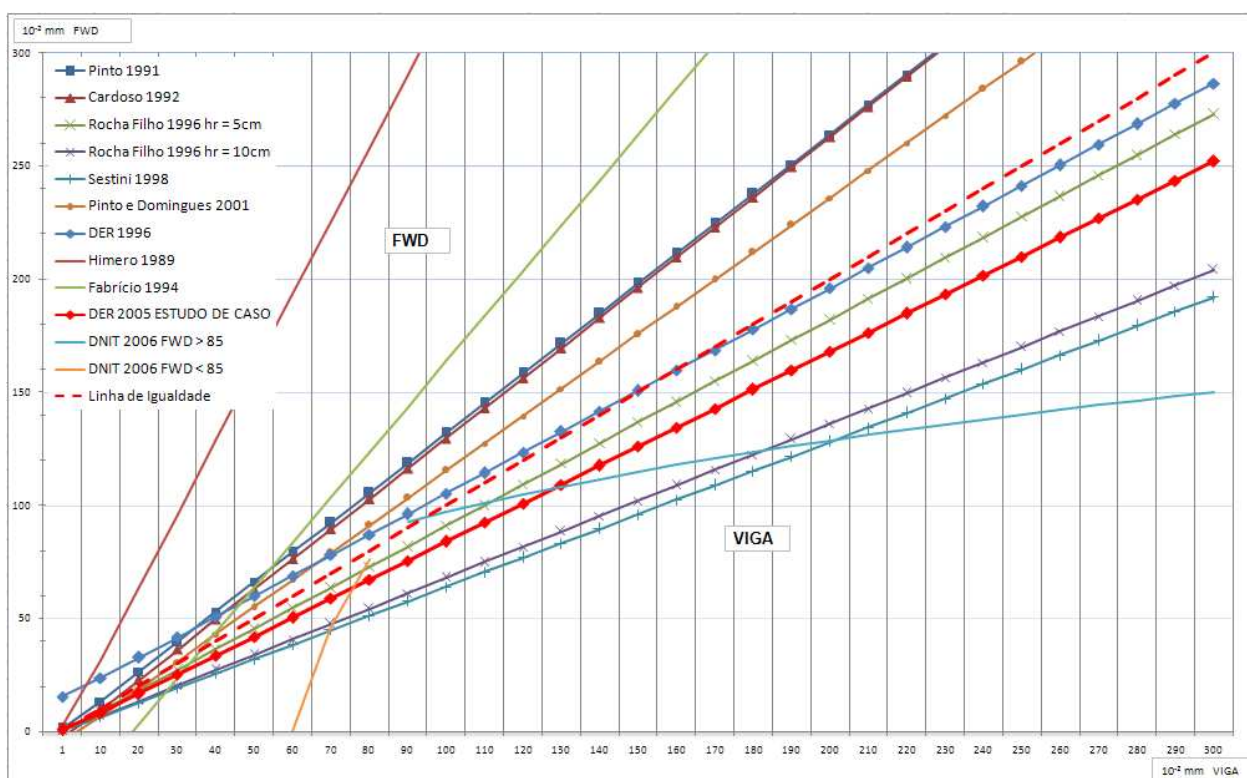


Figura 4.2 – Gráfico de possíveis correlações entre FWD e Viga Benkelman.

Segundo CAMPOS, GUIMARÃES & RODRIGUES et al. (1995), as deflexões máximas determinadas através da viga Benkelman e do FWD podem ser diferentes devido aos seguintes fatores:

1. Apresentam diferentes configurações quanto à aplicação e geometria do carregamento. O carregamento da viga Benkelman é quase-estático, enquanto a aplicação do carregamento do FWD é de impacto, transmitindo um pulso de carga similar ao de veículos a cerca de 70km/h;

2. O sistema de medição da viga Benkelman possui um grau de dispersão maior, incluindo dependência quanto ao operador (erros aleatórios e sistemáticos).

Deve-se ressaltar que uma determinada correlação só é válida no local onde ela foi desenvolvida e ajustada. Segundo DUARTE, SILVA & FABRÍCIO (1996), sempre deve se verificar as correlações obtidas em uma determinada localidade em outras regiões e/ou países, visando o seu aprimoramento.

Determinar uma correlação entre as medidas feitas com a viga Benkelman e com o FWD parece difícil, já que as leituras da viga são muito dependentes dos fatores ambientais e operacionais, não considerando os aspectos de carga dinâmica (ROCHA FILHO e RODRIGUES, 1998).

Segundo PINTO & PREUSSLER (2001) não existe correlação entre os resultados obtidos por meio da viga Benkelman e FWD. É importante observar que, na utilização do FWD, se torna importante a realização de uma calibração no trecho a ser analisado para se obter dados e assim abastecer o sistema de aquisição que será utilizado para determinar as deflexões na seção típica transversal do pavimento em análise. Estes autores também afirmaram que na avaliação funcional, o técnico muitas vezes tem dificuldade na hora de estabelecer a terminologia correta para o tipo de defeito encontrado no pavimento.

No âmbito rodoviário o DNIT 005/2003 preconiza a terminologia para os defeitos que deve ser adotada quando do inventário do pavimento que compõem esta avaliação.

O DNER (1998) cita ainda, que as correlações entre deflexões obtidas por viga Benkelman e FWD são dependentes de diversos fatores e, principalmente, da resposta elástica da estrutura de pavimento que está sendo avaliada. Desta forma, não existem correlações de aplicação generalizada.

4.4 Comparações entre FWD e outros equipamentos deflectométricos.

As principais características dos equipamentos medidores de deflexão recuperável estão elencadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características de equipamentos não-destrutivos (WSDOT,1995)

Equipamento	Força Dinâmica (lbf*)	Transmissão de Carga por	Número e tipo de sensores de deflexão	Espaçamento dos sensores de deflexão
Kuab FWD	3000 a 15000	Placa Circular Seccionada com 11.8 pol. de Diâmetro	7 sismômetros	Fixos em 0, 8, 12, 24, 36, 48 pol*.
Dynatest FWD	1500 a 27000	Placa Circular 11.8 ou 17.7 pol. de Diâmetro	7 geofones	Variável, 12 a 96 pol*.
Dynalect	1000 pulso a pulso	Duas placas Metálicas com 16 pol. de Diametro por 2 pol. de Altura	5 geofones	Variável, 12 a 96 pol*.
Road Rater	500 a 27000 pulso a pulso	Placa Circular com 11.8 pol. de Diâmetro	4 geofones	Variável, 24 a 48 pol*.
Phoenix FWD	2300 a 23000	Placa Circular com 11.8 pol. de Diâmetro	6 geofones	Variável, 8.3 a 58 pol*.
WES-16	500 a 30000 pulso a pulso	Placa Circular com 11.8 pol. de Diâmetro	5 geofones	Variável, 12 a 60 pol*.
* lbf = 4.448 N * 1 pol. = 2.54 cm				

4.5 Fatores Externos que Influenciam no ensaio com o FWD

Os aspectos relacionados aos procedimentos de ensaio, procedimentos operacionais e ao ambiente constituem fatores externos os quais interferem no levantamento de deflectometria das maneiras explanadas a seguir:

a) Aspectos de procedimento de ensaios

Dentre os aspectos físicos que interferem nos resultados de ensaios, como por exemplo, geometria do dispositivo de aplicação direta de carga ao pavimento, massa da carga, pressão dos pneus do reboque transportador, podem ser destacados os seguintes itens:

- Influência do Modo de Carregamento

De acordo com THOLEN, SHARMA & TERREL et al. (1985), diferentes modos de carregamento aplicados em pavimentos geram resultados distintos, pois o equipamento utilizado afeta a magnitude da deflexão. De acordo com ROCHA FILHO et al. (1996), quando usados equipamentos que simulam modos diferentes de carregamento este aspecto externo fica ressaltado. O mesmo autor ressalta que, para o caso dos equipamentos FWD, o carregamento não é aplicado uniformemente sob a placa, o que gera certa imprecisão para as placas de aplicação de carga que não são articuladas, ou ainda quando os operadores do equipamento não realizam a batida de acomodação antes da obtenção dos dados.

-Influência relacionada ao Posicionamento dos Sensores do FWD

ROCHA FILHO & RODRIGUES (1996), sugerem que o posicionamento dos sensores seja escolhido de acordo com a espessura do pavimento em análise, e este aspecto pelo fato de as camadas mais profundas influenciarem as deflexões mais afastadas do centro da bacia deflectométrica. Desta forma, em estruturas de

pavimentos esbeltos como, por exemplo, tratamento superficial simples ou duplo, o último sensor fica mais perto do sensor da placa de aplicação de carga, enquanto o pavimento com estrutura mais espessa o último sensor deve ficar em uma maior distância do ponto de aplicação da carga de forma a se detectar as solicitações sofridas pelo subleito.

Ainda, recomendam-se espaçamentos diferentes para o tipo de pavimentos a se avaliar, de acordo com a preferência dos projetistas. Segundo PINTO & DOMINGUES (2001), geralmente são empregados os seguintes posicionamento dos sensores:

- Para pavimentos flexíveis: 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120 centímetros;
- Para pavimentos rígidos: 0, 20, 30, 80, 100, 160 e 200 centímetros.

b) Aspecto Operacional

O aspecto operacional que deve ser levado em conta nos ensaios são os que tangem à operação da rodovia propriamente dita, cujo pavimento está em avaliação:

- Avaliação do Tráfego

O efeito do tráfego nos pavimentos é diretamente afetado de acordo com a carga transportada pelos veículos passantes. A ação do tráfego, não só pela carga transportada, mas também pela frequência com que solicita o pavimento, interfere na evolução da deterioração do mesmo, conforme as magnitudes das cargas que solicitarão os pavimentos por eixos de diversas configurações com cargas distintas (ALBANO, 1998).

É de suma importância, desta forma, a avaliação do tráfego para o projeto não só de pavimentos novos como para projetos de reforço. As estruturas projetadas e existentes são dimensionadas em função das solicitações do tráfego, levando em conta aspectos como a conversão de diversas configurações de eixos e cargas em um número equivalente de repetições de um eixo-padrão. O eixo padrão estabelecido na

engenharia nacional é o eixo simples de rodagem dupla (ESRD) com carga total de 80 kN (8,2 tf ou 18.000 lb) sobre pneus com pressão de inflação de 0,55 MPa (5,6 kgf/cm² ou 80 PSI).

A tabela 4.2 apresenta os limites de carga legal por eixo de veículo comercial:

Tabela 4.2 – Limite legal de carga por eixo (Resolução nº 114/2000 CONTRAN)

TIPO DE EIXO	CARGA LEGAL (tf)
Eixo simples de roda simples	6
Eixo simples de rodas duplas	10
Eixo tandem duplo	17
Eixo tandem triplo	25,5

c) Aspectos ambientais

São os aspectos relacionados aos fenômenos da natureza, quais sejam:

-Influência relacionada à pluviosidade

Os períodos chuvosos são de conhecimento da engenharia nacional e sua principal interferência aos levantamentos deflectométricos é o acréscimo de teor de umidade do subleito e, por conseqüência, a diminuição da capacidade de suporte, o que resulta no acréscimo da deflexão no centro de aplicação da carga (ROCHA FILHO & RODRIGUES, 1996).

Diante deste aspecto, embasado por pesquisas de campo, OLIVEIRA & FABRÍCIO (1967) indicaram que a melhor época para execução de ensaios deflectométricos seria após a estação climática chuvosa, ou seja, com o subleito nas condições mais desfavoráveis de suporte. Para os levantamentos deflectométricos

realizados fora do melhor período, os autores indicam aplicam-se fatores de correção sazonal conforme tabela 4.3., entretanto não foi encontrados na literatura pesquisada conceitos teóricos que pudessem validar esse fatores sazonais uma vez que os mesmo foram desenvolvidos para viga Benkelman.

Tabela 4.3 – Fatores de Correção Sazonal para Viga Benkelman (DNER, 1979a; 1979b).

Natureza do Subleito	Fator de Correção Sazonal	
	Período Seco	Período Chuvoso
Arenoso / Permeável	1,1 a 1,3	1
Argiloso / Sensível à Umidade	1,2 a 1,4	1

- Influência da Temperatura

MEDINA, MACÊDO & MOTTA et al. (1994) relatam que as propriedades relacionadas à elasticidade, viscosidade e plasticidade das misturas asfálticas são função dos gradientes de temperatura os quais pavimento está submetido. A viscosidade do ligante aumenta nas temperaturas mais baixas, o que resulta na diminuição das deflexões devido à melhor capacidade de distribuição de carga na estrutura. Em contrapartida, quando a temperatura aumenta, o efeito se inverte, ou seja, a viscosidade diminui, reduzindo a rigidez e, conseqüentemente tem-se um aumento nas deflexões (MEDINA, MACÊDO & MOTTA, 1994).

Com o intuito de se verificar a influência da temperatura nas medidas das deflexões, ROCHA FILHO & RODRIGUES (1996) realizou levantamentos deflectométricos sobre um mesmo ponto do pavimento, em dias e horários distintos, mantendo-se constantes a configuração do carregamento e posicionamento dos sensores do FWD. Desta forma, mantendo constante a configuração do carregamento, quanto menor a temperatura da superfície do revestimento, maior era o valor da carga aplicada e, conseqüentemente, menor as deflexões. Isto ocorre devido à maior rigidez da camada asfáltica em função do decréscimo de temperatura.

4.6 Comentários

Neste capítulo foram abordados com maior profundidade os dois equipamentos mais difundidos em ensaios deflectométricos, ou seja, a Viga Benkelman e FWD.

No caso do levantamento efetuado através da viga Benkelman, são necessários ajustes das deflexões dos pontos mais afastados com o ponto de aplicação da carga, justamente por apresentarem maior dispersão, gerando erros que, certamente, serão propagados no processo de cálculo estrutural para reforço, que forneceria dados não condizentes com o estado real do pavimento. Esta imprecisão fica minimizada no levantamento com uso do FWD, o que não significa que os dados obtidos com este último equipamento sejam totalmente livres de dispersão dos valores.

Torna-se indispensável à sensibilidade do engenheiro projetista, apesar deste aspecto ter seu lado desfavorável devido à subjetividade do critério. Contudo, é um fator insubstituível à tecnologia atual de equipamentos e programas. O gráfico ilustrado na figura 4.2 demonstra numerosas linhas tendências, todas distintas, de correlações do equipamento FWD com a Viga Benkelman, cada uma delas deduzida por determinado autor em determinada condição ambiental e estrutural. Este aspecto só reforça a importância da percepção e bom senso do engenheiro calculista, que deve ter plena noção das variáveis de projeto, pois os critérios são subjetivos e podem levar a uma solução equivocada. Pode-se deduzir, ainda de acordo com a figura 4.2, que não é possível estabelecer um procedimento padrão irrevogável e aplicável para qualquer condição de projeto.

Por este prisma, torna-se impraticável a correlação definitiva destes valores, onde as correlações entre viga Benkelman e FWD são dependentes das estruturas ensaiadas, das condições climáticas, do modo de carregamento, da correta calibração dos equipamentos e da metodologia do ensaio. Muitos pesquisadores têm continuamente buscado fazer correlações empíricas entre as deflexões medidas com

dispositivos dinâmicos. Estas tentativas são complicadas pelo o fato de cada um dos dispositivos de carga aplicar uma função diferente ao pavimento.

Os aspectos produtivos e de operacionalidade da ocupação de via para o ensaio levam a crer que o FWD é mais econômico que a viga. Para a manutenção do pavimento, é importante conhecer a influência da capacidade atual do pavimento em resistir às solicitações de tráfego. A capacidade de um pavimento são medidas de forma indireta pelo FWD, através de seus equipamentos de detecção e sub-rotinas de cálculos microprocessados no momento do ensaio, o que torna o ensaio não destrutivo realizado com o FWD um estudo mais detalhado em comparação com a Viga Benkelman.

Ainda não se pode descartar a determinação de uma correta correlação entre as deflexões máximas determinadas com o FWD e a viga Benkelman. O objetivo da utilização desta correlação seria possibilitar o dimensionamento da espessura da camada de reforço através dos métodos preconizados pelo DNER com os valores obtidos pelo equipamento FWD. Este procedimento deve ser realizado com muita cautela. Os métodos desenvolvidos pelo DNER foram concebidos com os valores de viga. Os dados obtidos do equipamento FWD, devem ser considerados através de uma análise mecânica para que sejam obtidos os módulos de resiliência dinâmicos das camadas do pavimento através de retroanálise. As sondagens a trado são indispensáveis para comprovação da estrutura existente.

Conclui-se que a magnitude das deflexões é extremamente afetada pelo modo de carregamento utilizado e, dentre todos os equipamentos analisados, o que melhor simula o efeito das cargas de roda no pavimento é o FWD. Entretanto deve ser considerado o módulo de resiliência dinâmico, uma vez que os módulos utilizados são estáticos, já que foram concebidos para a viga Benkelman.

Como a viga Benkelman mede o efeito das deflexões em velocidade nula, é preciso que as novas normas e equipamentos modifiquem este paradigma e passem a

se basear também em medições de deformações sob a carga de um pulso curto, para simulação de um tráfego de alta velocidade

Além destes fatores conceituais, são de extrema importância os cuidados com os procedimentos de ensaio, conforme será descrito a seguir.

O efeito deletério do tráfego sobre os pavimentos é bastante complexo se constituindo numa das maiores dificuldades encontradas na tentativa de tornar racional a consideração deste componente no dimensionamento da estrutura do pavimento. Citam-se os seguintes fatores que concorrem para a complexidade do problema:

- heterogeneidade das configurações dos eixos, como ocorrido na última década com o advento da utilização de transporte por CVC – Combinação de Veículo de Carga. Este tipo de veículo configura diferentes modelos de carregamento com múltiplos eixos em veículos de cargas longos. Tal modelo de carregamento não era utilizado na ocasião da criação dos procedimentos de cálculo atualmente disponíveis;

- variações nos valores das cargas por eixo e pressão de inflação dos pneumáticos ao longo da vida de projeto. A ausência de fiscalização e imprecisão das balanças rodoviárias abre folgas e modos de burlar a legislação de trânsito, através do excesso de peso praticado por transportadores;

- variações na velocidade dos veículos devido à geometria da via e volume de tráfego;

- efeito do meio ambiente (temperatura e umidade), naturalmente que após um período de estação chuvosa temos a condição mais desfavorável em relação à deflectometria nas camadas, o que torna razoável ter um fator que amenize a equação nas situações mais favoráveis ao suporte do pavimento. Contudo, não foram encontrados na literatura pesquisada conceitos teóricos que pudessem validar estes fatores sazonais;

- incertezas na estrutura e tipicidade dos materiais existentes. Tal problema ocorre quando o projeto possui poucos ensaios de sondagem;

- ausência de bases de calibração de equipamentos FWDs no Brasil. Países desenvolvidos possuem base de calibração para diferentes fabricantes de equipamentos tipo FWD, com o objetivo de manter os equipamentos com operacionalidade confiável do ponto de vista de precisão de ensaios. Olle Tholen, principal executivo da fabricante Kuab, recomenda a calibração anual dos equipamentos para que sejam corrigidas imprecisões geradas pelo desgaste natural do equipamento pelo seu uso.

Outro evento que não ocorre no Brasil mas tem se mostrado muito contributivo para o alcance desta confiabilidade de equipamentos do tipo FWD é o “FWD Day”. Desde 1987 é realizado na Holanda este encontro, onde ocorre um estudo comparativo entre os equipamentos FWDs europeus. São escolhidos locais críticos para os ensaios, normalmente com estrutura de pavimento com bom subleito e outros trechos com subleito ruim. O objetivo do estudo é a determinação da repetibilidade e a correlação de cada FWD (CROW,2007).

Entre os equipamentos ensaiados, pôde-se identificar uma clara relação entre a deflexão e a duração do pulso, bem como do desvio do pico de leitura da deflexão do valor médio. Em outras palavras, os procedimentos e software utilizados pelos fabricantes para correção de leitura das bacias de deflexão nem sempre são os mais adequados. Os aspectos marcantes constatados do FWD Day foram:

- Altura de queda insuficiente, bem como a repetibilidade de ensaio com mesma altura;
- Ausência de registro de temperatura de pavimento (e suas conseqüentes incorreções);
- Ausência de parte dos registros automáticos.

Vale ressaltar que a repetibilidade refere-se à realização do ensaio sob as condições mais constantes quanto possíveis, realizados durante um curto intervalo de tempo, em um trecho conhecido e monitorado por um operador utilizando o mesmo equipamento.

Ensaio realizados em trechos presumivelmente idênticos, em circunstâncias também presumivelmente idênticas, em geral, não apresentam resultados idênticos. Isto é atribuído a erros aleatórios inevitáveis, inerentes aos procedimentos de cada ensaio, os fatores que influenciam nos resultados de um ensaio não podem ser completamente controlados. Na interpretação dos resultados, esta variabilidade deve ser levada em conta. Portanto, a diferença entre o resultado de um ensaio e um valor especificado pode estar dentro de tais erros aleatórios inevitáveis, neste caso um desvio real do valor especificado não pode ser estabelecido. Da mesma maneira, comparando-se resultados de ensaios de dois equipamentos não haverá uma diferença fundamental da qualidade se a diferença entre eles puder ser atribuída à variação inerente do procedimento do ensaio.

Alguns fatores (sem considerar a variação entre trechos supostamente idênticos) podem contribuir para a variabilidade do procedimento do ensaio, dentre eles podemos citar:

- o operador;
- o equipamento utilizado;
- a calibração do equipamento;
- as condições (temperatura, umidade etc.).

A variabilidade entre resultados de ensaios realizados por diferentes operadores e/ou diferentes equipamentos normalmente será maior que entre os resultados de ensaios realizados por um mesmo operador utilizando o mesmo equipamento.

Sob condições de repetibilidade os fatores acima apresentados são considerados constantes e não contribuem para a variabilidade, enquanto que sob condições de reprodutibilidade eles variam e contribuem para a variabilidade dos resultados do ensaio. Pode-se concluir que, face às variáveis possíveis de ensaios, é extremamente difícil reproduzir os mesmos procedimentos de ensaios e obterem-se os mesmos resultados.

5. DESCRIÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 – Introdução

Este estudo visa apresentar uma análise e retroanálise dos resultados de campanha de levantamentos deflectométricos, através de viga Benkelman e FWD simultaneamente em 8 trechos ao longo da malha rodoviária do DER/SP, trechos estes apurados através do Sistema de Gerência de Pavimentos do DER/SP, no intuito de ilustrar a importância da aferição e calibração entre deflexões provenientes de levantamentos com a Viga Benkelman e com FWD (Falling Weight Deflectometer) modelo 8000, fabricado pela empresa Dynatest.

Entre os 8 trechos de rodovias, selecionados procurou-se abranger diferentes tipos de materiais de base, a saber: granular, cimentada e de solos arenosos finos lateríticos. Os trechos selecionados foram os seguintes: SP-255 do km 84 ao km 85; SP-253 do km 221 ao km 222; SP-261 do km 5 ao km 6; SP-293 do km 24,8 ao km 23,8; SP-331 do km 94,5 ao km 95,5; SP-315 do km 28,8 ao km 27,8; SP-303 do km 10,5 ao km 11,5 e SP-149/215 do km 4,12 ao km 5,12, todos os trechos localizam-se na região central do estado de São Paulo.

Devido à crescente utilização de equipamentos tipo FWD em análise e projetos de pavimentos, faz-se necessário o estudo para a obtenção da correspondência das medidas obtidas com equipamentos deste tipo e a Viga Benkelman, visto que modelos de deterioração de pavimentos são em sua maioria desenvolvidos a partir de medições com Viga Benkelman.

Pode-se destacar modelos desenvolvidos para programas de gerência de pavimento, como o HDM (Highway Design and Management) e os procedimentos de dimensionamento de reforço estrutural do DNIT, que têm como base as deflexões medidas com Viga Benkelman.

Realizou-se uma retroanálise dos módulos de elasticidade das camadas, com o programa Laymod, seus resultados foram analisados comparando-se as bacias de campo FWD com as calculadas pelo software, para os três grupos de bases selecionados: granulares, cimentadas e solos arenosos finos lateríticos. Com base nos módulos de elasticidade das camadas dos pavimentos, obtidos por retroanálise, procede-se a avaliação com o programa Elsym 5, utilizado o carregamento da viga Benkelman, e obtém-se a deflexão da viga para os módulos do FWD, resultando em um novo critério para previsão de desempenho e projeto de pavimentos, para três níveis de tráfego. Os resultados são cuidadosamente analisados para definir quais critérios definem melhor a necessidade do pavimento, em cada caso. Os procedimentos mais adequados foram aplicados pelos DNER PRO-11/79 e DNER PRO-269/94, além da análise mecânica.

5.2 – Localização

Foram selecionados oito trechos ao longo da malha rodoviária do DER/SP, sendo as rodovias nas seguintes cidades:

- SP-253 na região de Jaboticabal;
- SP- 255 na região de Araraquara;
- SP-149/215 nas regiões de Araraquara e Ribeirão Bonito;
- SP- 331 na região Pirajuí;
- SP-261 na região Lençóis Paulista;
- SP-293 na região Duartina
- SP-315 também na região do município de Duartina, e a;
- SP-303 na região Piraju.

A figura 5.2 ilustra a distribuição de municípios em relação ao Estado de São Paulo e as rodovias são locadas na figura 5.3 através de mapa de satélite.



Figura 5.1 - Localização do Estado de São Paulo em relação ao Brasil

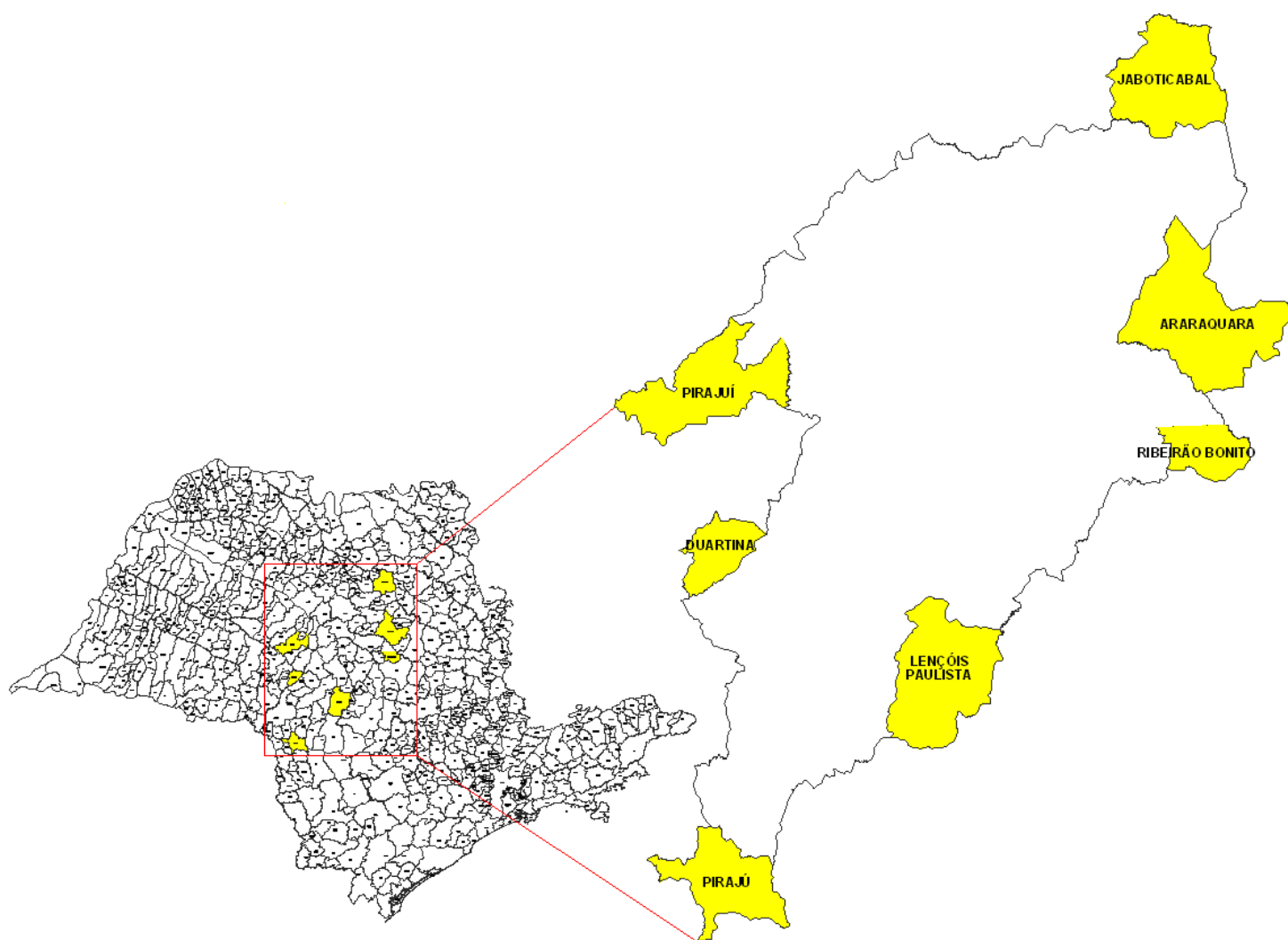


Figura 5.2 – Localização das cidades em relação ao Estado de São Paulo

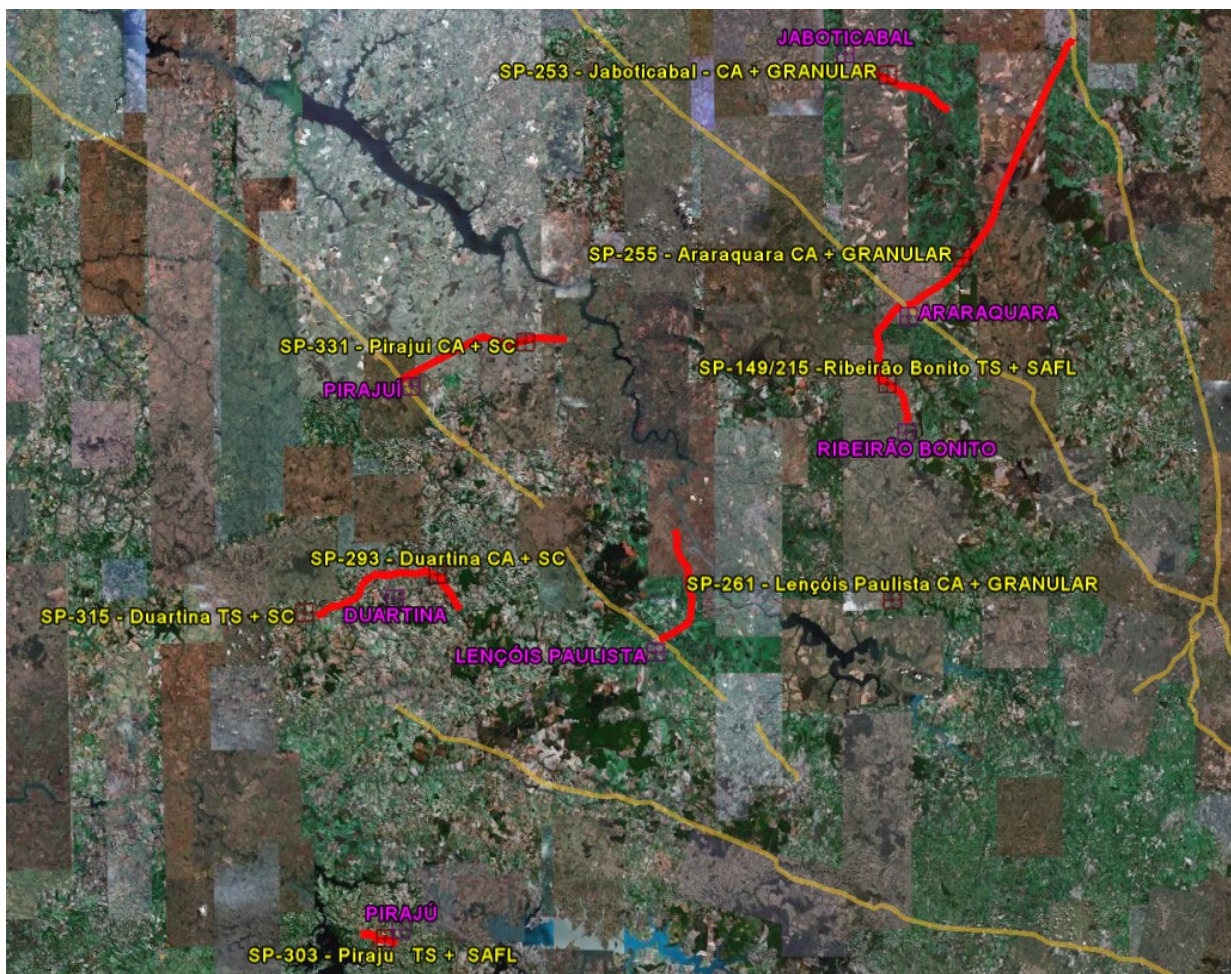


Figura 5.3 – Imagem de Satélite com a Localização das rodovias.

5.3 – Trechos Seleccionados e Divisão de Segmentos Homogêneos

No intuito de desenvolver correlações abrangentes o suficiente para caracterizar os diversos tipos de pavimento do Estado de São Paulo, buscou-se no banco de dados do DER/SP trechos de rodovias implantadas com diferentes tipos de estrutura de acordo com o tipo de revestimento e base, conforme descrito a seguir:

- Segmentos de 1.000m distribuídos ao longo da malha rodoviária de São Paulo que apresentassem as seguintes estruturas típicas:

- Revestimento em Concreto Asfáltico (CA):
 - Com espessura $h > 5$ cm sobre base estabilizada granulometricamente
 - Com espessura $h < 5$ cm sobre base estabilizada granulometricamente
 - Com espessura $h > 5$ cm sobre base cimentada
 - Com espessura $h < 5$ cm sobre base cimentada
- Revestimento em Tratamento Superficial (TS)
 - (TS) sobre base cimentada;
 - (TS) sobre base de solo arenoso fino (SAFL).

Com base nestas exigências selecionou-se os trechos para a execução dos levantamentos deflectométricos. A tabela 5.1 a seguir apresenta os segmentos eleitos para a avaliação deflectométricos simultaneamente através dos equipamentos tipo FWD e Viga Benkelman.

Tabela 5.1 – Trechos selecionados para execução de levantamentos deflectométricos

Estrutura		Rodovia	Trecho		Sentido dos Levantamentos	Data dos Levantamentos
Revestimento	Base		Km ini	Km fim		
CA $h > 5$ cm	Granular	SP 255	84,000	85,000	Crescente	19/10/05
CA $h < 5$ cm	Granular	SP 253	221,000	222,000	Crescente	21/10/05
		SP 261	5,000	6,000	Crescente	18/10/05
CA $h > 5$ cm	Cimentada	SP 293	24,800	23,800	Decrescente	20/10/05
CA $h < 5$ cm	Cimentada	SP 331	94,500	95,500	Crescente	20/10/05
TS	Cimentada	SP 315	28,800	27,800	Decrescente	20/10/05
TS	SAFL	SP 149/215	4,120	5,120	Crescente	19/10/05
		SP 303	10,500	11,500	Crescente	18/10/05

Para confirmação da estrutura, foram executadas avaliações destrutivas em campo, abertura de cavas (método direto), identificando-se as diversas camadas, espessuras e materiais. Foram coletadas amostras do subleito, e executados ensaios de caracterização em laboratórios. Os resultados são apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Estruturas dos segmentos seleccionados e determinados através de cavas.

RODOVIA	KM	REVESTIMENTO		BASE			SUB-BASE		SUBLEITO
		MATERIAL	ESP.(cm)	MATERIAL	ESP.(cm)	MCT	MATERIAL	ESP.(cm)	
SP 255	84,480	CA	13,00	BGS	10,00	-	CASCALHO	17,00	13,0
SP 253	221,080	CA	4,00	Solo Brita	16,00	NA	SAFL	20,00	20,0
SP 261	5,520	CA	3,50	MH	17,00	-	-	-	19,0
SP 293	24,300	CA	9,00	SC	11,00	-	-	-	23,0
SP 331	95,000	CA	5,00	SC	10,00	-	-	-	22,0
SP 315	28,350	TS	4,00	SC	12,00	-	-	-	20,0
SP 149/215	4,500	TS	2,50	SAFL	15,00	LA / LA'	SAFL	15,00	22,0
SP 303	11,020	TS	2,00	SAFL	15,00	LA	Solo	40,00	15,0

Nos mesmos trechos foi executada também uma análise estratigráfica do pavimento, (método indireto), com a utilização de equipamentos designados de Ground Penetrating Radar (GPR, Georradar), visando determinar a homogeneidade da estrutura nos trechos de 1.000m. Observou-se que as estruturas determinadas no centro de cada segmento, através de abertura de cavas, mantiveram-se constantes ao longo do segmento de todos os trechos deste estudo.

A análise dos perfis contínuos de Georradar fornece os subsídios adequados para um melhor planejamento das investigações por métodos diretos; ou seja, a avaliação pelos métodos indiretos (Georradar) não dispensa a investigação pelos métodos diretos. Este tipo de ensaios determina apenas a continuidade das espessuras das camadas ao longo do trecho, não sendo capaz de determinar com exatidão o tipo de material constituinte.

Os trechos onde foram executados os levantamentos deflectométricos correspondem aos mesmos trechos onde foi executada a análise estratigráfica. As cavas de inspeção foram locadas aproximadamente no centro de cada trecho.

5.4 – Métodos de ensaios de campo

Foram realizadas medidas de deflexão máxima com os equipamentos FWD e Viga Benkelman a cada 40 m. A fim de eliminar o maior número de variáveis que poderiam influenciar nos resultados (temperatura, umidade do subleito, espessuras e posição das camadas, bem como o posicionamento exato dos dois equipamentos), a execução das medidas dos dois equipamentos foi sequencial. A figura 5.4 ilustra o levantamento executado no trecho do km 10,5 ao km 11,5 da rodovia SP 303.



Figura 5.4 – Vista geral do levantamento deflectométrico –SP 303. Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.

Inicialmente foi realizado a medida de deflexão com o equipamento FWD, conforme apresentado na figura 5.5. O local onde foi posicionado o aplicador de carga foi demarcado no pavimento, possibilitando que a medida com a Viga Benkelman fosse executada exatamente no mesmo local (figura 5.6). Para a medição das deflexões com a Viga Benkelman, foram utilizados os métodos de ensaio DNER-ME 24/94 - determinação das deflexões pela Viga Benkelman e DNER-ME 61/94 - delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman, sendo ainda utilizado para a calibração da Viga Benkelman o procedimento DNER-PRO 175/94 - Aferição de viga Benkelman conforme Anexo D, para as medições com o FWD foi utilizado o procedimento DNER-PRO 273/96 - Determinação das deflexões utilizando o deflectômetro de impacto tipo “falling weight deflectometer - FWD”.

As planilhas com os resultados de campos são apresentadas nos Anexos A, B e C deste trabalho.



Figura 5.5 – Levantamento deflectométrico com FWD Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.



Figura 5.6 – Levantamento deflectométrico com Viga Benkelman Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.

As deflexões obtidas com o FWD devem ser normalizadas para a carga do semi-eixo padrão de 4.100 kgf, com o intuito de eliminar a influência da variação do carregamento. Pois mesmo mantendo-se fixa a configuração do carregamento, há variações na temperatura do pavimento alteram assim o valor da carga aplicada, devido à variação da rigidez da camada asfáltica. Para exemplificar, com a diminuição da temperatura ocorre um aumento na rigidez da camada asfáltica e conseqüentemente um aumento no valor da carga aplicada. A normalização da carga é executada segundo a expressão a seguir:

$$\text{Deflexão normalizada} = \text{deflexão FWD} \times \frac{\text{Carga Padrão}}{\text{Carga FWD}}$$

Onde:

Carga Padrão: carga de 4.100kgf.

As deflexões medidas com FWD e Viga Benkelman são ilustradas nos gráficos de deflectogramas do anexo E.

5.5 – Comparação entre a Viga Benkelman e o FWD

Primeiramente, as oito estruturas foram separadas de acordo com o tipo de base, sendo: Base Granular, Base Cimentada e Base de Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL).

A tabela 5.3 apresenta a divisão dos trechos de acordo com o tipo de base. Estabeleceu-se então, uma correlação para cada grupo conforme gráficos das figuras 5.7 para granular; figura 5.8 para SAFL e figura 5.9 para cimentada, visto que o comportamento deflectométrico entre os trechos com mesmo tipo de base apresenta resultados semelhantes.

Tabela 5.3 – Trechos divididos de acordo com o tipo de base

Base	Rodovia	Trecho	
		Km ini	Km fim
Granular	SP 255	84,000	85,000
	SP 253	221,000	222,000
	SP 261	5,000	6,000
Cimentada	SP 293	24,800	23,800
	SP 331	94,500	95,500
	SP 315	28,800	27,800
SAFL	SP 149/215	4,120	5,120
	SP 303	10,500	11,500

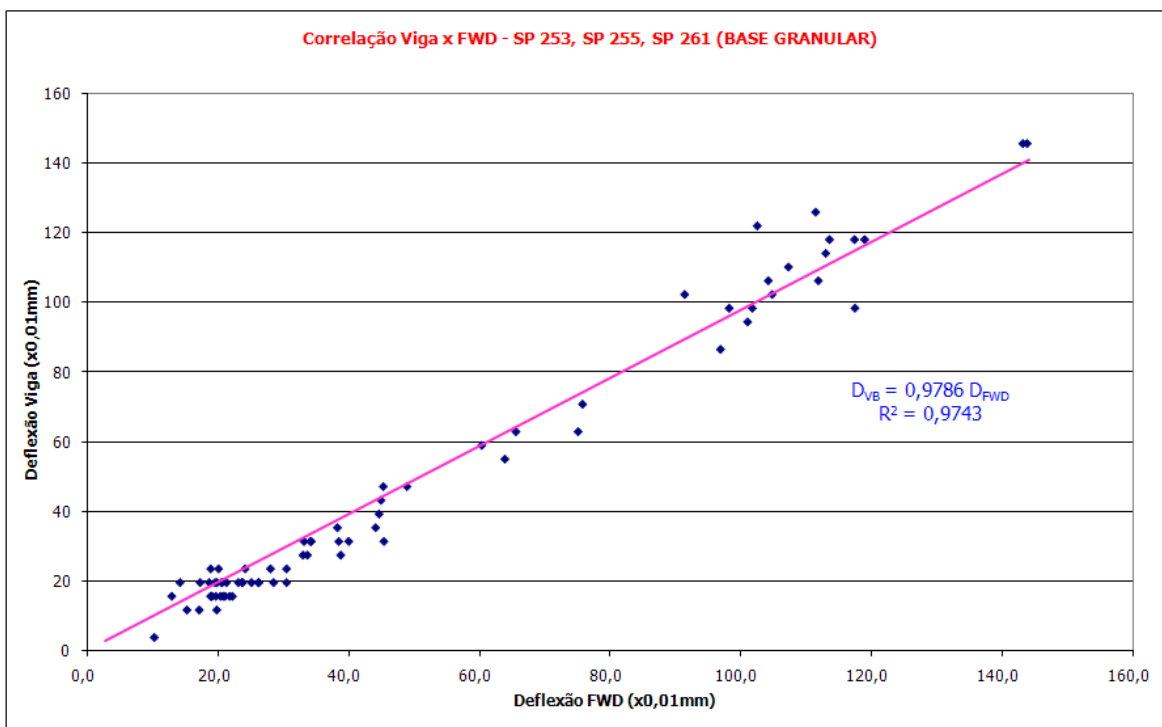


Figura 5.7 – Correlação Viga Benkelman x FWD –Base Granular Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.

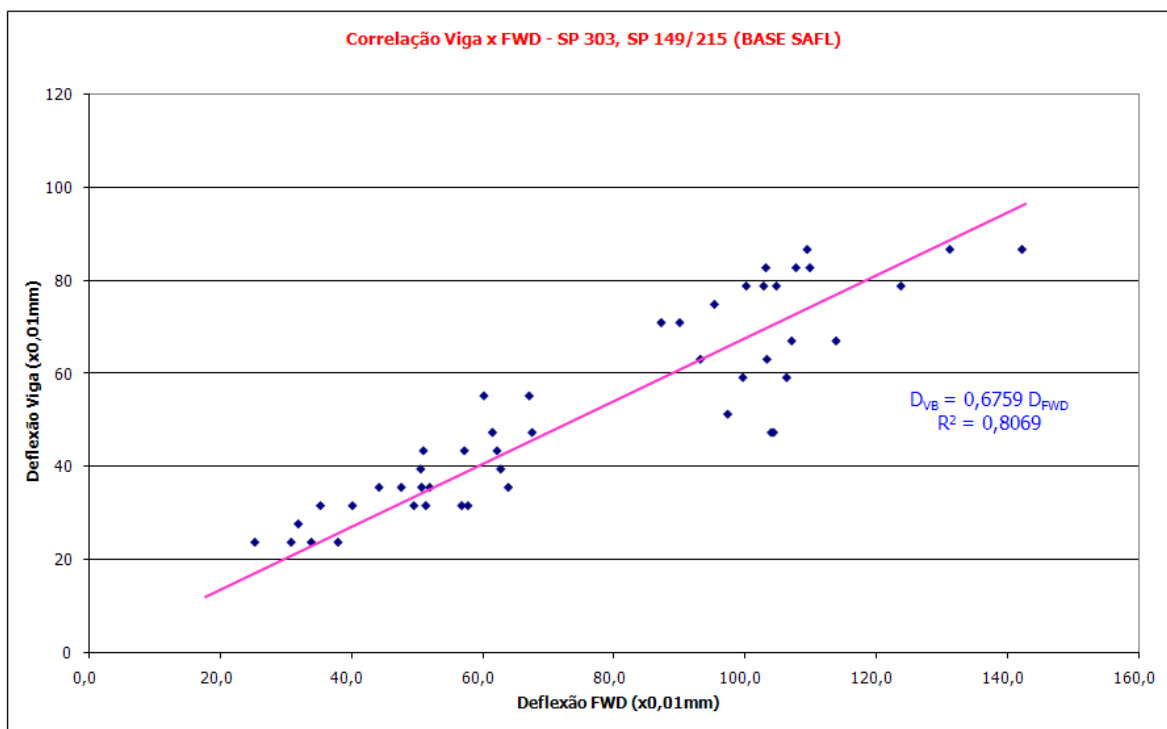


Figura 5.8 – Correlação Viga Benkelman x FWD –Base SAFL Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.

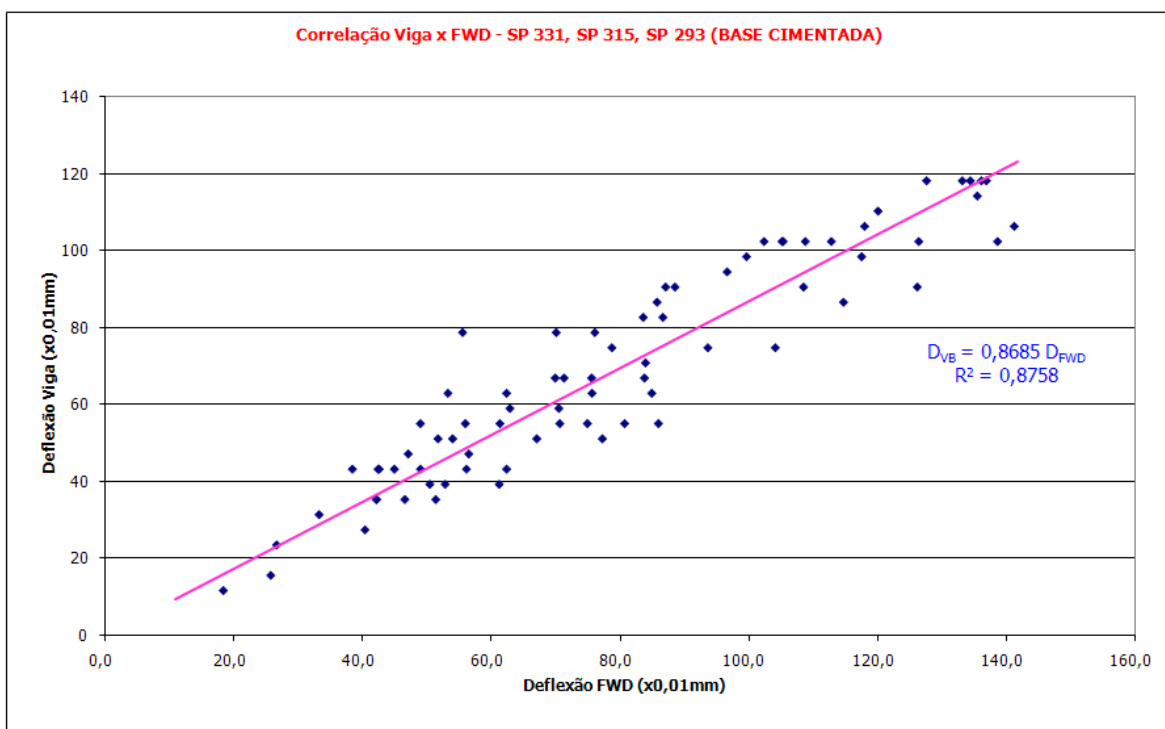


Figura 5.9 – Correlação Viga Benkelman x FWD –Base Cimentada Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.

Tabela 5.4 – Tabela resumo de D_{VB} e R^2

Tipo de Base	D_{VB}	R^2
GRANULAR	$D_{VB}=0,9786 \times D_{FWD}$	0,9743
SAFL	$D_{VB}=0,6759 \times D_{FWD}$	0,8069
CIMENTADA	$D_{VB}=0,8685 \times D_{FWD}$	0,8758

Fonte: adaptado do DER-SP 2005.

Além disto procurando uma correlação única entre as medidas de deflexão entre FWD e Viga Benkelman para o conjunto dos trechos de estudo, foi então realizada uma regressão linear entre os valores medidos independentemente do tipo de base e passando pela origem, conforme ilustrado na figura 5.10.

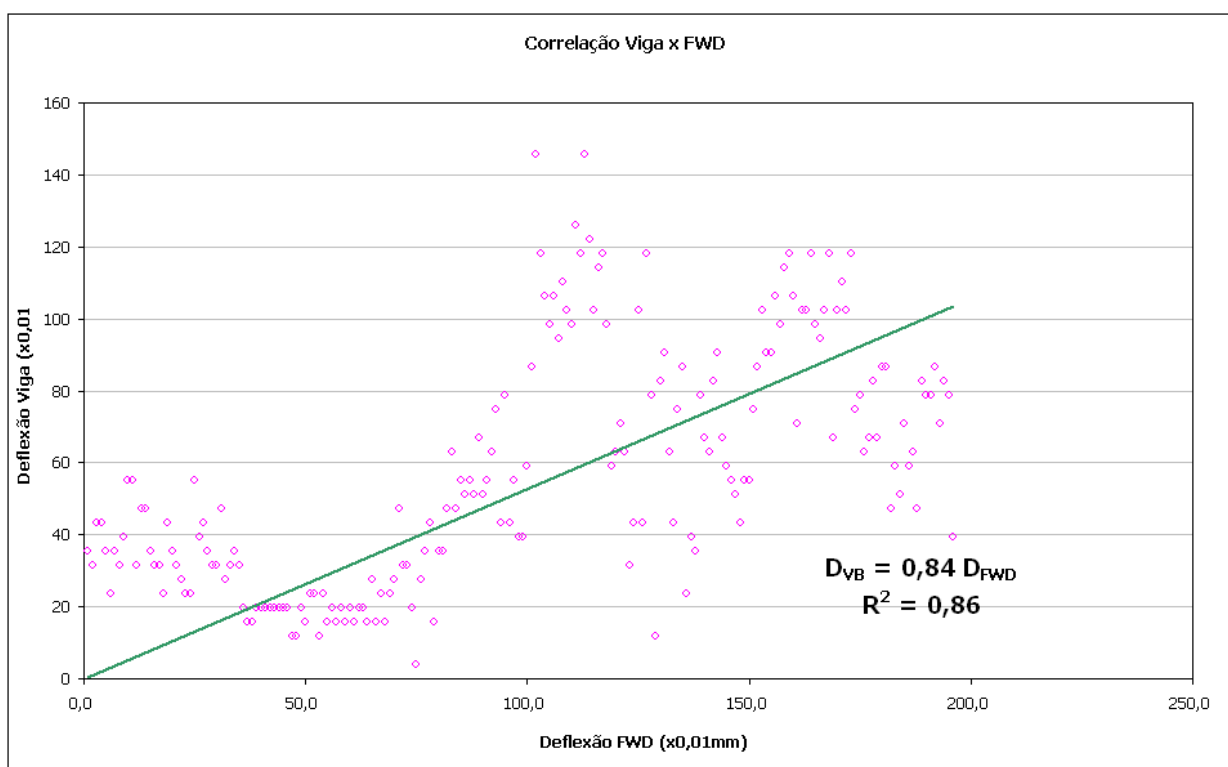


Figura 5.10 – Correlação Única Viga Benkelman x FWD Fonte: acervo Planservi Engenharia Ltda.

5.6 – Análise Crítica das Equações de Correlações de deflexões com os dois Equipamentos FWD e Viga Benkleman

Com o intuito de demonstrar que não existe, uma correlação única aplicável para correções de leituras com FWD para Viga Benkelman, foi realizado uma retroanálise variando-se os módulos de elasticidade das camadas, com o programa Laymod a fim de encontrar os módulos dinâmicos e a bacia de deflexões calculada, conforme apresentado no Anexo F, estes resultados foram analisados comparando-se as bacias de campo FWD com as 64 bacias calculadas pelo Laymod, para cada grupo de base : granular SP-261, cimentada SP-331 e solo arenoso fino laterítico SP-303. Ao todo foram retroanalisadas 192 bacias.

O tratamento adotado em seguida foi a definição de uma bacia característica para cada trecho, tendo em vista o fato de que durante os levantamentos executados em campo verificou-se pouca variabilidade entre medidas e as isoladas foram descartadas; Plotou-se os gráficos comparativo de bacias retroanalisadas versus bacias de campo, gráficos apresentados no Anexo F. Posteriormente selecionou-se as curvas de aproximação que atenderiam o critério de correlação estabelecidos no estudo do DER/SP, sendo encontradas 11 (onze) bacias para bases granulares, 6 (seis) bacias para bases cimentadas e apenas 4 (quatro) para bases de SAFL. Definidas as bacias procede-se a avaliação com o programa ELSYM5, considerado o eixo-padrão adotado para os levantamentos (dimensões e cargas) , ou seja utilizando o carregamento da viga Benkelman, e calcula-se a deflexão com Viga para os módulos retroanalisados a partir do FWD conforme Anexo F, buscando-se um novo critério para previsão de desempenho e projeto de pavimentos, para três níveis de tráfego 5×10^6 ; 1×10^7 e 5×10^7 .

Os resultados são então cuidadosamente analisados para definir quais critérios definem melhor a resposta da estrutura do pavimento, em cada caso. Os procedimentos mais adequados foram aplicados pelos DNER PRO-11/79 e DNER PRO-269/94, além das análises mecânicas Anexo G.

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas resumos 5.5, 5.6 e 5.7.

Tabela 5.5 – Tabela resumo de módulos dinâmicos e deflexões D_{VB} e D_{FWD} .

Tipo de Base	Expressão	FWD				VB			
		E_1	E_2	E_3	D_{FWD}	E_1	E_2	E_3	D_{VB}
Granular	$D_{VB}=0,9786.D_{FWD}$	15000	2800	500	118	15500	2850	500	101
SAFL	$D_{VB}=0,6759.D_{FWD}$	15000	2000	1200	90	16000	2100	1200	62
Ciment.	$D_{VB}=0,8685.D_{FWD}$	32000	4000	1800	48	33000	4100	1800	39
Média	$D_{VB}=0,8400.D_{FWD}$								

Tabela 5.6 – Tabela resumo métodos PRO-11, PRO-269 e Análise Mecanística para Viga D_{VB}

TIPO DE BASE	RODOVIA	ESPESSURA DE REVESTIMENTO EXISTENTE (cm)	MÉTODO	D _{VB}	h ref (cm) EM FUNÇÃO DO N		
					N=5,00E+06	N=1,00E+07	N=5,00E+07
GRANULAR	SP261	3,5	PRO-11/79	101	6,9	9,1	14,1
			PRO-269/94		4,7	6,5	11,2
			MECANICISTA		9,0	11,6	19,2
SAFL	SP303	2,0	PRO-11/79	62	-	0,4	5,4
			PRO-269/94		0,0	0,0	12,9
			MECANICISTA		0,0	1,5	8,4
CIMENTADA	SP331	5,0	PRO-11/79	39	2,3	4,5	9,5
			PRO-269/94 (CONDIÇÃO DE BASE ÍNTEGRA - FATOR Dadm=0,50)		1,5	16,1	22,8
			PRO-269/94 (CONDIÇÃO DE BASE PARCIALMENTE DETERIORADA FATOR Dadm=0,70)		-	-	15,4
			MECANICISTA		3,2	5,7	12,5
				Dadm (PRO-11/79)	68	60	45
				Dadm (PRO-269/94)	77	68	50

Notas: Admitiu-se solo do subleito tipo II quanto a resiliência

PRO11/79 - FÓRMULAS

$$Dadm = 1023 N^{-0,176}$$

$$href = 40 \log \frac{Dc}{Dadm}$$

Tipo	I_1	I_2
I	0	0
II	1	0
III	0	1

PRO269/94 – FÓRMULAS

$$Dadm = 10^{3,148-0,188 \log N}$$

$$href = -19,015 + \frac{238,14}{\sqrt{Dadm}} - 1,357 hef + 1,016 I_1 + 3,893 I_2$$

$$Heff = -5,737 + \frac{807,961}{Dc} + 0,972 \times I_1 + 4,101 \times I_2$$

Tabela 5.7 – Tabela resumo métodos PRO-11, PRO-269 e Análise Mecanística para FWD D_{FWD} .

TIPO DE BASE	RODOVIA	ESPESSURA DE REVESTIMENTO EXISTENTE (cm)	MÉTODO	D _{FWD}	h ref (cm)		
					N=5,00E+06	N=1,00E+07	N=5,00E+07
GRANULAR	SP261	3,5	PRO-11/79	118	9,6	11,7	16,7
			PRO-269/94		6,2	8,1	12,8
			MECANICISTA		11,0	13,5	21,0
SAFL	SP303	2,0	PRO-11/79	90	4,8	7	12
			PRO-269/94		6,4	8,2	12,9
			MECANICISTA		4,9	7,0	12,0
CIMENTADA	SP331	5,0	PRO-11/79	48	5,9	8,1	13,1
			PRO-269/94 (CONDIÇÃO DE BASE ÍNTEGRA - FATOR Dadm=0,50)		13,5	16,1	22,8
			PRO-269/94 (CONDIÇÃO DE BASE PARCIALMENTE DETERIORADA FATOR Dadm=0,70)		-	9,8	15,4
			MECANICISTA		6,5	8,9	15,5
				Dadm (PRO-11/79)	68	60	45
				Dadm (PRO-269/94)	77	68	50

Para tais análises, com vistas simplesmente de aplicação dos métodos de reforço estrutural, foi suposto um reforço de concreto asfáltico em função da deflexão atuante versus a deflexão admissível para o PRO-11 e PRO-269 e análise mecanística com simulações interativas de sistemas de três camadas. Os resultados obtidos puderam confirmar a grande dispersão de reforço aplicados em trechos de diferentes número “N” e até mesmo em trechos com o mesmo tráfego. As espessuras de reforço estruturais obtidos para cada tipo de base são indicadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Tabela resumo do Δh ref (cm) em função do tráfego, base e deflexão FWD e Viga.

TIPO DE BASE	MÉTODO	D_{VB}	D_{FWD}	Δh ref (cm)		
				N=5,00E+06	N=1,00E+07	N=5,00E+07
GRANULAR	PRO-11/79	101	118	2,7	2,6	2,6
	PRO-269/94			1,5	1,6	1,6
	MECANICISTA			2,0	1,9	1,8
SAFL	PRO-11/79	62	90	4,8	6,6	6,6
	PRO-269/94			6,4	8,2	0,0
	MECANICISTA			4,9	5,5	3,6
CIMENTADA	PRO-11/79	39	48	3,6	3,6	3,6
	PRO-269/94 (CONDIÇÃO DE BASE ÍNTEGRA - FATOR $D_{adm}=0,50$)			12,0	-	-
	PRO-269/94 (CONDIÇÃO DE BASE PARCIALMENTE DETERIORADA FATOR $D_{adm}=0,70$)			-	9,8	0,0
	MECANICISTA			3,3	3,3	3,0

5.7 – Análise dos Resultados

Com base nos resultados obtidos pode-se constatar:

O tratamento estatístico dos trechos mostrou que em um mesmo segmento, as leituras com a viga têm um maior grau de dispersão, se comparadas com o FWD, mostrando a importância de evoluirmos para leituras mais eficazes. Dentre os três grupos de estruturas estudados, os segmentos com base granular apresentaram a menor dispersão, seguidos pelos trechos com base de SAFL e por último os trechos com base cimentada;

Apesar destes resultados, a análise de todos os segmentos juntos, independente do material da base, a equação resultante $D_{VB} = 0,84 \times D_{FWD}$ apresentou R^2 igual a 0,86. Para estes trechos estudados, as deflexões medidas com o equipamento FWD representam, portanto, aproximadamente 84% das medidas obtidas com a Viga Benkelman.

Na tabela 5.4 foram apresentadas as correlações para os trechos com base granular, cimentada e solo arenoso fino laterítico, respectivamente. Observa-se que para os trechos de base granular houve uma menor dispersão em torno da regressão, que se aproxima de 1. Já para os trechos com base de SAFL, a relação entre as medidas com a Viga Benkelman e o FWD aproximou-se de 0,7; apresentado a maior dispersão entre os três grupos. Os trechos com base cimentada apresentaram comportamento intermediário. Isto demonstra, que para diferentes tipos de estrutura de pavimento, a análise de regressão mostrou, correlação entre os dados de viga e FWD diferentes variando de 2% a 19%, portanto, elas só são válidas para estes intervalos de valores sendo que estas correlações só podem ser aplicadas aos pavimentos das rodovias em estudo, segundo sua estrutura.

Com base nos valores de correlações para os três tipos de bases: granulares, cimentadas e SAFL, as deflexões obtidas com a Viga Benkelman são menores que as determinadas através do equipamento do tipo FWD, ao contrário ao que o Manual de

Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT 2006 preconiza: “as deflexões características Benkelman e os respectivos desvios padrões possuem valores superiores aos obtidos pelo FWD”(DNIT, 2006), No entanto o mesmo Manual afirma que “não existem correlações de aplicação generalizada”(DNIT, 2006), Este fato ilustra a necessidade e a importância do estudo de correlações caso a caso.

A partir das análises efetuadas, pode-se concluir que é necessário converter-se os valores obtidos para a deflexão de FWD, quando estes forem utilizados em metodologias de cálculo de reforço ou sistema de gerência que considerem os valores obtidos com a viga Benkelman. No caso de cálculo de espessura de reforço, a não correção ou incorreta correlação pode levar a um sub-dimensionamento ou superdimensionamento de 6,0cm na espessura de reforço para o tráfego da ordem de $5,0 \times 10^6$ e de 3,0cm na espessura de reforço para o tráfego da ordem de $5,0 \times 10^7$;

Embasado no estudo paramétrico realizado com o programa ELSYM5, os métodos DNER PRO-11/79 e DNER PRO-269/94 apontaram espessuras de reforço para os segmentos homogêneos bastante diferentes. Este fato vem ressaltar a importância da mecânica dos pavimentos no dimensionamento racional de pavimentos novos e de reforços estruturais.

Diante destes pontos de subjetividade e imprecisão, ainda se somam outros agravantes. É prática comum que gestores de projetos ajustem os dados após os trabalhos dos engenheiros projetista, por razões executivas e/ou financeiras da obra, por vezes embasando todo o projeto, isto mostra que fatores “especulativos” das condições do pavimento, não devem ser utilizados em nível de projeto.

No que concerne ao critério de confiabilidade ajustem de projetos como por exemplo, dados de tráfego - não raro minorados - e/ou valores de deflexão recuperável máxima (d_0) Viga versus FWD. Estes ou outros parâmetros levados em consideração isoladamente ou em substituição de um número maior de levantamentos não são suficientes para caracterizar a confiabilidade do projeto com precisão.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

No atual estágio de conhecimento, verifica-se que a utilização de somente o valor de deflexão máxima como critério de caracterização estrutural do pavimento na execução de projetos de reforço pode levar a espessuras inadequadas. Quando analisado isoladamente, este valor de deflexão pode levar a erros na sua interpretação.

Dessa forma, é recomendável que sejam definidos um ou mais parâmetros deflectométricos de fácil obtenção que, em conjunto com o deslocamento vertical máximo recuperável, defina características estruturais mais precisas sobre o estado do pavimento em termos de durabilidade, fornecendo elementos que permitam avaliar a sua capacidade estrutural e eventuais necessidades ao longo do tempo.

As medidas de deslocamentos verticais recuperáveis da superfície dos pavimentos sofrem uma influência muito grande devido ao carregamento ensaio (dinâmico ou estático), (a magnitude, o formato do contacto da carga com a superfície, a quantidade e a duração da carga), respostas diferentes dos materiais (módulo dinâmico x módulo estático) e o clima (umidade e temperatura).

As vantagens da utilização do FWD são as deflexões geradas que mais se aproximam dos deslocamentos verticais recuperáveis produzidos por um caminhão carregado em movimento, bem como o aspecto de rapidez para variar a carga aplicada, além de agilizar o ensaio, permite avaliar a não linearidade, no comportamento tensão-deformação, dos materiais constituintes das camadas do pavimento. Além disso, os ensaios executados por um mesmo equipamento apresentam maior acurácia e repetibilidade de resultados, sendo que é possível medir e registrar automaticamente as temperaturas do ar e da superfície do pavimento (equipamentos mais modernos) e das distâncias percorridas entre estações de ensaio.

A retroanálise deve e pode ser usada na avaliação estrutural de pavimentos uma vez que o FWD propicia a bacia de deflexão ponto a ponto, desta maneira utilizando a retroanálise resulta em uma metodologia que resultem em módulos coerentes com o material da camada existente e não a adoção de módulos de literaturas, sendo essencial que apresentem grau de ajuste satisfatório entre a bacia de campo e a bacia teórica.

A presente pesquisa ressalta a importância da realização de estudo de correlação caso a caso sendo este um dos fatores que culminaram no início deste trabalho.

Esta pesquisa teve como motivação à necessidade prática de projeto, onde cada projetista acaba fazendo ou adotando a sua correlação que mais lhe convir seja por exigência do cliente ou por garantia do projeto.

Como recomendações para continuidade da pesquisa e desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar novas correlações obtidas através da mesma metodologia aplicada neste estudo do DER/SP para várias estruturas de pavimentos de outras regiões do estado e do país;
- Calibração das metodologias existentes caso a caso ou desenvolvimento de novas metodologias de dimensionamento de espessuras de reforço em função dos dados obtidos com FWD ;
- Realização do DIA do FWD “FWD DAY” como é feito na Holanda a base bienal desde o final da década de 80, comparando-se os equipamentos Falling Weight Deflectometers das empresas fornecedoras de serviço com o objetivo de estudar a repetibilidade e a correlação de cada FWD;

- Realizar novas correlações entre Viga Benkelman e o FWD considerando temperaturas mais elevadas no CBUQ, para que possa ser considerada a parcela visco-elástica da estruturas versus o carregamento estático da viga e dinâmico do FWD.
- Realizar novas correlações entre Viga Benkelman e o FWD considerando a questão da umidade no subleito, para que possa ser extraído um fator de sazonalidade para o FWD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALBANO, J. F. Efeitos da Variação da Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento. Porto Alegre, 1998.

ALBANO, J. F. Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos. Porto Alegre, 2005.

ALBERNAZ, C.A.V. Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão. Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, E. S. A questão da eficiência dos modos de transporte. São Paulo, 2001.

ANDREATINI, L.P.V. Um método para a análise e interpretação das deflexões em pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1967.

ANDREATINI, L.P.V. Um método para a análise e interpretação das deflexões em pavimentos flexíveis. IPR/DNER, 1970.

ANDREATINI, L.P.V. Dimensionamento de Reforço em Pavimentos Flexíveis - Sugestões no DNER – PRO – 11/79. Florianópolis, 1988.

ARATANGY, N.J. Medida de deformação dos pavimentos de solo-cimento. Rio de Janeiro, 1962.

ARATANGY, N.J. e ANDREATINI, L.P.V. Um método para a análise e interpretação das deflexões em pavimentos flexíveis. IPR/DNER, 1969.

ARAÚJO, M. P. Infraestrutura de transporte e desenvolvimento regional: uma abordagem de equilíbrio geral inter-regional. Piracicaba, 2006.

BALBO, J. T. Pavimentos asfálticos – patologias e manutenção. São Paulo, 1997.

BOHN, A. O. The history of the Falling Weight Deflectometer (FWD), Dinamarca, 1985.

BORGES, C. B. S. Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga benkelman e fwd pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

CAMPOS, O.S., GUIMARÃES, S. R. R., E RODRIGUES, R.M. Avaliação Estrutural dos Pavimentos da Rodovia Governador Carvalho Pinto. Cuiabá, 1995.

CARDOSO, S. H. Avaliação estrutural não - destrutiva de pavimentos de aeroportos – a experiência brasileira. São Paulo, 1992.

CARDOSO, S. H. Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos. Cuiabá, 1995.

CARNEIRO, F.B.L. Viga Benkelman - Instrumento auxiliar do Engenheiro de Conservação. Rio de Janeiro, 1965.

CARNEIRO, F.B.L.; SILVA, H. C. M.; Determinação do raio de curvatura da linha elástica de deflexão com utilização da viga Benkelman dupla. Olinda, 1981.

CROW REPORT D08-01.; FWD Comparative Day. Holanda , 2007.

DAROUS, J. Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 2006.

DUARTE, J.C., SILVA, P.D.E.A., FABRÍCIO, J.M. Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidos com a Viga Benkelman e com o FWD – Falling Weight Deflectometer. Salvador, 1996.

EPPS, J.A.; MONISMITH, C.L. Equipment for obtaining pavement condition and traffic loading data. Washington, 1986.

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. Florianópolis, 1988.

FABRÍCIO, J.M.; SILVA, G.A.; GONÇALVES, E.A. Método Simplificado de Retroanálises em Pavimentos Flexíveis. Belo Horizonte, 1994.

FARIAS, M.M., MONTEIRO, S.A. Utilização de modelos elásticos lineares e não-lineares na retroanálise de propriedades de pavimentos. Salvador, 1996.

GALVÃO, O.J.A. Desenvolvimento dos transportes e integração regional no Brasil: uma perspectiva histórica. Brasília, 1996.

GOMES, B. J. M.; GOMES, G.; SALES, T. L. Avaliação da aplicabilidade entre procedimentos para projeto de restauração de pavimentos asfálticos rodoviários. São Paulo, 2007.

GONÇALVES, F.P.; CERATTI, J.A.P. Utilização do Ground Penetration Radar na Avaliação de Pavimentos. São Paulo, 1998.

GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A. P.; RODRIGUES, R. M.; SOMACAL N., L. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico: construção e instrumentação de seções-teste**. Brasília, 2000.

GONTIJO, P.R.A., GUIMARÃES, F.H.R., NOGUEIRA, C.L. **Metodologias Brasileiras para Avaliações das Características Funcionais e Estruturais de Pavimentos Rodoviários – Estado da Arte**. Belo Horizonte, 1994.

HAAS, R.; HUDSON, W.R; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Malabar, 1994.

HIMERO, K., MARUYAMA, T., KASAHARA, A. **Development of Pavement Evaluation System Using the Falling Weight Deflectometer**. 2º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço - SINAPRE, Rio de Janeiro, 1989.

HOFFMAN, M.S.; THOMPSON, M.R. **Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices**. *Transportation Research Record*, nº 852, Washington, D.C.; USA, 1982.

HUANG, Y. H. **Pavements Analysis and Design**. New Jersey, 1993.

KENNEDY, C. K.; GARDINER, J. L. **The British pavement deflection data logging machine and its operation**. Trondheim, Norway, 1982.

KOEHLER, L.F.S., SILVA, L.M.M, FERNANDES, W.F. **Emprego da Deflectometria no Controle da Qualidade de Serviços de Pavimentação**. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 1996.

LYTTON, R.L., SMITH, R.E. **Use of Nondestructive Testing in Design of Overlays for Flexible Pavements**. Washington, 1985.

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 1996.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. São José dos Campos, 1996.

MASER, K. R. **Evaluation of Pavements and Bridge Decks at Highway Speed Using Ground Penetrating Radar. Proceedings**. ASCE Structures Congress XIV. Chicago, 2001.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, 1997.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., **Utilização de Ensaios Defletométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Belo Horizonte, 1994.

MOMM, L., DOMINGUES, F. A. A. **Efeitos da Graduação dos Agregados nas Misturas Asfálticas**, Salvador, 1996.

MOREIRA, M. R. P. **Um método de avaliação de pavimentos flexíveis com base no raio de curvatura da linha elástica das deflexões**. Curitiba, 1977.

NAGAO, E. M. **Considerações de parâmetros de curvatura da bacia de deformação e do número estrutural no dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis**. São Paulo, 2001.

NASCIMENTO, A. **R\$ 2 bilhões para recuperar rodovias**. Natal, 2004.

NEBLAUER, S. **Reinforcement of Flexible Pavements – Design of Finite Elements Models**. Lisboa, 2002.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, S.T.; FABRÍCIO, J.M. **Variações mensais de deflexões medidas com viga Benkelman**. In: 8ª Reunião Anual de Pavimentação, pp.159-196, Recife, PE, Brasil, 1967.

OLIVEIRA, S.T.; FABRÍCIO, J.M. **Variações mensais de deflexões medidas com viga Benkelman**. IPR/DNER 1968.

PAIVA, C.E.L., CAUSIM, P.B. **Estudo de Avaliações das Condições Estruturais de um Pavimento a Partir de Bacias de Deformação**. Brasília, 2000.

PÊGO FILHO, B.; CÂNDIDO JUNIOR, J.O.; PEREIRA, F. **Investimento e financiamento da infraestrutura no Brasil**. Brasília, 1999.

PEREIRA, A. M. **Análise das Condições de Deformabilidade dos Reforços com Base na Experiência Californiana**. Curitiba, 1975.

PEREIRA, J. M. **Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática**. São Carlos, 2007.

PINTO, I. E., DOMINGUES, F. A. A. **A Contribuição ao Estudo de Correlação entre Equipamentos Medidores de Deflexões: Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer – FWD**. Auburn, 2001.

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. A; PREUSSLER, E.S **Consideração da Resiliência no Projeto de Pavimentos**. Rio de Janeiro, 1994.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro, 2001.

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

PREUSSLER, E.S.; PINTO, S. **Proposição de método para o projeto de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência**. In: 17ª Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, DF, Brasil, 1983.

PORTO, P.J.P. **Viga Benkelman na execução do pavimento**. Simpósio sobre a Rodovia dos Bandeirantes, DERSA, São Paulo, 1978.

RABAÇA, S. R. ; MACÊDO, J. A. G. ; MEDINA, J.; VIANNA, A.A.D. E MOTTA, L.M.G. **Avaliação estrutural de trechos experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – análise preliminar**. Cuiabá, 1995.

RAMOS, C. R.; TIZO L.; V.L.E.S.; SCHILLING, A.B.Z.K.; PEREIRA, M.T.T.Q. E CONÇEIÇÃO, M.G.L.B. **Controle tecnológico com a viga Benkelman no município do Rio de Janeiro**. São Paulo, 2000.

RIBEIRO, C. S. **Concessões Rodoviárias e Meio Ambiente**. São Bernardo do Campo, 2005.

ROCHA FILHO, N.R.; RODRIGUES, R.M. **A Avaliação Estrutural dos Pavimentos por Meio de Levantamento Deflectométricos**, Salvador, 1996.

ROCHA FILHO, N. R.; RODRIGUES, R. M. **“Levantamentos Deflectométricos: Fatores que Influenciam na Previsão de Desempenho de Pavimentos”**. São Paulo, 1998.

RODRIGUES, R. M. **Estudo dos Trincamentos dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991.

RODRIGUES, R. M. **Aplicação da Mecânica dos Pavimentos ao Projeto e à Avaliação Estrutural dos Pavimentos Asfálticos**. Cuiabá, 1995.

ROMERO, R., RUIZ, A., RODIL, R., LECHUGA, M.A. **Variation of Deflection with Measuring Equipment and Load Speed on Test Track**. Transportation Research Board 1448, Washington, DC, 1994.

RUIZ, C. L. **Sobre el calculo de espesores de refuerzo de pavimento**. In: 5ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1964.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturado a frio**. Rio de Janeiro, 1989.

SESTINI, V. M. **Correlação dos resultados de equipamentos tipo FWD com os da Viga Benkelman**. São Paulo, 1998.

SILVA, M. C. **Avaliação funcional e estrutural das vias asfaltadas da UFV**. Viçosa, 2006.

SOARES, J. B.; SOARES, R. F. **Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.

STRIEDER, A. J.; GONÇALVES, F. P.; SALVADORETTI, P.; CERATTI, J. A.; KLEIN S.L. & HIRAKATA A.M. **Aplicação de geo-radar em investigação de pavimentos rodoviários: estudo de casos em estruturação estratigráfica e em degradação**. Porto Alegre, 2004.

SUZUKI, C. Y.; SOUZA, P. R. B.; NAGAO, E. M. **Procedimento para a Determinação de Espessura de Recapeamento em Função de Parâmetros de Curvatura (Relação R/D) do Pavimento Flexível Existente**. São Paulo, 1998.

THOLEN, O.; SHARMA, J.; TERREL, R. **Comparison of Falling Weight Deflectometer with Other Deflection Testing Devices**. Washington Transportation Research Board – National Research Council. Washington, 1985.

UDDIN, W., MEYER, A.H., HUDSON, W.R., STROKOE, K.H. **Project-Level Structural Evaluation of Pavements Based on Dynamic Deflections**. Transportation Research Board 1007, Washington, DC, 1985.

ULLIDTZ, P. **Pavements Analysis**. Nova Iorque, 1987.

ZUBE, E.; FORSYTH, R. **Flexible pavement maintenance requirements as determined by deflection measurement**. Washington, D.C.; USA, 1966.

SITES DE INTERNET

TIZZOT, R. W. **Rodovias sem conservação, prejuízos para o setor.** Disponível em: Financial and Institutional Reform of Road Conservation in Latin America and the Caribbean Technical Cooperation Program of the Federal Republic of Germany – Documentos: Reforma financeira e institucional da conservação viária, postado em 2004. <<http://www.zietlow.com/docs/pordocs.htm>>. Acesso em 24 de Junho de 2008.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Assessoria De Estatísticas E Pesquisas. Pesquisa Rodoviária.** Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/cnt/>>. Vários acessos.

COPAVEL ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. Disponível em: <<http://www.copavel.com.br/servicos.htm>>. Acesso em 21 de Abril de 2008.

DENATRAN. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/>>. Vários acessos.

DYNATEST ENGENHARIA LTDA. Disponível em: <http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm>; <<http://www.dynatest.com/services/equipment.htm>>. Vários acessos.

ERIKUAB ENGINEERING & RESEARCH INT'L. INC. Disponível em: <www.erikuab.com/kuab.htm>. Acesso em 13 de Junho de 2008.

SLOVENSKÁ SPRÁVA CIEST. Disponível em: <WWW.ssc.sk/user/view_page.php?page_id=450>. Vários acessos.

WSDOT. Disponível em: <<http://training.ce.washington.edu/WSDOT>>. Acesso em 31 de Março de 2008.

GRONTMIJ | CARL BRO GROUP. Disponível em: <<http://www.pavementconsultants.com/en/Menu/About+us/History/FWDhistory/TheStoryofFWDs.htm>> **The Story of Falling Weight** . Acesso em 30 de Março de 2009.

FORMAT - Fully Optimised Road Maintenance. Disponível em: <<http://www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=9e031ab2077546cdabe9d4610c621c0f&SourceDatabasId=9cd97ac2e51045e39c2ad6b86dce1ac2>> Acesso em 30 de Maio de 2009.

VEJDIREKTORATET. Disponível em: <<http://www.vejdirektoratet.dk>>. Acesso em 20 de Maio de 2009.

NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT PRO 007/03:** Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 008/78:** Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 1978.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 009/2003 - PRO:** Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 010/79:** Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento “A”. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 011/79:** Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento “B”. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 061/94:** Pavimento – delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 159/85:** Projeto de restauração de pavimentos flexíveis semi-rígidos. Rio de Janeiro, 1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 175/94:** Aferição da viga Benkelman - Procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 024/94:** Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelmann).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **GUIA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**, Rio de Janeiro, 1983.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 269/94:** Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 273/96:** Determinação das deflexões utilizando deflectômetro de impacto do tipo “ Fallinig Weight Deflectometer (FWD) - Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

REFERÊNCIA DE APOIO

ASHTO (1993). Guide for Design of Pavement structures. Washington.

AASHTO T222-81 (1981). "Nonrepetitive Static Plate Load for Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements"

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004, NBR 15087, "Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral".

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

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E1926/98, " Standard practice for computing International Roughness Index of roads from longitudinal profile measurements", ASTM, EUA, 1999.

BORGES, C. B. S.; TRICHÊS, G.; (2003). "Estudo comparativo entre medidas de deflexão com a viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina". In: 34ª Reunião anual de Pavimentação. Campinas, SP, Brasil.

BURMISTER, D. M. (1943). "The theory stresses and displacement in layered ystems and aplications to the design of airport runways. Proceedings, HRB. 23. Annual Meeting. Washington, DC, 194, v23, p. 126-48.

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

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

DER/SP (2005). RT-SP-000-000.000-P09/025 Estudo de correlação de deflexões medidas com viga Benkelman e FWD.

DNER ME - 039/94 (DNER, 1994h). Pavimento - determinação das deflexões pelo Dynaflect.

FONTUL, S.; ANTUNES, M.L.; FORTUNATO, E.; OLIVEIRA, M. Practical application of GPR in transport infrastructure survey. Athens, Greece, 2007.

GENOVEZ, A. I. B.; TEIXEIRA, E. N. “Instruções para Apresentação de Dissertações/Teses na FEC”. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

HVEEM, F. N.; (1955). “Pavement and Fatigue Failures”. Bulletin n.114, H.RB (TRB), Washington, DC.

LTPP (2002). LTPP Data Analysis: Variations in Pavement Design Inputs. NCHRP Web Document 48. Preparado por: STUBSTAD, R.N., TAYABJI, S.D., LUKANEN, E.O.

MARCON, A.F.; (1996). Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina. Tese de Doutorado. ITA, Rio de Janeiro.

MARGARIDO, R.A.; PINTO, I.E.; PREUSSLER, E.S., et al. (1998). “Ground Penetration Radar, (GPR)”. In: 31ª Reunião Anual de Pavimentação. V. 2pp. 889-897, São Paulo, SP, Brasil.

MONISMITH, C. L.; Pavement evaluation and overlays design summary and methods. Transportation Research Board. Washington, 1979.

RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, F. B. Critérios e equipamentos de avaliação de pavimentos flexíveis. Belém, 1990.

WSDOT (1995a). “Pavement Notes”. Vol 2. Washington State Department of Transportation.

WSDOT (1995b). “Pavement Analysis Computer Software and Case Studies” . Vol.3.

YODER, E.J.; WITCKZAK, M.W.; Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons, New York, 1975.

ANEXO A – Levantamentos deflectométricos com FWD (deflexão máxima normalizada)

São apresentados, os levantamentos deflectométricos com FWD, realizada nas oito rodovias estudadas.

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 255 - Pista Simples - Fxa Dir

Trecho: *SP 310 > Jau - Fxa Dir.

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
84,000	4.100	20,1
84,040	4.100	28,0
84,080	4.100	15,3
84,120	4.100	18,9
84,200	4.100	19,7
84,240	4.100	26,2
84,280	4.100	20,4
84,320	4.100	14,2
84,360	4.100	20,8
84,400	4.100	17,3
84,440	4.100	18,9
84,480	4.100	21,3
84,520	4.100	23,8
84,560	4.100	22,2
84,600	4.100	33,0
84,640	4.100	19,0
84,680	4.100	30,5
84,720	4.100	19,1
84,760	4.100	24,2
84,800	4.100	33,7
84,840	4.100	48,9
84,880	4.100	33,2
84,920	4.100	40,0
84,960	4.100	25,1
85,000	4.100	10,3
	Média	24
	D Pad	9
	D Carac	33
	Máximo	49
	Mínimo	10

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 253 - Pista Simples - Fxa Dir

Trecho: *Pradópolis > SP 333 - Fxa Dir

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	(kgf)	<i>Df1</i>
221,000	4.100	63,9
221,040	4.100	44,6
221,080	4.100	44,9
221,120	4.100	38,3
221,160	4.100	34,3
221,200	4.100	38,5
221,240	4.100	45,3
221,280	4.100	38,8
221,320	4.100	34,2
221,360	4.100	44,1
221,400	4.100	45,4
221,440	4.100	30,5
221,480	4.100	21,1
221,520	4.100	21,8
221,560	4.100	28,5
221,600	4.100	26,2
221,640	4.100	23,1
221,680	4.100	19,6
221,720	4.100	20,6
221,760	4.100	23,7
221,800	4.100	19,9
221,840	4.100	18,7
221,880	4.100	17,1
221,920	4.100	19,8
221,960	4.100	20,7
222,000	4.100	12,9
	Média	31
	D Pad	12
	D Carac	43
	Máximo	64
	Mínimo	13

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 261 - Pista Simples - Fxa Dir

Trecho: *SP 270 > Cerqueira Cesar

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
5,000	4.100	96,9
5,040	4.100	143,7
5,080	4.100	152,4
5,120	4.100	150,4
5,160	4.100	113,5
5,200	4.100	104,2
5,240	4.100	117,4
5,280	4.100	111,8
5,320	4.100	101,0
5,360	4.100	107,2
5,400	4.100	104,7
5,440	4.100	101,7
5,480	4.100	111,4
5,520	4.100	118,9
5,560	4.100	143,1
5,600	4.100	143,1
5,640	4.100	102,5
5,680	4.100	91,4
5,720	4.100	113,0
5,760	4.100	117,3
5,800	4.100	98,2
5,840	4.100	60,3
5,880	4.100	75,1
5,920	4.100	75,8
5,960	4.100	65,6
6,000	4.100	111,8
	Média	109
	D Pad	24
	D Carac	133
	Máximo	152
	Mínimo	60

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 293 - Pista Simples - Fxa Esq

Trecho: *SP 294 > Duartina - Fxa Esq

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada ($\times 10^{-2}$ mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
24,800	4.100	33,4
24,760	4.100	49,1
24,720	4.100	105,3
24,680	4.100	42,5
24,640	4.100	127,7
24,600	4.100	70,2
24,560	4.100	18,5
24,520	4.100	83,7
24,480	4.100	88,6
24,440	4.100	53,4
24,400	4.100	38,5
24,360	4.100	78,8
24,320	4.100	85,9
24,280	4.100	26,8
24,240	4.100	50,6
24,200	4.100	42,3
24,160	4.100	76,2
24,120	4.100	71,4
24,080	4.100	62,5
24,040	4.100	86,8
24,000	4.100	87,2
23,960	4.100	70,0
23,920	4.100	63,0
23,880	4.100	49,1
23,840	4.100	54,1
23,800	4.100	42,7
	Média	64
	D Pad	25
	D Carac	89
	Máximo	128
	Mínimo	18

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 331 - Pista Simples - Fxa Dir

Trecho: *SP 321 > Pirajui - Fxa Dir

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
94,500	4.100	40,5
94,540	4.100	42,3
94,580	4.100	56,3
94,620	4.100	25,9
94,660	4.100	46,7
94,700	4.100	51,5
94,740	4.100	56,6
94,780	4.100	75,8
94,820	4.100	47,2
94,860	4.100	70,7
94,900	4.100	67,2
94,940	4.100	75,0
94,980	4.100	51,8
95,020	4.100	83,9
95,060	4.100	77,4
95,100	4.100	61,4
95,140	4.100	66,2
95,180	4.100	85,0
95,220	4.100	93,7
95,260	4.100	62,5
95,300	4.100	55,7
95,340	4.100	45,1
95,380	4.100	56,1
95,420	4.100	61,3
95,460	4.100	52,9
95,500	4.100	70,6
	Média	61
	D Pad	16
	D Carac	76
	Máximo	94
	Mínimo	26

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 315 - Pista Simples - Fxa Esq
Trecho: *Duartina > Lucianopolis-Fxa Esq
Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
28,800	4.100	156,1
28,760	4.100	80,8
28,720	4.100	86,1
28,680	4.100	104,2
28,640	4.100	114,8
28,600	4.100	126,5
28,560	4.100	108,6
28,520	4.100	126,3
28,480	4.100	141,3
28,440	4.100	117,6
28,400	4.100	135,6
28,360	4.100	136,2
28,320	4.100	118,1
28,280	4.100	84,1
28,240	4.100	102,5
28,200	4.100	112,9
28,160	4.100	137,0
28,120	4.100	99,8
28,080	4.100	96,7
28,040	4.100	108,9
28,000	4.100	134,5
27,960	4.100	75,7
27,920	4.100	138,7
27,880	4.100	120,2
27,840	4.100	105,4
27,800	4.100	133,3
	Média	115
	D Pad	21
	D Carac	136
	Máximo	156
	Mínimo	76

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP-149/215 Ac. Broa -Pista Simples- Fxa Dir

Trecho: *São Carlos > Broa - Fxa Dir.

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
4,120	4.100	52,0
4,160	4.100	57,8
4,200	4.100	60,0
4,240	4.100	57,3
4,280	4.100	62,3
4,320	4.100	64,0
4,360	4.100	30,9
4,400	4.100	47,7
4,440	4.100	40,2
4,480	4.100	34,1
4,520	4.100	50,6
4,560	4.100	60,2
4,600	4.100	67,2
4,640	4.100	35,3
4,680	4.100	61,5
4,720	4.100	67,6
4,760	4.100	50,8
4,800	4.100	49,6
4,840	4.100	56,9
4,880	4.100	38,0
4,920	4.100	51,0
4,960	4.100	44,3
5,000	4.100	51,4
5,040	4.100	31,9
5,080	4.100	25,3
5,120	4.100	33,9
	Média	49
	D Pad	12
	D Carac	62
	Máximo	68
	Mínimo	25

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 303 - Pista Simples - Fxa Dir

Trecho: *Sarutaia > Timburi - Fxa Dir.

Raio de Aplicação: 15 cm

<i>Posição</i>	<i>Carga Normalizada</i>	<i>Deformação Normalizada (x10⁻² mm)</i>
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>
10,500	4.100	95,4
10,540	4.100	142,0
10,580	4.100	104,8
10,620	4.100	93,3
10,660	4.100	163,9
10,700	4.100	113,9
10,740	4.100	103,2
10,780	4.100	107,2
10,820	4.100	142,3
10,860	4.100	131,3
10,900	4.100	104,4
10,940	4.100	106,4
10,980	4.100	97,4
11,020	4.100	87,3
11,060	4.100	99,7
11,100	4.100	103,4
11,140	4.100	104,1
11,180	4.100	107,8
11,220	4.100	123,8
11,260	4.100	102,9
11,300	4.100	109,5
11,340	4.100	90,1
11,380	4.100	110,0
11,420	4.100	100,2
11,460	4.100	62,8
11,500	4.100	38,8
	Média	106
	D Pad	24
	D Carac	130
	Máximo	164
	Mínimo	39

ANEXO B – Levantamentos deflectométricos com Viga Benkelman

São apresentados, os levantamentos deflectométricos com Viga Benkelman, realizada nas oito rodovias estudadas.

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-255	
Trecho:	km 84,000 ao km 85,000	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
84,000	4.100	24
84,040	4.100	24
84,080	4.100	12
84,120	4.100	24
84,160	4.100	Ponte
84,200	4.100	16
84,240	4.100	20
84,280	4.100	16
84,320	4.100	12
84,360	4.100	16
84,400	4.100	20
84,440	4.100	16
84,480	4.100	20
84,520	4.100	20
84,560	4.100	16
84,600	4.100	28
84,640	4.100	16
84,680	4.100	24
84,720	4.100	16
84,760	4.100	24
84,800	4.100	28
84,840	4.100	47
84,880	4.100	31
84,920	4.100	31
84,960	4.100	20
85,000	4.100	4
	Média	21
	D Pad	8
	D Carac	29
	Máximo	47
	Mínimo	4

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-253	
Trecho:	km 221,000 ao km 222,000	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
221,000	4.100	55
221,040	4.100	39
221,080	4.100	43
221,120	4.100	35
221,160	4.100	32
221,200	4.100	32
221,240	4.100	79
221,280	4.100	28
221,320	4.100	32
221,360	4.100	35
221,400	4.100	32
221,440	4.100	20
221,480	4.100	16
221,520	4.100	16
221,560	4.100	20
221,600	4.100	20
221,640	4.100	20
221,680	4.100	20
221,720	4.100	20
221,760	4.100	20
221,800	4.100	20
221,840	4.100	20
221,880	4.100	12
221,920	4.100	12
221,960	4.100	20
222,000	4.100	16
	Média	27
	D Pad	15
	D Carac	42
	Máximo	79
	Mínimo	12

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-261	
Trecho:	km 5,000 ao km 6,000	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
5,000	4.100	87
5,040	4.100	152
5,080	4.100	91
5,120	4.100	114
5,160	4.100	118
5,200	4.100	106
5,240	4.100	99
5,280	4.100	106
5,320	4.100	96
5,360	4.100	110
5,400	4.100	102
5,440	4.100	99
5,480	4.100	132
5,520	4.100	124
5,560	4.100	146
5,600	4.100	165
5,640	4.100	128
5,680	4.100	109
5,720	4.100	114
5,760	4.100	118
5,800	4.100	99
5,840	4.100	59
5,880	4.100	63
5,920	4.100	77
5,960	4.100	63
6,000	-	-
	Média	107
	D Pad	26
	D Carac	134
	Máximo	165
	Mínimo	59

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-293	
Trecho:	km 24,800 ao km 23,800	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
24,800	4.100	32
24,760	4.100	43
24,720	4.100	108
24,680	4.100	43
24,640	4.100	118
24,600	4.100	85
24,560	4.100	12
24,520	4.100	86
24,480	4.100	97
24,440	4.100	63
24,400	4.100	43
24,360	4.100	81
24,320	4.100	93
24,280	4.100	24
24,240	4.100	39
24,200	4.100	35
24,160	4.100	85
24,120	4.100	67
24,080	4.100	63
24,040	4.100	83
24,000	4.100	91
23,960	4.100	67
23,920	4.100	59
23,880	4.100	55
23,840	4.100	51
23,800	4.100	43
	Média	64
	D Pad	27
	D Carac	91
	Máximo	118
	Mínimo	12

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-331	
Trecho:	km 94,500 ao km 95,500	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
94,500	4.100	28
94,540	4.100	35
94,580	4.100	43
94,620	4.100	16
94,660	4.100	35
94,700	4.100	35
94,740	4.100	47
94,780	4.100	63
94,820	4.100	47
94,860	4.100	55
94,900	4.100	51
94,940	4.100	55
94,980	4.100	51
95,020	4.100	67
95,060	4.100	51
95,100	4.100	55
95,140	4.100	16
95,180	4.100	63
95,220	4.100	75
95,260	4.100	43
95,300	4.100	79
95,340	4.100	43
95,380	4.100	55
95,420	4.100	39
95,460	4.100	39
95,500	4.100	59
	Média	48
	D Pad	16
	D Carac	64
	Máximo	79
	Mínimo	16

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-315	
Trecho:	km 28,800 ao km 27,800	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
28,800	4.100	118
28,760	4.100	55
28,720	4.100	55
28,680	4.100	75
28,640	4.100	87
28,600	4.100	102
28,560	4.100	91
28,520	4.100	91
28,480	4.100	106
28,440	4.100	106
28,400	4.100	114
28,360	4.100	118
28,320	4.100	112
28,280	4.100	71
28,240	4.100	102
28,200	4.100	102
28,160	4.100	118
28,120	4.100	99
28,080	4.100	95
28,040	4.100	102
28,000	4.100	124
27,960	4.100	67
27,920	4.100	102
27,880	4.100	110
27,840	4.100	102
27,800	4.100	118
	Média	98
	D Pad	19
	D Carac	117
	Máximo	124
	Mínimo	55

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS			
Rodovia:	SP-149/215		
Trecho:	km 4,120 ao km 5,120		
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa		
Constante da Viga:	3,94		
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA (x 10 ⁻² mm)	
		1º determinação	2º determinação
4,120	4.100	35	35
4,160	4.100	35	32
4,200	4.100	43	43
4,240	4.100	39	43
4,280	4.100	35	43
4,320	4.100	43	35
4,360	4.100	20	24
4,400	4.100	39	35
4,440	4.100	28	32
4,480	4.100	28	67
4,520	4.100	8	39
4,560	4.100	83	55
4,600	4.100	47	55
4,640	4.100	28	32
4,680	4.100	43	47
4,720	4.100	47	47
4,760	4.100	47	35
4,800	4.100	39	32
4,840	4.100	35	32
4,880	4.100	20	24
4,920	4.100	39	43
4,960	4.100	32	35
5,000	4.100	32	32
5,040	4.100	24	28
5,080	4.100	16	24
5,120	4.100	24	24
	Média	35	37
	D Pad	14	11
	D Carac	49	48
	Máximo	83	67
	Mínimo	8	24

LEVANTAMENTO DE DEFLEXÕES REVERSÍVEIS MÁXIMAS		
Rodovia:	SP-303	
Trecho:	km 10,500 ao km 11,500	
Localização:	Faixa Direita - Trilha externa	
Constante da Viga:	3,94	
Posição (km)	Carga (kgf)	DEFLEXÃO REVERSÍVEL MÁXIMA ($\times 10^{-2}$ mm)
10,500	4.100	75
10,540	4.100	110
10,580	4.100	85
10,620	4.100	63
10,660	4.100	51
10,700	4.100	67
10,740	4.100	89
10,780	4.100	67
10,820	4.100	93
10,860	4.100	87
10,900	4.100	47
10,940	4.100	59
10,980	4.100	51
11,020	4.100	77
11,060	4.100	59
11,100	4.100	63
11,140	4.100	47
11,180	4.100	83
11,220	4.100	79
11,260	4.100	79
11,300	4.100	87
11,340	4.100	71
11,380	4.100	83
11,420	4.100	79
11,460	4.100	39
11,500	-	-
	Média	72
	D Pad	17
	D Carac	88
	Máximo	110
	Mínimo	39

ANEXO C – Levantamentos defletores com FWD (dados do campo)

São apresentados, os levantamentos defletores com FWD dados de campo, realizada nas oito rodovias estudadas.

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 255 - Pista Simples - Fxa Dir

Raio de Aplicação: 15 cm

Trecho: *SP 310 > Jau - Fxa Dir.

Posição	Carga	Bacia de Deformação Atualizada($\times 10^{-2}$ mm)							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
km	(kgf)	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df1-Df4
84,000	4.588	22,5	19,4	15,1	8,8	2,4	7,0	5,5	13,8
84,040	4.489	30,7	24,9	22,2	15,5	8,7	10,3	7,9	15,3
84,080	4.510	16,8	14,1	11,5	7,0	2,5	3,4	3,5	9,8
84,120	4.489	20,7	17,1	13,7	8,3	2,8	5,5	3,6	12,5
84,200	4.538	21,8	17,0	14,0	9,0	3,9	5,1	4,7	12,9
84,240	4.453	28,5	22,8	18,5	11,0	3,5	5,9	5,7	17,5
84,280	4.100	20,4	14,8	12,1	15,8	19,5	1,0	10,0	4,6
84,320	4.531	15,7	12,6	10,5	6,2	1,8	6,8	5,1	9,6
84,360	4.552	23,1	19,1	15,5	10,7	5,8	6,7	5,4	12,5
84,400	4.531	19,1	15,0	11,6	6,6	1,5	5,2	4,2	12,6
84,440	4.623	21,3	18,3	15,0	8,7	2,4	6,9	5,6	12,6
84,480	4.637	24,1	20,6	16,6	11,0	5,4	7,6	6,5	13,1
84,520	4.432	25,7	21,5	17,8	10,5	3,1	5,3	3,9	15,3
84,560	4.446	24,1	20,6	17,2	10,5	3,7	6,9	4,5	13,7
84,600	4.397	35,4	28,4	21,9	15,7	9,4	6,9	5,2	19,8
84,640	4.418	20,5	16,3	13,2	8,3	3,3	6,1	5,4	12,3
84,680	4.368	32,5	22,7	17,9	11,2	4,4	6,2	6,9	21,4
84,720	4.531	21,1	17,2	14,7	8,6	2,4	7,5	6,3	12,6
84,760	4.446	26,2	16,9	13,6	7,9	2,2	5,3	3,9	18,3
84,800	4.418	36,3	28,9	23,2	14,2	5,1	6,1	3,4	22,2
84,840	4.375	52,2	36,5	23,8	14,1	4,4	3,5	2,6	38,1
84,880	4.375	35,4	27,8	24,1	15,1	6,1	7,6	5,5	20,3
84,920	4.489	43,8	33,0	28,1	17,4	6,6	6,3	4,5	26,5
84,960	4.517	27,7	21,5	16,4	10,2	4,0	5,0	2,9	17,5
85,000	4.665	11,7	8,5	7,1	3,9	0,6	4,7	3,5	7,9
	Média	26,29	20,62	16,61	10,62	4,62	5,95	5,05	15,68
	D Padrão	9,09	6,50	4,98	3,50	3,76	1,75	1,65	6,72
	D Caract	35,38	27,12	21,59	14,12	8,38	7,71	6,70	22,40
	Máximo	52,20	36,50	28,10	17,35	19,50	10,30	10,00	38,10
	Mínimo	11,70	8,50	7,10	3,85	0,60	1,00	2,60	4,60

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 253 - Pista Simples - Fxa Dir **Raio de Aplicação:** 15 cm
Trecho: *Pradópolis > SP 333 - Fxa Dir

Posição	Carga	Bacia de Deformação Atualizada($\times 10^{-2}$ mm)							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
221,000	4.397	68,5	41,0	24,3	16,9	9,4	4,5	5,3	51,7
221,040	4.573	49,8	32,0	19,2	12,9	6,5	5,7	0,9	37,0
221,080	4.425	48,5	33,2	15,9	14,8	13,7	5,0	5,1	33,7
221,120	4.531	42,3	27,5	18,1	12,3	6,5	5,0	4,3	30,0
221,160	4.199	35,1	21,6	13,8	8,6	3,4	5,3	3,9	26,5
221,200	4.580	43,0	27,9	18,2	14,4	10,6	7,3	5,0	28,6
221,240	4.453	49,2	30,8	18,3	13,0	7,7	6,2	5,1	36,2
221,280	4.481	42,4	25,8	15,7	13,1	10,4	6,3	5,2	29,4
221,320	4.538	37,8	24,4	14,7	12,2	9,6	5,5	3,4	25,7
221,360	4.489	48,3	28,1	16,8	13,6	10,3	6,3	5,2	34,8
221,400	4.517	50,0	31,0	18,1	11,0	3,8	6,6	5,4	39,1
221,440	4.489	33,4	20,8	13,7	10,1	6,5	5,7	5,2	23,3
221,480	4.602	23,7	14,9	9,5	5,4	1,3	4,0	3,6	18,3
221,520	4.630	24,6	15,8	10,5	7,6	4,7	4,2	3,5	17,0
221,560	4.269	29,7	15,9	10,5	8,4	6,3	3,1	2,8	21,3
221,600	4.566	29,2	19,0	10,9	8,8	6,6	3,6	2,7	20,5
221,640	4.573	25,8	18,5	13,2	8,5	3,8	3,9	3,1	17,3
221,680	4.588	21,9	13,8	9,3	7,2	5,0	3,8	2,7	14,8
221,720	4.588	23,0	16,1	10,6	6,6	2,6	3,5	2,8	16,4
221,760	4.588	26,5	13,7	8,4	7,1	5,7	3,3	2,4	19,5
221,800	4.602	22,3	15,9	10,9	6,4	1,8	3,3	2,6	16,0
221,840	4.588	20,9	15,3	10,8	7,4	4,0	3,6	2,3	13,5
221,880	4.616	19,3	13,4	8,7	5,1	1,4	3,3	2,6	14,3
221,920	4.609	22,3	15,5	10,4	7,8	5,1	3,0	2,7	14,6
221,960	4.623	23,3	15,7	9,9	6,3	2,6	3,7	3,1	17,1
222,000	4.750	15,0	10,7	7,7	4,9	2,0	2,8	2,3	10,2
	Média	33,68	21,47	13,39	9,60	5,82	4,56	3,58	24,08
	D Padrão	13,17	7,86	4,22	3,40	3,29	1,30	1,25	10,04
	D Caract	46,86	29,34	17,61	13,00	9,11	5,86	4,84	34,12
	Máximo	68,50	41,00	24,30	16,85	13,70	7,30	5,40	51,65
	Mínimo	15,00	10,70	7,70	4,85	1,30	2,80	0,90	10,15

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 261 - Pista Simples - Fxa Dir

Raio de Aplicação: 15 cm

Trecho: *SP 270 > Cerqueira Cesar

Posição	Carga	Bacia de Deformação Atualizada($\times 10^{-2}$ mm)							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
0,000	4.496	106,2	77,6	55,5	38,9	22,2	15,7	10,5	67,4
0,040	4.333	151,9	103,9	73,6	47,1	20,5	12,1	10,2	104,9
0,080	4.361	162,1	114,8	78,8	50,5	22,1	15,7	10,9	111,7
0,120	4.347	159,5	107,1	70,9	46,6	22,3	15,2	9,7	112,9
0,160	4.439	122,9	90,1	65,0	43,9	22,8	15,3	9,6	79,0
0,200	4.467	113,5	85,7	60,3	40,0	19,6	13,7	8,7	73,6
0,240	4.375	125,3	87,0	57,8	36,9	16,0	11,2	7,6	88,4
0,280	4.305	117,4	76,2	50,3	32,1	13,8	9,2	6,8	85,4
0,320	4.340	106,9	73,2	49,3	31,4	13,4	8,6	6,5	75,6
0,360	4.354	113,9	73,3	46,5	29,6	12,7	8,9	6,7	84,3
0,400	4.333	110,7	76,9	52,5	34,6	16,7	11,4	7,8	76,1
0,440	4.305	106,8	78,6	55,4	36,3	17,2	12,2	8,1	70,5
0,480	4.277	116,2	82,4	56,7	38,7	20,6	15,3	10,4	77,6
0,520	4.262	123,6	99,0	70,6	47,1	23,5	18,7	12,2	76,6
0,560	4.149	144,8	116,1	85,4	56,2	26,9	18,7	12,4	88,7
0,600	4.199	146,5	108,6	82,9	56,9	30,8	21,1	13,8	89,7
0,640	4.269	106,7	84,1	60,3	40,7	21,1	16,1	10,9	66,0
0,680	4.312	96,1	76,2	55,4	38,0	20,6	14,7	10,1	58,1
0,720	4.298	118,4	91,8	62,8	40,8	18,8	14,6	9,8	77,6
0,760	4.291	122,8	88,7	61,2	40,9	20,5	14,4	10,2	82,0
0,800	4.347	104,1	66,2	44,7	30,0	15,2	11,2	7,8	74,2
0,840	4.375	64,4	50,1	37,9	24,9	11,8	9,3	7,3	39,6
0,880	4.277	78,3	54,8	35,5	23,2	10,9	8,6	7,0	55,1
0,920	4.269	78,9	56,0	37,3	24,9	12,4	9,9	8,1	54,1
0,960	4.383	70,1	50,7	34,6	22,6	10,5	8,9	6,9	47,6
1,000	4.291	117,0	81,9	53,8	35,5	17,1	11,8	8,1	81,6
	Média	114,81	82,73	57,50	37,98	18,46	13,17	9,16	76,83
	D Padrão	25,12	18,46	13,94	9,34	5,06	3,46	1,96	17,64
	D Caract	139,92	101,19	71,44	47,32	23,52	16,63	11,12	94,46
	Máximo	162,10	116,10	85,40	56,85	30,80	21,10	13,80	112,90
	Mínimo	64,40	50,10	34,60	22,55	10,50	8,60	6,50	39,55

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 293 - Pista Simples - Fxa Esq

Raio de Aplicação: 15 cm

Trecho: *SP 294 > Duartina - Fxa Esq

<i>Posição</i>	<i>Carga</i>	<i>Bacia de Deformação Atualizada($\times 10^{-2}$ mm)</i>							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
24,800	4.545	37,0	29,6	24,2	16,6	9,0	7,8	4,5	20,4
24,760	4.432	53,1	42,2	28,8	22,1	15,4	8,7	6,6	31,0
24,720	4.284	110,0	76,9	48,0	29,7	11,4	6,2	4,2	80,3
24,680	4.453	46,2	37,2	28,7	23,0	17,2	9,4	5,5	23,3
24,640	4.064	126,6	107,0	63,0	51,9	40,8	10,2	5,0	74,7
24,600	4.404	75,4	60,2	46,0	33,5	20,9	9,9	5,4	42,0
24,560	4.545	20,5	14,7	11,0	10,2	9,4	3,6	2,7	10,3
24,520	4.291	87,6	71,3	52,2	40,6	29,0	14,3	8,9	47,0
24,480	4.241	91,7	69,5	49,8	34,5	19,2	10,6	7,2	57,2
24,440	3.902	50,8	36,7	27,2	18,0	8,8	6,3	3,7	32,8
24,400	4.425	41,6	34,8	26,3	18,7	11,1	8,7	5,8	22,9
24,360	4.347	83,6	71,0	58,2	47,9	37,5	18,8	11,6	35,8
24,320	4.312	90,3	74,7	56,4	49,0	41,5	15,3	9,3	41,4
24,280	4.531	29,6	26,9	22,3	15,6	8,8	9,2	6,0	14,1
24,240	4.411	54,4	40,8	31,1	22,9	14,7	7,9	5,4	31,5
24,200	4.460	46,0	35,7	25,7	16,9	8,0	8,0	4,9	29,2
24,160	4.305	80,0	59,9	43,0	26,8	10,5	5,1	4,0	53,3
24,120	4.368	76,1	50,6	34,0	20,6	7,1	5,1	4,2	55,6
24,080	4.383	66,8	47,2	32,6	21,1	9,5	6,2	4,0	45,8
24,040	4.333	91,7	62,2	37,8	25,3	12,7	6,0	4,4	66,5
24,000	4.326	92,0	60,6	38,7	25,9	13,1	5,3	4,4	66,1
23,960	4.291	73,3	48,9	30,5	20,5	10,5	5,0	3,9	52,8
23,920	4.340	66,7	40,5	27,5	18,6	9,6	5,6	4,6	48,2
23,880	4.425	53,0	36,7	25,6	15,5	5,3	6,2	4,6	37,6
23,840	4.418	58,3	37,0	25,1	16,4	7,7	4,8	3,6	41,9
23,800	4.397	45,8	32,5	21,9	13,8	5,6	5,4	3,9	32,1
	Média	67,23	50,20	35,22	25,19	15,17	8,06	5,32	42,04
	D Padrão	25,43	20,19	13,09	11,30	10,50	3,58	2,00	17,95
	D Caract	92,66	70,39	48,30	36,49	25,66	11,64	7,32	60,00
	Máximo	126,60	107,00	63,00	51,90	41,50	18,80	11,60	80,30
	Mínimo	20,50	14,70	11,00	10,20	5,30	3,60	2,70	10,30

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 331 - Pista Simples - Fxa Dir

Raio de Aplicação: 15 cm

Trecho: *SP 321 > Pirajui - Fxa Dir

<i>Posição</i>	<i>Carga</i>	<i>Bacia de Deformação Atualizada($\times 10^{-2}$ mm)</i>							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
94,500	4.545	44,9	24,2	14,2	8,5	2,8	3,7	2,7	36,4
94,540	4.538	46,8	32,1	17,6	10,6	3,6	3,4	2,5	36,2
94,580	4.474	61,4	32,1	17,1	10,3	3,4	4,7	2,4	51,2
94,620	4.630	29,2	17,1	10,7	5,9	1,0	2,6	2,4	23,4
94,660	4.347	49,5	29,9	18,5	11,2	3,8	3,8	2,7	38,4
94,700	4.467	56,1	34,1	18,0	11,9	5,7	3,7	3,2	44,3
94,740	4.439	61,3	43,6	27,6	16,4	5,1	5,6	2,8	45,0
94,780	4.227	78,1	55,2	30,0	19,1	8,2	4,8	4,6	59,0
94,820	4.333	49,9	30,1	15,7	10,1	4,4	3,4	3,4	39,9
94,860	4.375	75,5	44,0	21,7	12,5	3,2	2,2	2,4	63,1
94,900	3.930	64,4	36,9	17,1	9,8	2,4	2,1	1,8	54,7
94,940	4.333	79,3	49,0	22,6	13,3	4,0	2,0	1,8	66,0
94,980	4.390	55,5	29,3	14,5	10,1	5,6	1,7	1,5	45,5
95,020	4.354	89,1	58,4	34,9	21,3	7,6	2,3	1,8	67,9
95,060	4.277	80,7	43,8	18,3	10,9	3,4	1,7	1,8	69,9
95,100	4.284	64,2	40,8	24,0	13,8	3,5	2,3	2,1	50,5
95,140	4.432	71,6	39,4	18,5	11,1	3,6	3,1	3,2	60,6
95,180	4.277	88,7	55,3	32,2	20,6	8,9	5,6	4,3	68,2
95,220	4.199	96,0	68,8	34,0	23,4	12,7	2,7	2,2	72,7
95,260	4.383	66,8	40,5	24,4	16,3	8,1	4,4	3,7	50,6
95,300	4.368	59,3	40,6	25,5	16,2	6,9	4,4	3,6	43,1
95,340	4.404	48,4	34,7	21,4	13,8	6,2	4,5	3,5	34,6
95,380	4.474	61,2	37,0	21,9	15,2	8,5	4,9	4,1	46,0
95,420	4.411	66,0	39,4	19,9	12,6	5,3	5,4	4,0	53,4
95,460	4.460	57,6	33,1	17,8	12,0	6,2	2,6	2,2	45,6
95,500	4.326	74,5	45,3	24,0	14,0	4,0	3,9	3,2	60,5
	Média	64,46	39,80	21,62	13,47	5,31	3,52	2,84	51,00
	D Padrão	15,53	11,19	6,20	4,15	2,56	1,24	0,87	12,68
	D Caract	79,99	50,98	27,82	17,61	7,87	4,75	3,71	63,67
	Máximo	96,00	68,80	34,90	23,35	12,70	5,60	4,60	72,65
	Mínimo	29,20	17,10	10,70	5,85	1,00	1,70	1,50	23,35

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 315 - Pista Simples - Fxa Esq

Raio de Aplicação: 15 cm

Trecho: *Duartina > Lucianópolis-Fxa Esq

<i>Posição</i>	<i>Carga</i>	<i>Bacia de Deformação Atualizada(x10⁻² mm)</i>							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
28,800	4.312	164,2	98,8	53,9	32,4	10,8	7,6	5,4	131,9
28,760	4.312	85,0	49,3	30,0	18,4	6,8	4,0	3,5	66,6
28,720	4.354	91,4	57,8	35,7	21,5	7,3	6,2	4,4	69,9
28,680	4.178	106,2	68,2	38,3	25,0	11,6	4,4	4,6	81,3
28,640	4.149	116,2	69,6	38,8	25,0	11,2	6,2	4,6	91,2
28,600	4.142	127,8	79,1	50,1	30,7	11,3	4,0	2,9	97,1
28,560	4.269	113,1	69,3	44,7	26,8	8,8	5,1	3,7	86,4
28,520	4.149	127,8	78,7	49,1	31,3	13,5	6,1	4,9	96,5
28,480	4.079	140,6	87,7	58,0	37,8	17,6	8,1	5,9	102,8
28,440	4.277	122,7	87,6	57,8	37,4	16,9	8,5	5,2	85,4
28,400	4.100	135,6	90,2	53,7	33,3	12,9	6,4	4,4	102,3
28,360	4.199	139,5	92,3	60,5	38,1	15,7	6,0	3,7	101,4
28,320	4.128	118,9	82,3	50,0	36,4	22,8	7,6	5,2	82,5
28,280	4.248	87,1	49,2	25,6	18,4	11,1	0,3	0,1	68,8
28,240	4.149	103,7	63,5	40,6	24,4	8,1	0,2	0,0	79,4
28,200	4.128	113,7	84,9	55,0	34,2	13,4	6,2	4,4	79,5
28,160	4.022	134,4	93,7	40,4	27,3	14,1	2,9	2,4	107,2
28,120	4.163	101,3	58,6	43,2	26,9	10,5	8,7	6,2	74,5
28,080	4.043	95,4	61,4	38,5	27,0	15,4	3,0	5,2	68,5
28,040	4.149	110,2	77,6	50,0	31,7	13,3	6,8	4,3	78,6
28,000	4.185	137,3	81,2	48,6	34,4	20,2	7,5	4,9	102,9
27,960	4.241	78,3	54,0	30,0	21,0	12,0	5,7	4,5	57,3
27,920	4.022	136,1	72,8	47,5	32,7	17,9	6,1	4,0	103,4
27,880	4.128	121,0	93,4	55,6	32,7	9,8	5,6	2,4	88,3
27,840	4.114	105,8	63,8	41,3	26,5	11,6	4,5	3,0	79,4
27,800	4.036	131,2	104,6	53,5	32,0	10,5	5,5	3,0	99,2
	Média	117,10	75,75	45,78	29,34	12,89	5,51	3,95	87,76
	D Padrão	20,47	15,60	9,39	5,81	3,89	2,18	1,52	16,37
	D Caract	137,57	91,35	55,18	35,14	16,77	7,69	5,47	104,13
	Máximo	164,20	104,60	60,50	38,10	22,80	8,70	6,20	131,85
	Mínimo	78,30	49,20	25,60	18,35	6,80	0,20	0,00	57,30

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP-149/215 Ac. Broa -Pista Simples- FRAI Dide Aplicação: 15 cm

Trecho: *São Carlos > Broa - Fxa Dir.

<i>Posição</i>	<i>Carga</i>	<i>Bacia de Deformação Atualizada(x10⁻² mm)</i>							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
4,120	4.432	56,2	24,6	11,4	8,0	4,5	2,7	2,3	48,3
4,160	4.489	63,3	23,4	11,6	6,8	2,0	2,9	2,5	56,5
4,200	4.503	65,9	31,9	18,2	10,6	2,9	3,4	2,9	55,4
4,240	4.489	62,7	40,4	20,6	11,8	2,9	3,9	3,0	51,0
4,280	4.439	67,4	30,8	13,8	8,4	3,0	3,5	2,7	59,0
4,320	4.333	67,6	35,4	14,9	9,4	3,9	1,9	2,2	58,2
4,360	4.425	33,3	18,3	10,1	5,6	1,0	2,9	2,3	27,8
4,400	4.397	51,1	30,9	17,6	11,5	5,3	4,1	2,8	39,7
4,440	4.446	43,6	26,3	17,4	10,0	2,5	4,9	4,1	33,7
4,480	4.510	37,5	22,9	14,5	8,3	2,0	4,5	3,9	29,3
4,520	4.383	54,1	30,4	17,5	10,5	3,4	4,5	3,3	43,7
4,560	4.383	64,4	38,2	22,7	13,3	3,9	4,9	3,5	51,1
4,600	4.347	71,2	41,3	25,0	14,4	3,7	5,4	3,7	56,9
4,640	4.411	38,0	18,2	9,8	6,2	2,5	2,9	2,2	31,9
4,680	4.397	66,0	39,5	23,8	15,2	6,6	5,3	3,4	50,8
4,720	4.277	70,5	40,0	24,1	14,1	4,0	4,9	3,3	56,5
4,760	4.411	54,6	34,3	22,7	13,0	3,3	6,0	4,0	41,6
4,800	4.333	52,4	30,7	19,0	10,6	2,2	4,6	3,2	41,8
4,840	4.277	59,3	31,8	20,0	11,3	2,6	5,0	3,6	48,0
4,880	4.510	41,8	22,5	15,6	9,6	3,6	4,5	4,1	32,2
4,920	4.340	54,0	35,1	19,9	11,7	3,5	3,3	2,8	42,3
4,960	4.474	48,3	27,1	16,8	9,6	2,3	3,7	2,6	38,8
5,000	4.404	55,2	28,4	17,2	10,5	3,7	3,3	3,4	44,8
5,040	4.453	34,7	23,4	12,6	7,4	2,1	2,7	2,7	27,4
5,080	4.566	28,2	17,9	10,0	7,7	5,3	4,2	3,8	20,6
5,120	4.566	37,8	19,8	12,2	7,4	2,6	4,8	3,3	30,4
	Média	53,04	29,37	16,88	10,08	3,28	4,03	3,14	42,96
	D Padrão	12,74	7,32	4,63	2,59	1,22	1,02	0,60	11,19
	D Caract	65,78	36,69	21,52	12,67	4,50	5,05	3,74	54,15
	Máximo	71,20	41,30	25,00	15,20	6,60	6,00	4,10	59,00
	Mínimo	28,20	17,90	9,80	5,55	1,00	1,90	2,20	20,55

Levantamento Deflectométrico

Rodovia: SP 303 - Pista Simples - Fxa Dir

Raio de Aplicação: 15 cm

Trecho: *Sarutaia > Timburi - Fxa Dir.

<i>Posição</i>	<i>Carga</i>	<i>Bacia de Deformação ($\times 10^{-2}$ mm)</i>							
		Afast. 0	Afast. 20	Afast. 30	Afast. 45	Afast. 65	Afast. 90	Afast. 120	-
<i>km</i>	<i>(kgf)</i>	<i>Df1</i>	<i>Df2</i>	<i>Df3</i>	<i>Df4</i>	<i>Df5</i>	<i>Df6</i>	<i>Df7</i>	<i>Df1-Df4</i>
0,000	4.375	101,8	53,9	28,3	19,4	10,4	8,8	6,9	82,5
0,040	4.220	146,2	84,1	51,7	34,5	17,2	12,5	9,8	111,8
0,080	4.298	109,9	55,4	27,8	18,4	9,0	7,4	5,9	91,5
0,120	4.199	95,5	40,5	21,4	14,7	7,9	6,6	5,2	80,9
0,160	4.312	172,4	41,2	22,3	15,2	8,0	7,1	5,4	157,3
0,200	4.156	115,5	53,9	27,4	18,9	10,4	8,9	6,3	96,6
0,240	4.142	104,3	64,8	30,0	19,5	8,9	7,7	6,1	84,9
0,280	4.269	111,6	44,0	22,5	15,6	8,7	7,4	6,0	96,0
0,320	4.149	144,0	65,2	30,0	19,4	8,8	7,2	6,3	124,6
0,360	4.079	130,6	71,9	35,4	23,0	10,6	8,6	6,3	107,6
0,400	4.277	108,9	44,3	20,9	14,8	8,6	7,1	5,4	94,2
0,440	4.100	106,4	44,2	21,0	14,6	8,2	7,3	5,6	91,8
0,480	4.368	103,8	40,8	20,4	14,4	8,4	7,0	6,0	89,4
0,520	4.383	93,3	61,3	25,7	16,6	7,5	6,7	5,0	76,7
0,560	4.333	105,4	55,8	27,4	17,7	8,0	6,4	6,0	87,7
0,600	4.326	109,1	62,6	26,4	16,2	5,9	5,8	4,5	93,0
0,640	4.291	108,9	59,3	22,3	14,2	6,0	5,0	4,2	94,8
0,680	4.114	108,2	51,4	23,7	15,2	6,6	6,2	5,1	93,1
0,720	4.036	121,9	57,0	27,4	19,0	10,6	10,2	7,6	102,9
0,760	4.319	108,4	57,5	26,5	16,8	7,0	6,7	5,4	91,7
0,800	4.312	115,2	60,6	27,5	18,4	9,2	8,5	6,6	96,9
0,840	4.305	94,6	46,7	22,6	15,7	8,7	8,2	6,4	79,0
0,880	4.404	118,1	61,9	28,8	18,8	8,8	8,6	6,6	99,3
0,920	4.241	103,7	66,7	31,6	20,4	9,2	8,7	6,2	83,3
0,960	4.354	66,7	37,6	21,7	15,9	10,0	7,4	5,9	50,9
1,000	4.453	42,1	25,1	17,6	12,6	7,6	7,1	5,7	29,5
	Média	109,48	54,14	26,47	17,66	8,85	7,66	6,02	91,82
	D Padrão	24,06	12,48	6,57	4,18	2,14	1,49	1,06	22,42
	D Caract	133,55	66,62	33,05	21,84	10,99	9,15	7,08	114,24
	Máximo	172,40	84,10	51,70	34,45	17,20	12,50	9,80	157,25
	Mínimo	42,10	25,10	17,60	12,60	5,90	5,00	4,20	29,50

ANEXO D – Calibração da Viga Benkelman

É apresentada, a calibração da Viga Benkelman através da Norma Técnica DNER - PRO-175/94, para o levantamento deflectométrico, realizado nas oito rodovias estudadas.

CALIBRAÇÃO DA VIGA - DNER – PRO 175/94

Extensômetro da prensa (Xpi) (0,01 mm)	Extensômetro da viga (Xvi) (0,01 mm)		Relação entre as leituras nos extensômetros da prensa e da viga $X_i = (X_{pi} / X_{vi})$	
	1ª determinação	2ª determinação	1ª determinação	2ª determinação
10	3	3	3,33	3,33
20	5	5	4,00	4,00
30	8	8	3,75	3,75
40	10	9	4,00	4,44
50	13	12	3,85	4,17
60	15	16	4,00	3,75
70	18	17	3,89	4,12
80	20	21	4,00	3,81
100	25	24	4,00	4,17
120	30	30	4,00	4,00
140	36	36	4,00	4,00
160	41	40	3,89	4,00
180	46	45	3,91	4,00
200	51	51	3,92	3,92
220	56	57	4,23	3,86
MÉDIA ($\bar{X}$)	-	-	3,9363	
DESVIO	-	-	0,2202	
PADRÃO (s)	-	-		

$$N = 30$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \text{ (média dos valores)} = 3,9363$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\bar{X} - X_i)^2}{N - 1}} \text{ (desvio padrão)} = 0,2202$$

$$s(\bar{X}) = s / \sqrt{N} = 0,0402$$

$$e_0 = 2,045 * s(\bar{X}) = 0,08$$

$$\begin{aligned} Li &= 3,94 - 0,08 = 3,86 & Li &> 3,80 \\ Ls &= 3,94 + 0,08 = 4,02 & Ls &< 4,20 \end{aligned}$$

A constante da viga a ser utilizada é $k_1 = 3,94$.

$$Da = k_1 * (Lf - Lo)$$

$$Da = 3,94 * (Lf - Lo)$$

Onde:

Da= Deflexão aparente

Lf = Leitura Final

Lo = Leitura Inicial.

DIMENSÕES DA VIGA BENKELMAN

(a) Distância da ponta de prova à articulação.....	2,435 m
(b) Distância da articulação ao extensômetro.....	0,617 m
(c) Distância da articulação ao pé dianteiro.....	0,255 m
(d) Distância da articulação ao pé traseiro.....	1,173 m
(e) Distância do extensômetro ao pé traseiro.....	0,560 m
(f) Distância do pé dianteiro ao pé traseiro.....	0,915 m

Caso a leitura a 10 m seja superior à 2,69 m indicando ter havido influência no pé da viga, corrigir a deflexão através da expressão:

$$D = Da + 2,62 * [3,94 * (L_{10m} - L_{2,69m})]$$

CÁLCULO DA CONSTANTE K₂

$$K_2 = (3d - 2e) / f$$

$$K_2 = (3 * 1,173 - 2 * 0,560) / 0,915$$

$$K_2 = 2,62$$

CÁLCULO DA DEFLEXÃO (D)

$$D = Da + k_2 * ?$$

Onde:

D = Deflexão

$$Da = 3,94 * (Lf - Lo)$$

$$? = 3,94 * (Lf - Li)$$

Lf = Leitura final

Li = Leitura intermediária

Lo = Leitura inicial

$$k_2 = 2,62$$

ANEXO E – Gráficos deflectograma de Levantamentos comparativos entre a Viga Benkelman e FWD.

São apresentados, os gráficos simultâneos de levantamentos deflectométricos com a Viga Benkelman e FWD, realizada nas oito rodovias estudadas.

BASE GRANULAR

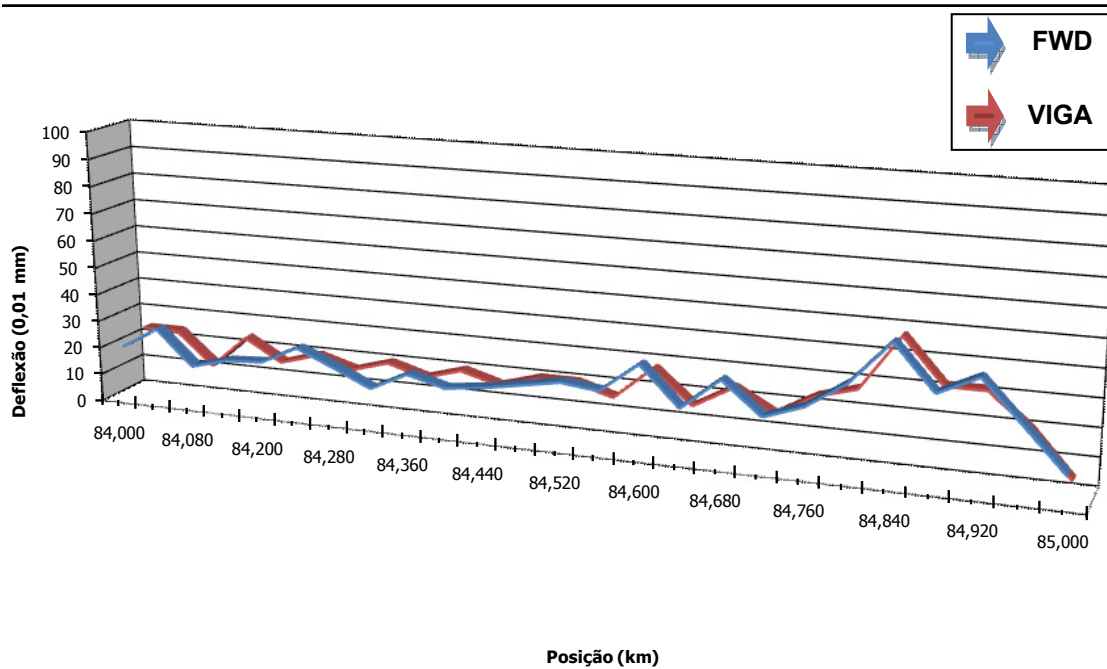


Gráfico 1 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-255 - Base Granular

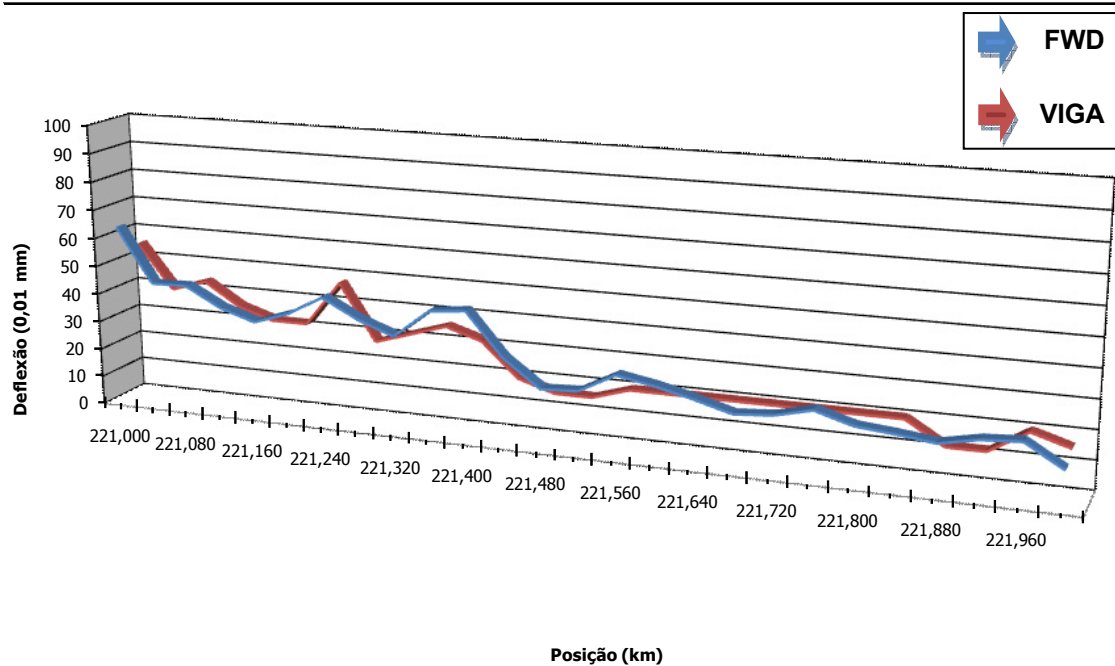


Gráfico 2 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-253 - Base Granular

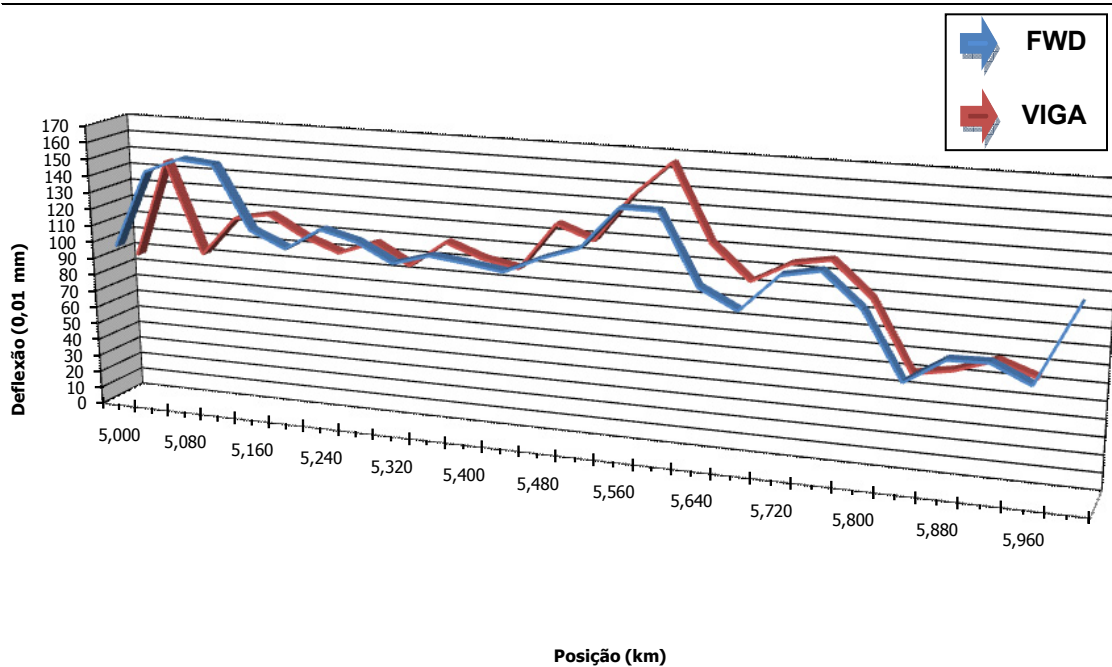


Gráfico 3 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-261 - Base Granular

BASE CIMENTADA

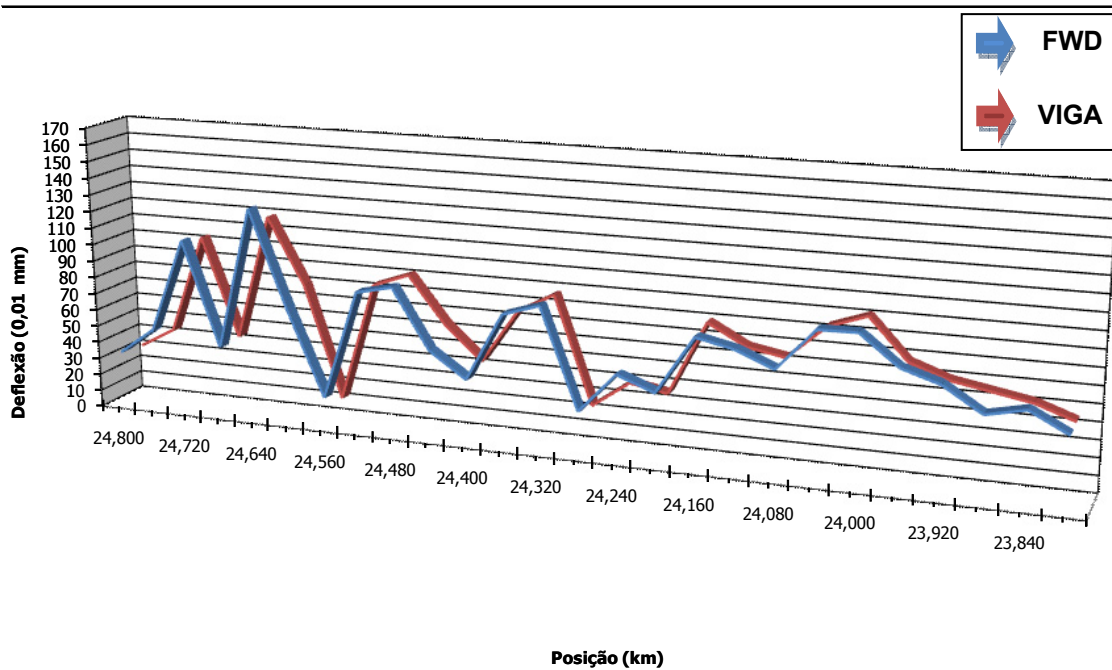


Gráfico 4 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-293 - Base Cimentada

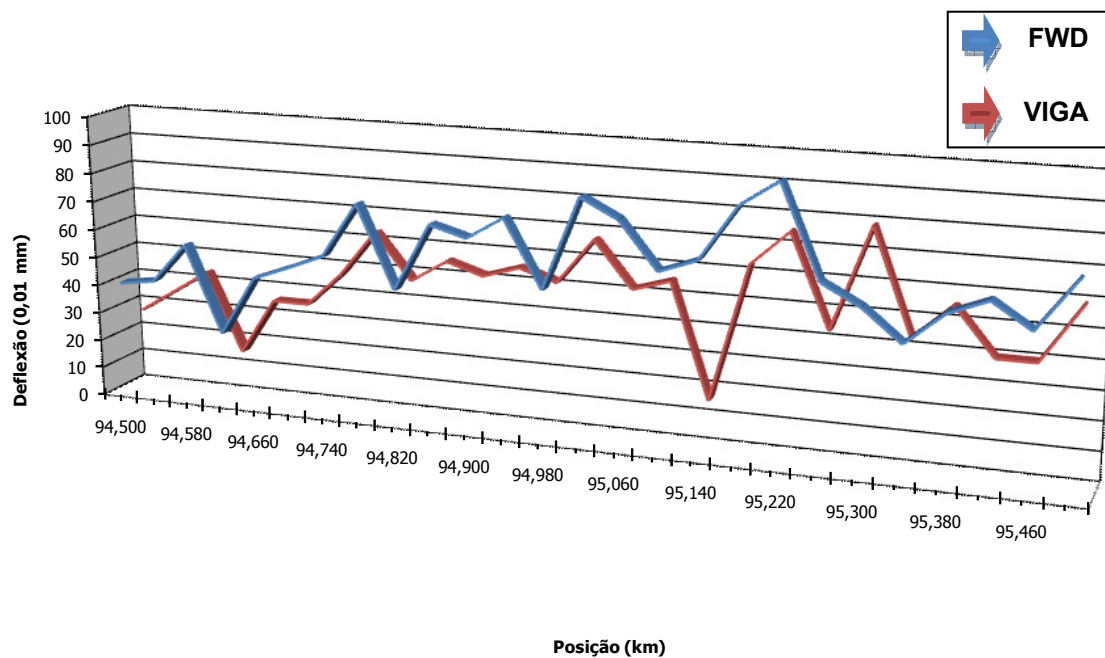


Gráfico 5 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-331 - Base Cimentada

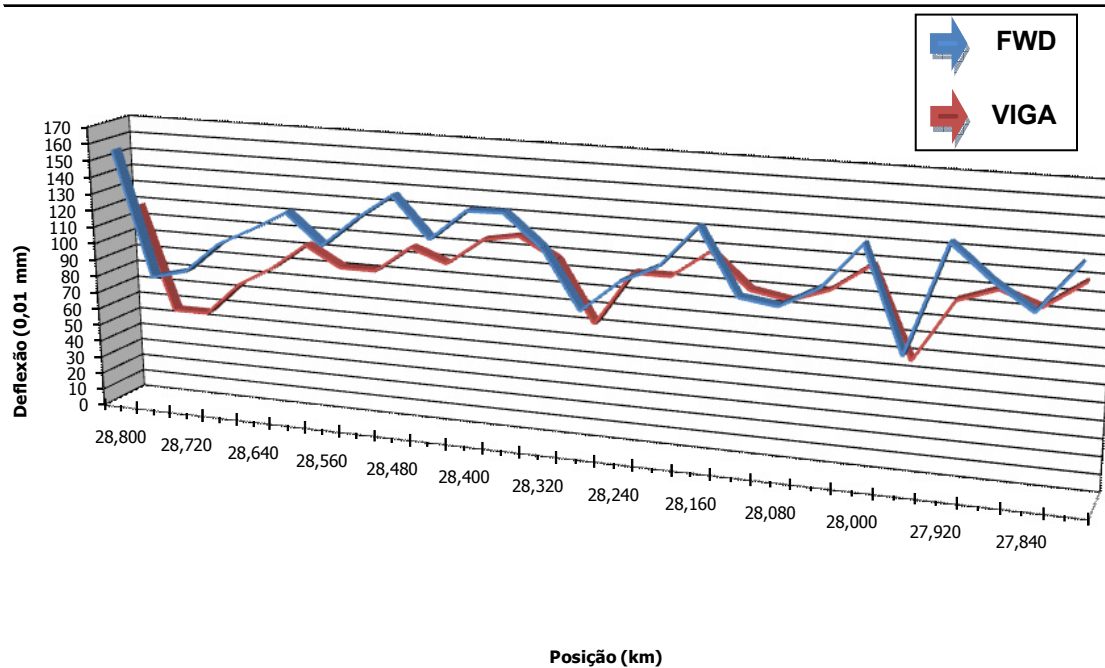


Gráfico 6 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-315 - Base Cimentada

BASE DE SAFL

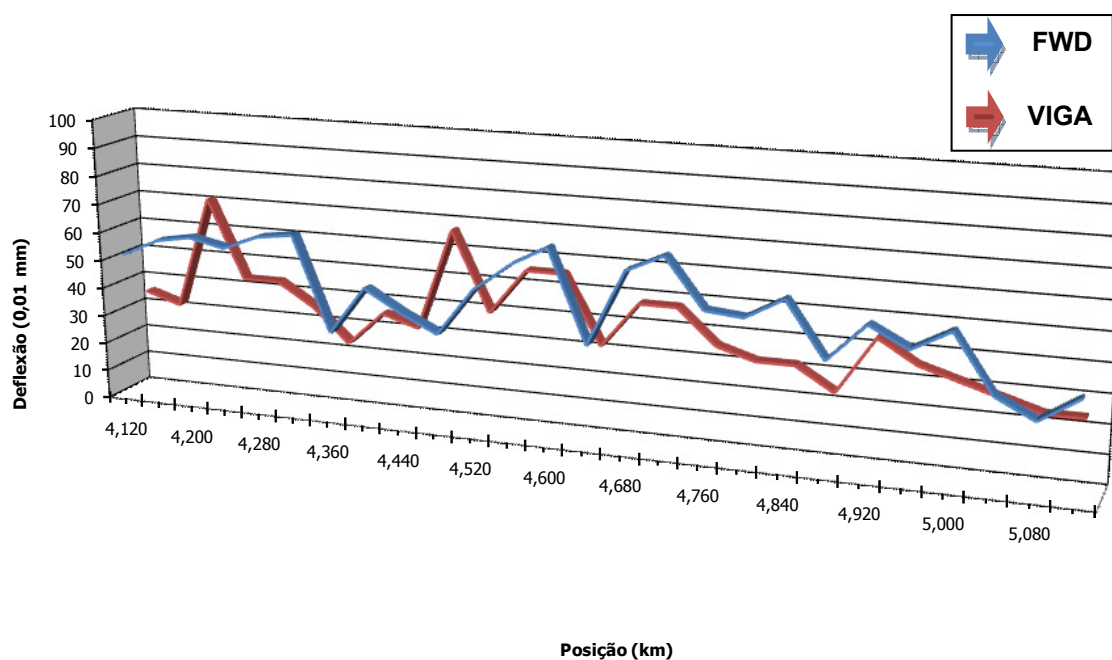


Gráfico 7 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-149/215 – Base SAFL

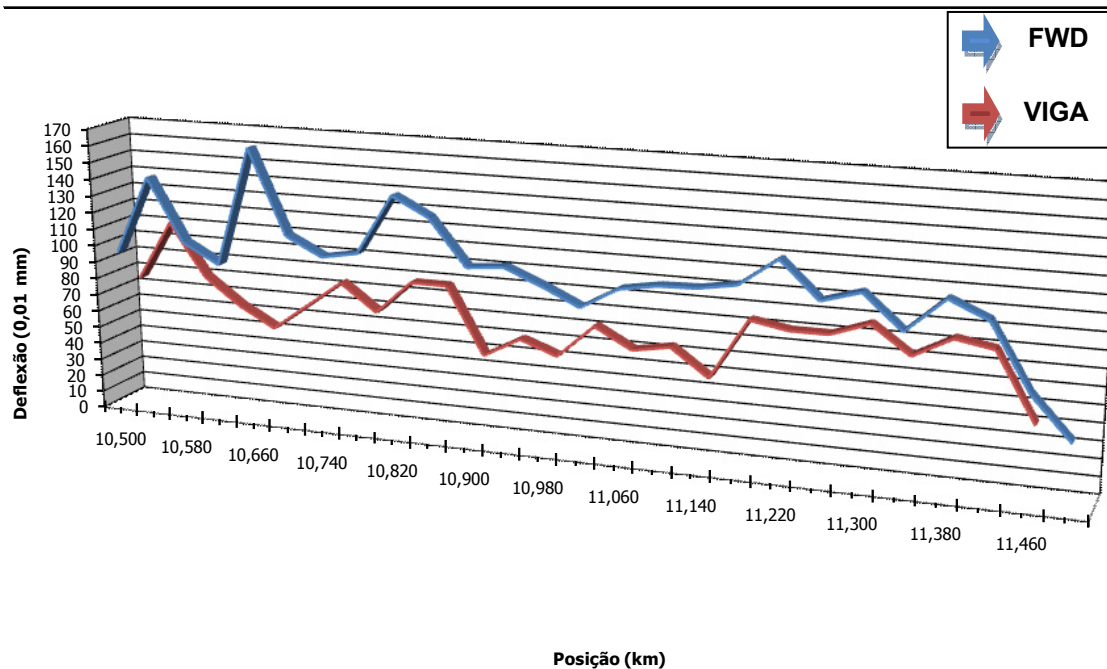


Gráfico 8 – Levantamento de FWD e Viga Benkelman SP-303 – Base SAFL

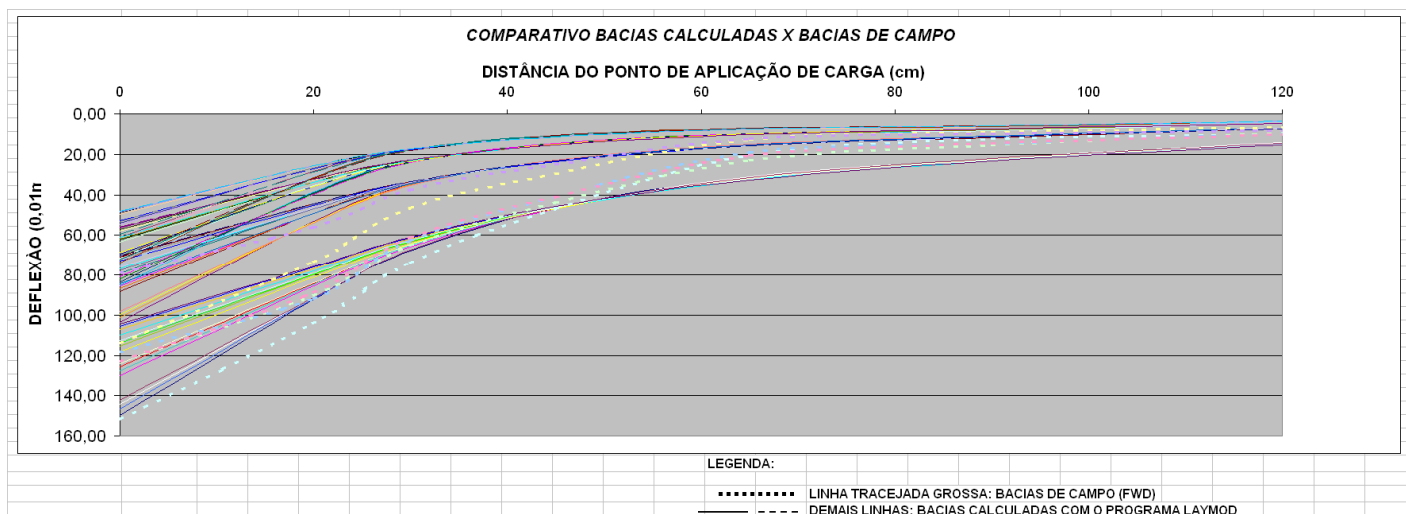
ANEXO F – Retroanálises com o Programa Laymod.

São apresentadas, as retroanálises com o programa Laymod, demonstrando-se os módulos dinâmicos e as bacias de deflexões calculada, realizada nas três bases estudadas.

SP-261 BASE GRANULAR																	
LAYMOD - BACIAS CALCULADAS PELO PROGRAMA VARIANDO OS MÓDULOS DAS CAMADAS																	
E1	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
E2	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500
E3	500	500	500	500	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000
N° BACIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
DEFLEXÃO	0	149,73	130,18	118,16	109,86	103,48	88,26	79,17	73,00	65,20	71,47	63,45	58,09	75,21	62,20	54,71	49,77
	20	92,12	85,53	81,20	78,02	53,26	49,39	46,98	45,25	38,64	35,61	33,81	32,56	30,87	28,23	26,72	25,70
	30	67,65	65,71	64,17	62,90	35,22	34,76	34,35	33,96	23,59	23,51	23,38	23,24	17,60	17,66	17,65	17,61
	45	46,64	46,84	46,81	46,68	22,72	23,15	23,39	23,53	14,72	15,10	15,34	15,50	10,74	11,09	11,30	11,45
	65	31,26	31,87	32,28	32,56	14,98	15,29	15,52	15,70	9,76	9,93	10,07	10,19	7,20	7,32	7,41	7,49
	90	22,66	22,85	23,01	23,16	11,75	11,67	11,62	11,61	8,23	8,09	8,00	7,93	6,50	6,33	6,22	6,14
	120	14,45	14,68	14,88	15,05	7,18	7,17	7,20	7,24	4,91	4,82	4,78	4,78	3,63	3,69	3,62	3,59
E1	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667	21667
E2	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500
E3	500	500	500	500	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000
N° BACIA	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
DEFLEXÃO	0	146,62	127,56	115,65	107,33	101,41	86,73	77,80	71,67	63,47	70,29	62,45	57,15	73,65	61,19	53,89	49,02
	20	91,70	84,71	80,10	76,71	53,51	49,35	46,74	44,88	39,06	35,78	33,82	32,46	31,36	28,48	26,84	25,72
	30	67,28	65,03	63,30	61,87	35,26	34,63	34,10	33,64	23,72	23,49	23,30	23,11	17,75	17,69	17,63	17,55
	45	46,43	46,51	46,39	46,17	22,71	23,11	23,32	23,43	14,73	15,11	15,33	15,48	10,75	11,10	11,31	11,45
	65	31,19	31,79	32,18	32,43	14,99	15,30	15,54	15,72	9,78	9,96	10,10	10,22	7,23	7,35	7,44	7,53
	90	22,29	22,56	22,80	22,97	11,43	11,42	11,43	11,45	7,93	7,85	7,80	7,77	6,20	6,10	6,03	5,98
	120	14,31	14,60	14,84	15,01	7,08	7,13	7,18	7,23	4,82	4,78	4,77	4,77	3,74	3,65	3,60	3,58
E1	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333	28333
E2	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500
E3	500	500	500	500	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000
N° BACIA	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
DEFLEXÃO	0	144,27	125,76	114,02	105,74	99,68	85,53	76,80	70,75	61,97	69,32	61,68	56,47	72,27	60,33	53,24	48,46
	20	91,58	84,36	79,57	76,03	53,72	49,38	46,65	44,58	39,38	35,93	33,87	32,43	31,73	28,70	26,95	25,77
	30	67,27	64,80	62,91	61,36	35,40	34,61	34,00	33,48	23,88	23,54	23,28	23,04	17,92	17,76	17,64	17,53
	45	46,48	46,48	46,28	45,99	22,75	23,12	23,31	23,40	14,75	15,12	15,34	15,47	10,77	11,12	11,33	11,46
	65	31,41	31,90	32,27	32,49	15,03	15,35	15,59	15,76	9,80	9,99	10,13	10,25	7,24	7,37	7,47	7,55
	90	22,22	22,55	22,82	23,02	11,27	11,30	11,35	11,39	7,75	7,71	7,69	7,68	6,02	5,95	5,91	5,88
	120	14,36	14,72	14,98	15,16	7,04	7,13	7,21	7,27	4,76	4,76	4,77	4,78	3,67	3,62	3,60	3,59
E1	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000	35000
E2	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500	2167	2833	3500	1500
E3	500	500	500	500	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000
N° BACIA	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	
DEFLEXÃO	0	142,20	124,26	112,71	104,52	98,11	84,48	75,96	70,00	60,61	68,44	61,02	55,90	71,01	59,55	52,67	47,99
	20	91,46	84,12	79,18	75,55	53,87	49,41	46,58	44,55	39,61	36,05	33,91	32,42	32,00	28,86	27,04	25,81
	30	67,30	64,67	62,64	61,01	35,54	34,63	33,94	33,37	24,05	23,59	23,27	23,00	18,09	17,83	17,66	17,52
	45	46,53	46,48	46,20	45,87	22,78	23,13	23,29	23,37	14,77	15,14	15,34	15,47	10,78	11,13	11,33	11,46
	65	31,40	32,01	32,34	32,55	15,05	15,38	15,61	15,79	9,81	10,00	10,15	10,27	7,25	7,38	7,48	7,57
	90	22,19	22,58	22,85	23,07	11,16	11,22	11,28	11,34	7,63	7,61	7,61	7,62	5,89	5,85	5,82	5,80
	120	14,41	14,83	15,09	15,31	6,99	7,13	7,22	7,29	4,69	4,74	4,76	4,79	3,59	3,59	3,58	3,58

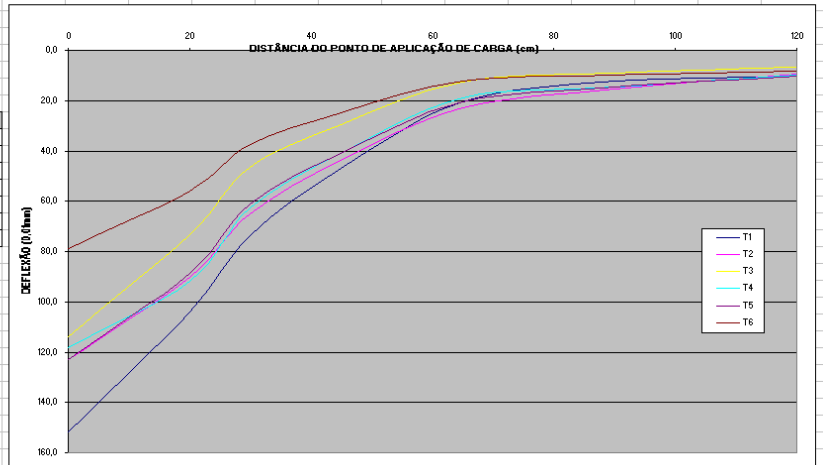
LEGENDA:

BACIAS QUE SE APROXIMAM DAS BACIAS DE CAMPO



DADOS DE CAMPO - BACIAS QUE ATENDEM A RELAÇÃO ENTRE DVB E DFWD (SEGUNDO ESTUDO DO DER/SP(Oito trechos))

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	151,9	122,9	113,9	118,4	122,8	78,9
20	103,9	90,1	73,3	91,8	88,7	56,0
30	73,6	65,0	46,5	62,8	61,2	37,3
45	47,1	43,9	29,6	40,8	40,9	24,9
65	20,5	22,8	12,7	18,8	20,5	12,4
90	12,1	15,3	8,9	14,6	14,4	9,9
120	10,2	9,6	6,7	9,8	10,2	8,1



RESULTADO DE DEFLEXÕES DE VIGA BENKELMAN NO ELSYM-5

Nº BACIA (LAYMOD)	1	3	7	8	17	23	33	35	49	51	57	
E1	15000	15000	15000	15000	22000	22000	28000	28000	35000	35000	35000	
E2	1500	2800	2800	3500	1500	2800	1500	2800	1500	2800	1500	
E3	500	500	1000	1000	500	1000	500	500	500	500	1500	
D0_FWD	149,73	118,16	79,17	73,00	146,62	77,80	144,27	114,02	142,20	112,71	80,61	(LAYMOD)
D0_VB	121	101,7	62,51	58,81	120	62,09	119,3	99,38	118,5	98,62	58,26	(ELSYM-5)
D0_VB/D0_FWD	0,81	0,86	0,79	0,81	0,82	0,80	0,83	0,87	0,83	0,87	0,72	

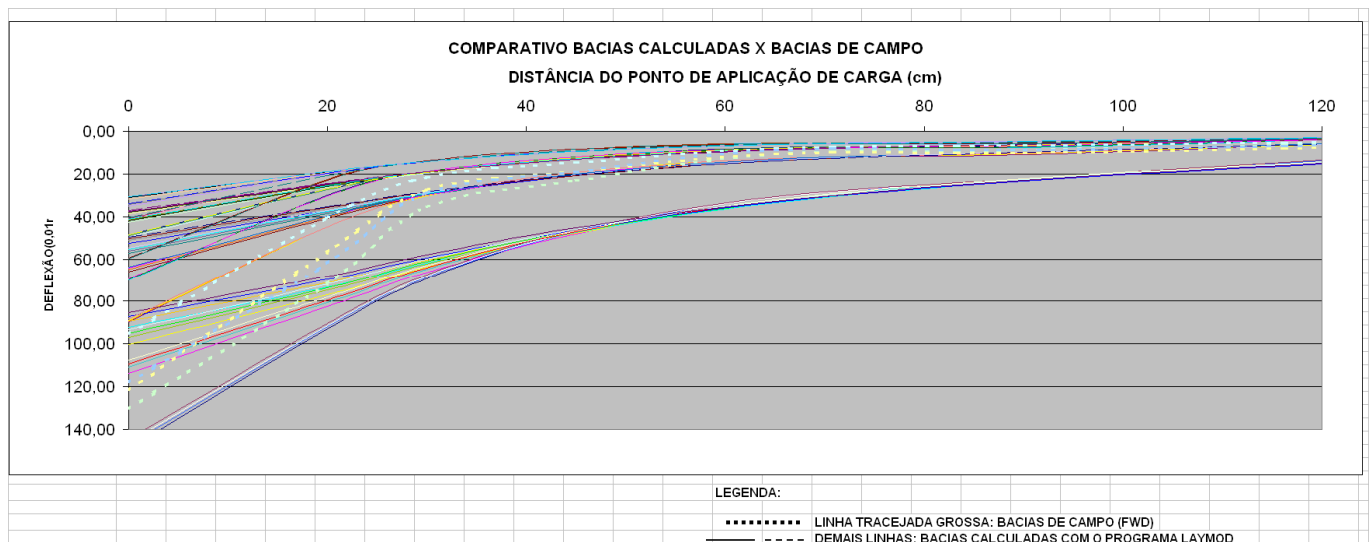
LEGENDA:

BACIA SELECIONADA PARA ESTUDO

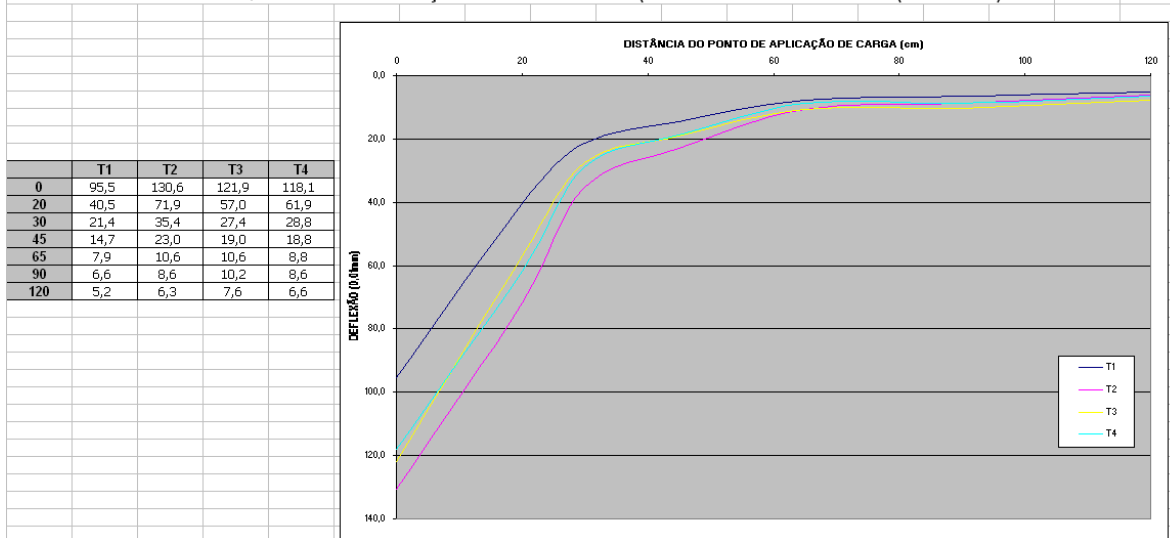
SP-303 BASE SALF																	
LAYMOD - BACIAS CALCULADAS PELO PROGRAMA VARIANDO OS MÓDULOS DAS CAMADAS																	
E1		15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
E2		2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
DEFLEXÃO	0	149,27	113,89	100,20	92,12	89,75	65,87	57,28	52,38	69,98	49,55	42,62	38,78	59,87	41,04	34,93	31,62
	20	92,81	62,34	76,89	73,14	44,69	40,69	38,57	37,08	29,84	27,41	26,19	25,32	22,55	20,76	19,92	19,33
	30	69,38	66,24	63,80	61,84	30,39	30,31	29,86	29,39	19,13	19,51	19,45	19,30	13,80	14,30	14,36	14,33
	45	47,17	48,01	47,80	47,39	19,35	20,31	20,65	20,79	11,90	12,62	12,93	13,10	8,49	9,06	9,32	9,47
	65	31,03	32,49	33,10	33,43	12,59	13,18	13,62	13,75	7,78	8,13	8,34	8,48	5,59	5,84	5,98	6,09
	90	23,11	22,81	22,97	23,19	10,91	10,01	9,79	9,74	7,67	6,70	6,41	6,29	6,16	5,18	4,87	4,73
	120	14,08	14,56	14,89	15,16	6,06	5,99	6,06	6,14	4,02	3,79	3,79	3,82	3,11	2,81	2,77	2,77
E1		23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333
E2		2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
DEFLEXÃO	0	147,16	110,93	97,16	89,19	89,17	64,82	56,08	51,16	69,73	48,99	41,92	38,04	59,75	40,68	34,45	31,10
	20	91,77	60,40	74,80	71,08	44,66	40,18	37,93	36,39	30,00	27,22	25,89	24,98	22,77	20,69	19,77	19,14
	30	68,57	64,89	62,33	60,36	30,24	29,99	29,47	28,97	19,08	19,38	19,28	19,11	13,77	14,24	14,28	14,23
	45	46,88	47,45	47,14	46,67	19,35	20,25	20,56	20,68	11,92	12,61	12,91	13,08	8,52	9,07	9,33	9,48
	65	30,99	32,42	33,01	33,29	12,63	13,22	13,67	13,80	7,83	8,17	8,38	8,63	5,64	5,87	6,02	6,12
	90	22,81	22,74	22,98	23,21	10,66	9,94	9,77	9,73	7,42	6,61	6,36	6,26	5,92	5,09	4,82	4,69
	120	14,02	14,54	14,92	15,20	6,05	5,99	6,08	6,16	4,02	3,79	3,80	3,83	3,10	2,81	2,78	2,78
E1		31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667
E2		2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
DEFLEXÃO	0	145,96	109,21	95,24	87,28	88,79	64,18	55,30	50,34	69,55	48,65	41,48	37,55	59,65	40,47	34,15	30,76
	20	91,34	79,30	73,48	69,73	44,74	39,88	37,50	35,91	30,17	27,11	25,69	24,73	22,97	20,66	19,66	19,00
	30	68,23	64,16	61,42	59,40	30,17	29,80	29,21	28,68	19,06	19,31	19,16	18,97	13,76	14,20	14,21	14,15
	45	46,84	47,21	46,78	46,26	19,37	20,23	20,51	20,61	11,95	12,62	12,91	13,06	8,55	9,08	9,33	9,48
	65	31,11	32,52	33,06	33,31	12,69	13,28	13,63	13,86	7,88	8,21	8,42	8,57	5,69	5,90	6,04	6,15
	90	22,74	22,86	23,13	23,37	10,50	9,92	9,79	9,77	7,25	6,57	6,35	6,26	5,74	5,04	4,79	4,67
	120	14,12	14,70	15,09	15,39	6,07	6,03	6,12	6,21	4,03	3,81	3,82	3,86	3,11	2,81	2,79	2,79
E1		40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000
E2		2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000	2000	4667	7333	10000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
DEFLEXÃO	0	144,50	107,47	93,24	85,23	88,35	63,62	54,62	49,60	69,33	48,36	41,10	37,13	59,51	40,30	33,91	30,48
	20	90,52	78,00	71,91	68,09	44,72	39,56	37,06	35,41	30,29	26,99	25,48	24,49	23,13	20,62	19,55	18,95
	30	67,42	63,10	60,13	58,06	30,02	29,56	28,89	28,32	19,00	19,20	19,02	18,81	13,73	14,15	14,14	14,06
	45	46,23	46,51	45,90	45,33	19,27	20,10	20,35	20,42	11,92	12,58	12,85	13,00	8,54	9,06	9,31	9,45
	65	30,60	32,06	32,49	32,72	12,61	13,22	13,55	13,78	7,86	8,19	8,40	8,55	5,69	5,89	6,04	6,15
	90	22,07	22,42	22,66	22,92	10,24	9,79	9,68	9,68	7,06	6,48	6,29	6,21	5,57	4,97	4,74	4,64
	120	13,61	14,30	14,66	14,98	5,96	5,95	6,04	6,14	3,98	3,78	3,79	3,83	3,09	2,80	2,77	2,78

LEGENDA:

BACIAS QUE SE APROXIMAM DAS BACIAS DE CAMPO



DADOS DE CAMPO - BACIAS QUE ATENDEM A RELAÇÃO ENTRE DVB E DFWD (SEGUNDO ESTUDO DO DER/SP(Oito trechos))



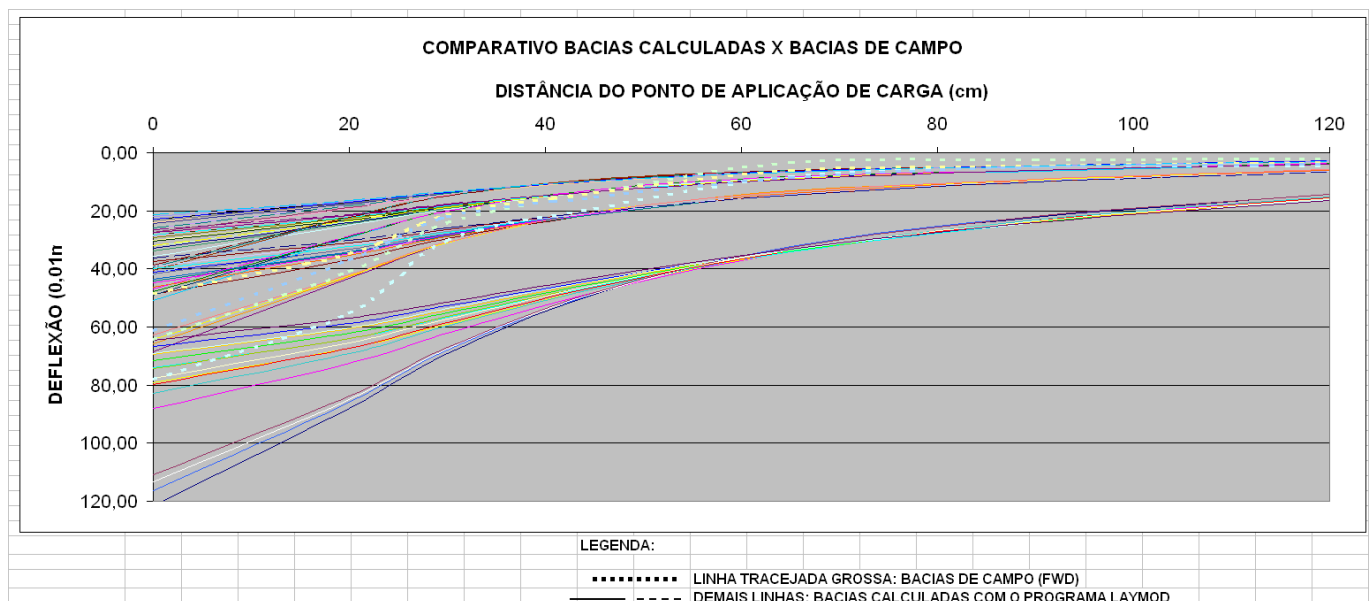
RESULTADO DE DEFLEXÕES DE VIGA BENKELMAN NO ELSYM-5

Nº BACIA (LAYMOD)	4	5	19	35	51		
E1	15000	15000	23333,33	31666,67	40000		
E2	10000	2000	7333,333	7333,333	7333,333		
E3	500	1200	500	500	500		
D0_FWD	92,12	89,75	97,16	95,24	93,24	(LAYMOD)	
D0_VB	142,8	62	88,92	87,11	85,93	(ELSYM-5)	
D0_VB/D0_FWD	1,550225	0,69082	0,915184	0,914651	0,921568		
LEGENDA:							
	BACIA SELECIONADA PARA ESTUDO						

SP-331 BASE CIMENTADA																	
LAYMOD - BACIAS CALCULADAS PELO PROGRAMA VARIANDO OS MÓDULOS DAS CAMADAS																	
E1		15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
E2		4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
DEFLEXÃO	0	121,38	87,97	79,34	74,11	68,40	48,84	44,04	41,24	50,92	35,58	32,06	30,06	41,96	28,62	25,76	24,16
	20	88,10	72,52	67,45	64,01	43,10	36,71	34,57	33,11	29,16	25,09	23,80	22,92	22,29	19,18	18,29	17,68
	30	69,19	62,09	59,05	56,76	31,20	29,64	28,73	27,98	20,10	19,56	19,16	18,80	14,80	14,59	14,39	14,19
	45	48,80	48,02	47,02	45,98	20,47	21,18	21,17	21,04	12,78	13,41	13,53	13,54	9,24	9,73	9,87	9,92
	65	32,34	33,97	34,24	34,10	13,20	13,99	14,27	14,41	8,23	8,64	8,82	8,94	5,96	6,20	6,33	6,41
	90	22,15	23,31	23,86	24,06	9,58	9,61	9,77	9,87	6,29	6,13	6,16	6,20	4,77	4,55	4,54	4,55
	120	14,36	15,36	15,86	16,05	5,88	6,17	6,32	6,40	3,72	3,81	3,90	3,94	2,75	2,75	2,80	2,84
E1		23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333	23333
E2		4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
DEFLEXÃO	0	116,43	82,75	74,37	69,50	65,89	46,32	41,59	38,94	49,11	33,86	30,36	28,45	40,49	27,29	24,43	22,89
	20	85,95	69,06	63,99	60,72	42,55	35,45	33,24	31,82	28,99	24,40	23,05	22,18	22,27	18,75	17,80	17,19
	30	67,95	59,62	56,46	54,20	30,98	28,89	27,88	27,12	20,05	19,20	18,73	18,35	14,80	14,38	14,13	13,91
	45	48,36	46,81	45,61	44,48	20,46	21,00	20,91	20,72	12,80	13,38	13,46	13,45	9,26	9,75	9,87	9,90
	65	32,23	33,68	33,80	33,53	13,22	14,07	14,34	14,44	8,25	8,72	8,92	9,02	5,98	6,27	6,41	6,49
	90	21,84	23,22	23,76	23,86	9,38	9,58	9,76	9,86	6,11	6,05	6,11	6,16	4,59	4,47	4,47	4,49
	120	14,20	15,35	15,88	16,03	5,83	6,20	6,36	6,43	3,68	3,84	3,92	3,97	2,71	2,77	2,82	2,85
E1		31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667	31667
E2		4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
DEFLEXÃO	0	113,42	79,84	71,48	66,75	64,17	44,79	40,04	37,45	47,84	32,80	29,28	27,39	39,44	26,47	23,59	22,06
	20	84,89	67,19	62,00	58,78	42,24	34,66	32,36	30,94	28,88	23,96	22,53	21,64	22,25	18,46	17,45	16,82
	30	67,55	58,35	55,04	52,77	30,93	28,44	27,33	26,54	20,07	18,97	18,43	18,03	14,85	14,24	13,95	13,71
	45	48,45	46,33	44,98	43,77	20,53	20,91	20,76	20,54	12,85	13,37	13,42	13,38	9,29	9,77	9,86	9,88
	65	32,53	33,79	33,83	33,48	13,31	14,18	14,44	14,52	8,29	8,80	9,00	9,09	6,01	6,33	6,48	6,56
	90	22,02	23,51	24,06	24,11	9,33	9,64	9,85	9,95	6,03	6,05	6,14	6,19	4,51	4,44	4,47	4,49
	120	14,43	15,68	16,26	16,40	5,86	6,29	6,46	6,54	3,67	3,88	3,98	4,02	2,69	2,79	2,85	2,89
E1		40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000
E2		4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000	4000	19333	34667	50000
E3		500	500	500	500	1167	1167	1167	1167	1833	1833	1833	1833	2500	2500	2500	2500
Nº BACIA		49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
DEFLEXÃO	0	110,78	77,52	69,07	64,43	62,74	43,66	38,85	36,28	46,78	32,02	28,47	26,59	38,56	25,87	22,96	21,44
	20	83,77	65,58	60,21	57,02	41,93	34,04	31,63	30,20	28,77	23,60	22,10	21,19	22,22	18,23	17,16	16,51
	30	66,96	57,17	53,86	51,38	30,85	28,05	26,84	26,02	20,08	18,77	18,17	17,74	14,89	14,13	13,78	13,52
	45	48,25	45,69	44,15	42,93	20,54	20,79	20,57	20,32	12,87	13,34	13,35	13,30	9,31	9,76	9,84	9,84
	65	32,48	33,59	33,51	33,14	13,32	14,20	14,44	14,51	8,30	8,83	9,03	9,12	6,01	6,36	6,51	6,59
	90	21,91	23,48	23,98	24,06	9,26	9,64	9,87	9,98	5,96	6,04	6,14	6,20	4,45	4,42	4,46	4,49
	120	14,37	15,70	16,28	16,47	5,84	6,31	6,49	6,58	3,65	3,90	4,00	4,05	2,67	2,81	2,87	2,91

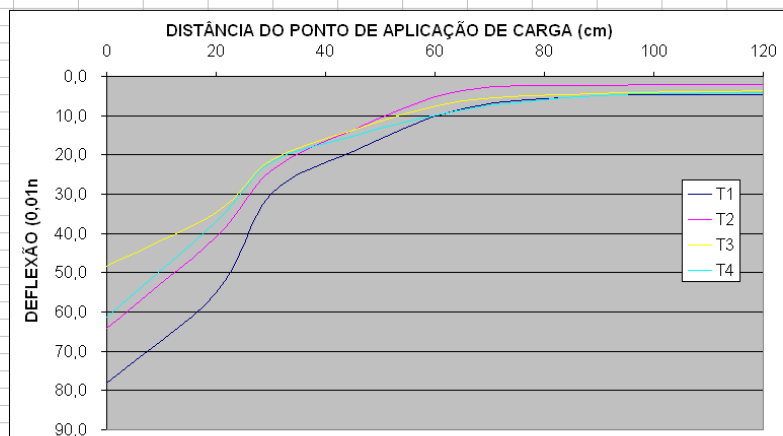
LEGENDA:

BACIAS QUE SE APROXIMAM DAS BACIAS DE CAMPO



DADOS DE CAMPO - BACIAS QUE ATENDEM A RELAÇÃO ENTRE DVB E DFW (SEGUNDO ESTUDO DO DER/SP(Oito trechos))

	T1	T2	T3	T4
0	78,1	64,2	48,4	61,2
20	55,2	40,8	34,7	37,0
30	30,0	24,0	21,4	21,9
45	19,1	13,8	13,8	15,2
65	8,2	3,5	6,2	8,5
90	4,8	2,3	4,5	4,9
120	4,6	2,1	3,5	4,1

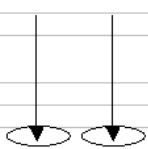
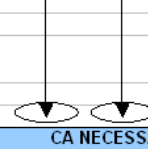
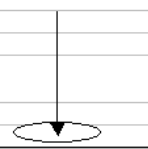
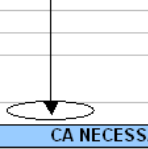


RESULTADO DE DEFLEXÕES DE VIGA BENKELMAN NO ELSYM-5

Nº BACIA (LAYMOD)	25	34	41	50	52	53		
E1	23000	32000	32000	40000	40000	40000		
E2	4000	19000	4000	19000	50000	4000		
E3	1800	500	1800	500	500	1200		
D0 FWD	49,11	79,84	47,84	77,52	64,43	62,74	(LAYMOD)	
D0 VB	39,58	77,73	39,08	75,98	64,55	52,5	(ELSYM-5)	
D0 VB/D0 FWD	0,81	0,97	0,82	0,98	1,00	0,84		
LEGENDA:								
	BACIAS SELECIONADA PARA ESTUDO							

ANEXO G – Critério para previsão de desempenho e reforço estrutural para projeto de pavimentos.

São apresentadas, as memórias do reforço de concreto asfáltico pelos procedimentos DNER PRO-11/79, DNER PRO-269/94 e análises mecânicas, realizada nas três bases estudadas.

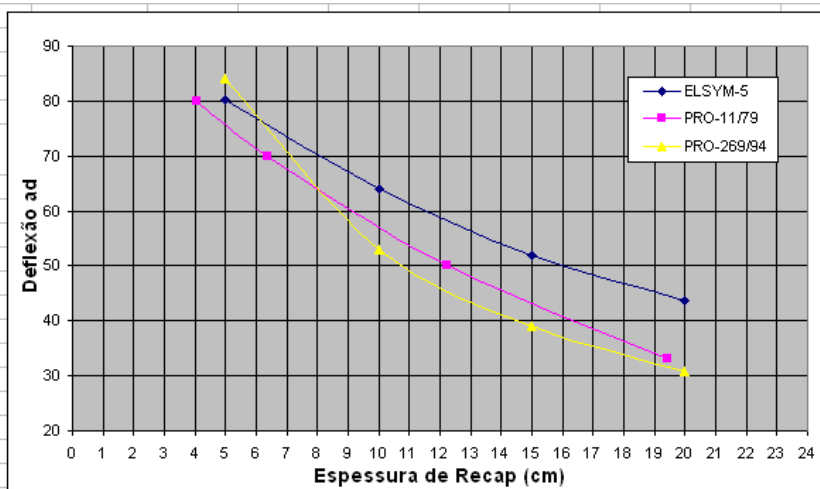
SP261 (CA + BASE GRANULAR)									
CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN									
		D0 at=101			Numero N	ESPESSURAS	MÓDULOS		
CA			CA NECESSARIO (RECAP)		Dadm	(cm)	(kgf/cm2)		
MH			CA			H_REF	35.000		
SL			MH			3,5	15.500		
			SL			17,0	2.850		
						-	500		
Número N		5,0E+06	1,0E+07	5,0E+07					
D0 adm (PRO11/79)		67,76	59,98	45,18					
D0 adm (PRO269/94)		77,37	67,92	50,19					
D0 at		101	101	101					
H_REF (PRO11/79)		6,95	9,1	14,0					
H_REF (PRO269/94)		4,7	6,5	11,2					
H_REF (ELSYM-5)		9,0	11,6	19,2					
CARREGAMENTO FWD									
		D0 at=118			Numero N	ESPESSURAS	MÓDULOS		
CA			CA NECESSARIO (RECAP)		Dadm	(cm)	(kgf/cm2)		
MH			CA			H_REF	35.000		
SL			MH			3,5	15.000		
			SL			17,0	2.800		
						-	500		
Número N		5,0E+06	1,0E+07	5,0E+07					
D0 adm (PRO11/79)		67,76	59,98	45,18					
D0 adm (PRO269/94)		77,37	67,92	50,19					
D0 at		118	118	118					
H_REF (PRO11/79)		9,6	11,76	16,7					
H_REF (PRO269/94)		6,2	8,1	12,8					
H_REF (ELSYM-5)		11,0	13,5	21,0					

VB E BASE GRANULAR

ELSYM-5	cm	DO adm
5,00		80,17
10,00		63,96
15,00		52,01
20,00		43,59

PRO-11	cm	DO adm
4,07		80,00
6,39		70,00
12,23		50,00
19,45		33,00

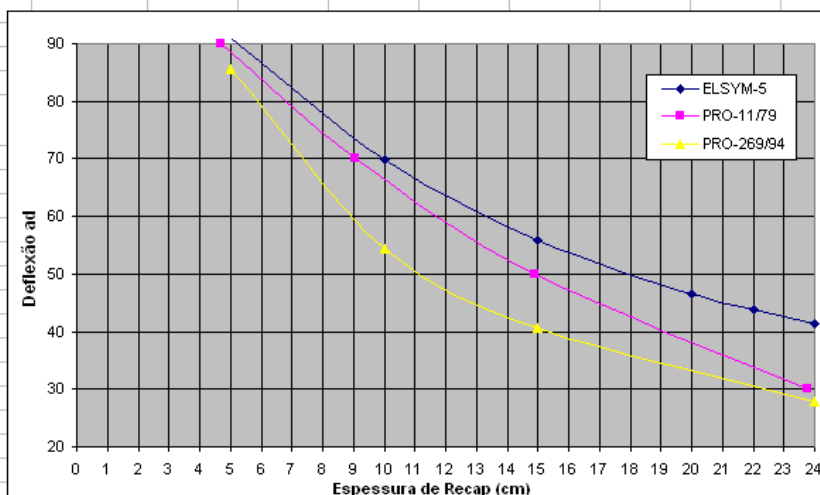
PRO-269	cm	DO adm
5,00		84,10
10,00		52,90
15,00		39,10
20,00		30,90

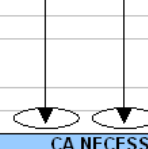

FWD E BASE GRANULAR

ELSYM-5	cm	DO adm
5,00		90,99
10,00		69,82
15,00		55,94
20,00		46,61
22,00		43,77
24,00		41,32

PRO-11	cm	DO adm
4,71		90,00
9,07		70,00
14,92		50,00
23,79		30,00

PRO-269	cm	DO adm
5,00		85,70
10,00		54,50
15,00		40,70
24,00		27,80

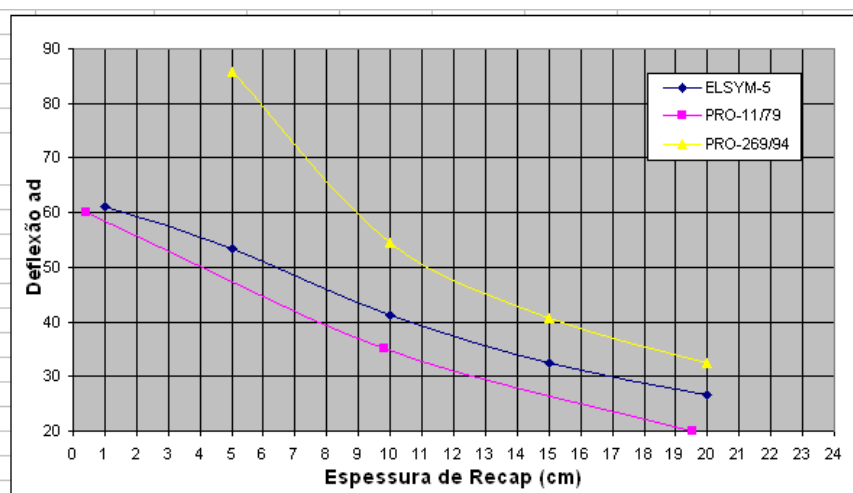


SP303 (TS + BASE SAFL)									
CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN									
									
						Numero N		ESPESSURAS	
						Dadm		(cm)	
								MÓDULOS	
								(kgf/cm2)	
D0 at=62				CA NECESSARIO (RECAP)				H_REF	
TS				TS				2,0	
SAFL				SAFL				15,0	
SL				SL				-	
								35.000	
								16.000	
								2.100	
								1.200	

VB E BASE SAFL		
ELSYM-5	cm	D0 adm
1,00		60,97
5,00		53,36
10,00		41,10
15,00		32,52
20,00		26,72

PRO-11	cm	D0 adm
0,43		60,00
9,79		35,00
19,51		20,00

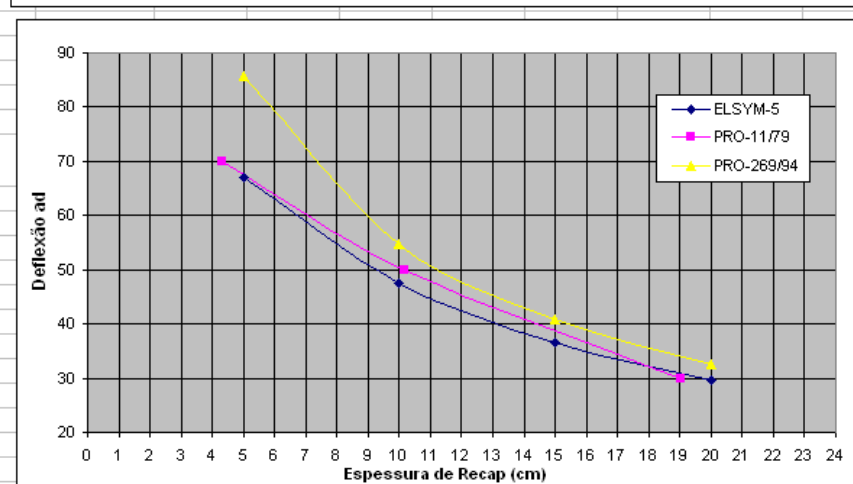
PRO-269	cm	D0 adm
5,00		85,80
10,00		54,60
15,00		40,80
20,00		32,50

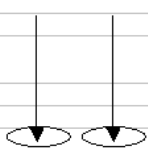
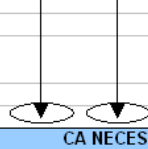
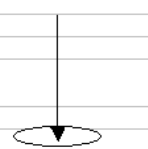
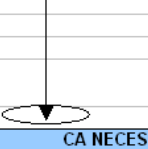


FWD E BASE SAFL		
cm		D0 adm
5,00		66,89
10,00		47,44
15,00		36,46
20,00		29,58

ELSYM-5		
cm		D0 adm
4,33		70,00
10,17		50,00
19,05		30,00

PRO-269	cm	D0 adm
5,00		85,80
10,00		54,60
15,00		40,80
20,00		32,50



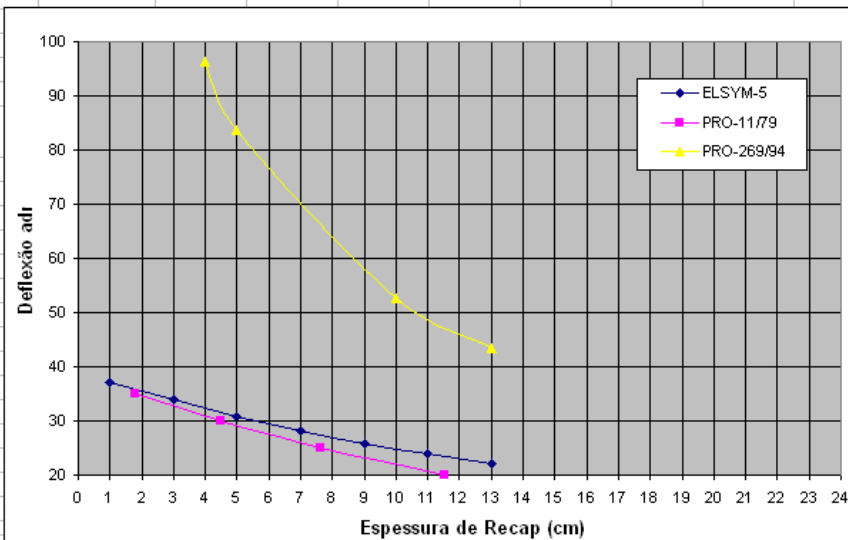
SP331 (CA + BASE SOLO-CIMENTO)															
CARREGAMENTO VIGA BENKELMAN															
		D0 at=39				<table><tr><th>Numero N</th><th>ESPESSURAS</th><th>MÓDULOS</th></tr><tr><th>Dadm</th><th>(cm)</th><th>(kgf/cm2)</th></tr></table>		Numero N	ESPESSURAS	MÓDULOS	Dadm	(cm)	(kgf/cm2)		
Numero N	ESPESSURAS	MÓDULOS													
Dadm	(cm)	(kgf/cm2)													
CA				CA NECESSARIO (RECAP)		H_REF		35.000							
SC				CA		5,0		33.000							
SL				SC		10,0		4.100							
				SL		-		1.800							
Número N		5,0E+06		1,0E+07		5,0E+07									
D0 adm (PRO11/79)		33,88		29,99		22,59									
D0 adm (PRO269/94)		77,37		67,92		50,19									
D0 at		39		39		39									
H_REF (PRO11/79)		2,36		4,5		9,5									
H_REF (PRO269/94)		1,5		16,1		22,8		FATOR DE REDUÇÃO: 0,50							
H_REF (PRO269/94)		0,0		0,0		15,4		FATOR DE REDUÇÃO: 0,70							
H_REF (ELSYM-5)		3,2		5,7		12,5									
CARREGAMENTO FWD															
		D0 at=48				<table><tr><th>Numero N</th><th>ESPESSURAS</th><th>MÓDULOS</th></tr><tr><th>Dadm</th><th>(cm)</th><th>(kgf/cm2)</th></tr></table>		Numero N	ESPESSURAS	MÓDULOS	Dadm	(cm)	(kgf/cm2)		
Numero N	ESPESSURAS	MÓDULOS													
Dadm	(cm)	(kgf/cm2)													
CA				CA NECESSARIO (RECAP)		H_REF		35.000							
SC				CA		5,0		32.000							
SL				SC		10,0		4.000							
				SL		-		1.800							
Número N		5,0E+06		1,0E+07		5,0E+07									
D0 adm (PRO11/79)		33,88		29,99		22,59									
D0 adm (PRO269/94)		77,37		67,92		50,19									
D0 at		48		48		48									
H_REF (PRO11/79)		5,9		8,1		13,1									
H_REF (PRO269/94)		13,5		16,1		22,8		FATOR DE REDUÇÃO: 0,50							
H_REF (PRO269/94)		0,0		9,8		15,4		FATOR DE REDUÇÃO: 0,70							
H_REF (ELSYM-5)		6,5		8,9		15,5									

VB E BASE SC

ELSYM-5	cm	D0 adm
1,00		37,21
3,00		33,92
5,00		30,87
7,00		28,18
9,00		25,84
11,00		23,83
13,00		22,09

PRO-11	cm	D0 adm
1,79		36,00
4,47		30,00
7,64		25,00
11,51		20,00

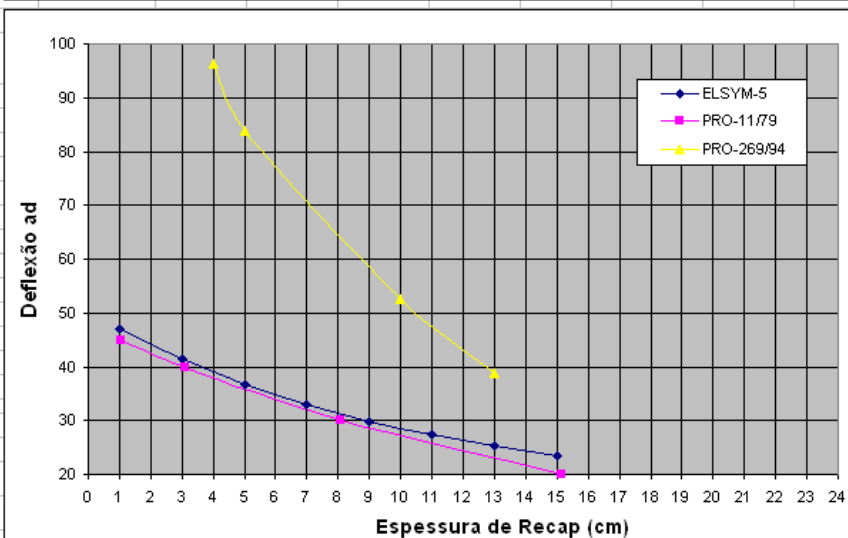
PRO-269	cm	D0 adm
4,00		96,30
5,00		83,80
10,00		52,60
13,00		43,30


FWD E BASE SC

ELSYM-5	cm	D0 adm
1,00		47,15
3,00		41,35
5,00		36,67
7,00		32,89
9,00		29,82
11,00		27,30
13,00		25,20
15,00		23,43

PRO-11	cm	D0 adm
1,05		45,00
3,09		40,00
8,09		30,00
15,14		20,00

PRO-269	cm	D0 adm
4,00		96,30
5,00		83,80
10,00		52,60
13,00		38,70



MÉMOIRA CÁLCULO DE HR PRO-269

PRO-269/94						
Número N	D _{carac} (0,01mm)	D _{adm} (0,01mm)	tipo de solo	h Exist. (cm)	hef (cm)	HR (cm)
5,00E+06	101	77	II	3,5	3,2	4,7
1,00E+07	101	68	II	3,5	3,2	6,5
5,00E+07	101	50	II	3,5	3,2	11,2
5,00E+06	62	77	II	2,0	2,0	0,0
1,00E+07	62	68	II	2,0	2,0	0,0
5,00E+07	62	50	II	2,0	2,0	12,9
5,00E+06	39	39	II	5,0	5,0	13,5
1,00E+07	39	34	II	5,0	5,0	16,1
5,00E+07	39	25	II	5,0	5,0	22,8
5,00E+06	39	54	II	5,0	5,0	0,0
1,00E+07	39	48	II	5,0	5,0	0,0
5,00E+07	39	35	II	5,0	5,0	15,4
5,00E+06	118	77	II	3,5	2,1	6,2
1,00E+07	118	68	II	3,5	2,1	8,1
5,00E+07	118	50	II	3,5	2,1	12,8
5,00E+06	90	77	II	2,0	2,0	6,4
1,00E+07	90	68	II	2,0	2,0	8,2
5,00E+07	90	50	II	2,0	2,0	12,9
5,00E+06	48	39	II	5,0	5,0	13,5
1,00E+07	48	34	II	5,0	5,0	16,1
5,00E+07	48	25	II	5,0	5,0	22,8
5,00E+06	48	54	II	5,0	5,0	0,0
1,00E+07	48	48	II	5,0	5,0	9,8
5,00E+07	48	35	II	5,0	5,0	15,4
LEGENDA:						
	BASE CIMENTADA ADMITIDA COMO ÍNTEGRA (DEFLEXÃO ADMISSÍVEL MULTIPLICADA POR FATOR DE 0,5)					
	BASE CIMENTADA ADMITIDA COMO PARCIALMENTE DETERIORADA (DEFLEXÃO ADMISSÍVEL MULTIPLICADA POR FATOR					
	BASE GRANULAR					
	BASE SALT					
	PRO 269 CALCULADO COM DEFLEXÃO DA VIGA BENKELMAN					
	PRO 269 CALCULADO COM DEFLEXÃO DO FWD					