Campus de São Carlos

UMA ADAPTAÇÃO DOS MODELOS DE DETERIORAÇÃO DO
HDM III À REGIÃO CENTRO DE SÃO PAULO

VALÉRIA MARIA SESTINI

ORIENTADOR: PROF. DR. MANOEL HENRIQUE ALBA SÓRIA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UMA ADAPTAÇÃO DOS MODELOS DE DETERIORAÇÃO DO
HDM III À REGIÃO CENTRO DE SÃO PAULO

VALÉRIA MARIA SESTINI

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Transportes.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036401

São Carlos
1997

Class.	TESE EESC
Cutt.	5359
Tombo	T102/97

Área: Transportes

st 0746353

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S494a Sestini, Valéria Maria
Uma adaptação dos modelos de deterioração do
HDM III à região centro de São Paulo / Valéria
Maria Sestini. -- São Carlos, 1997.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Transportes
Orientador: Prof. Dr. Manoel Henrique Alba
Sória

1. Garantia de pavimentos. 2. Modelos de
deterioração. 3. Desempenho de pavimentos.
4. HDM III I. Título

DEDICATÓRIA

À minha família.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória pelo apoio e orientação fornecidos durante a elaboração deste trabalho;

Ao Dr. Cesar Augusto Vieira de Queiroz, quem primeiro me sugeriu o tema desta dissertação e que acompanhou todas as suas etapas, pela atenção e incentivo sempre presentes;

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, em especial ao Prof. Dr. Fernando Custódio Corrêa *"in memoriam"* pelo entusiasmo, motivação e apoio no início do trabalho;

Aos Engenheiros do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho;

Aos funcionários da Residência de Conservação de São Carlos do DER de São Paulo, que muito contribuíram nos levantamentos de campo;

Aos funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, em especial ao Paulinho, Gigante, Morasco e Oliveira, que também contribuíram nos levantamentos de campo e à Heloisa Helena Morgado Belo e ao Antônio Carlos Mariano;

Às Engenheiras Sandra Oda e Marony Costa Martins pela colaboração nos levantamentos de campo;

Ao Engº Paulo Roberto S. R. Lima, do GEIPOT, pelo fornecimento de parte dos dados da PICR;

Aos amigos da Pós Graduação do Departamento de Transportes da EESC-USP, com quem tenho convivido durante todos estes anos.

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xx
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxii
RESUMO	xxiii
<i>ABSTRACT</i>	xxiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Modelo HDM III	2
1.2 Modelos de deterioração do procedimento DNER-PRO 159/85 e índice de gravidade global, procedimento DNER-PRO 08/94	4
1.3 Objetivos da dissertação	4
2 FUNDAMENTOS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS	5
2.1 Conceito de serventia e desempenho	6
2.2 Modelos de deterioração	8

2.3 Avaliação de pavimentos	32
3 LEVANTAMENTOS DE CAMPO (TRECHOS EXPERIMENTAIS)	44
3.1 Determinação das deflexões do pavimento	52
3.2 Índice de gravidade global	53
3.3 Especificação de serviço DNER-ES 128/83	54
3.4 Método de nível e mira para avaliação do quociente de irregularidade	57
3.5 Medições de irregularidade com equipamentos tipo resposta	60
3.6 Resumo dos dados de avaliação de pavimentos coletados	60
3.7 Dados de tráfego	61
4 SIMULAÇÃO COM O MODELO HDM III	62
4.1 Fonte dos dados	62
4.2 Fatores de Equivalência de tráfego para serem utilizados no modelo HDM III	68
4.3 Taxa de crescimento do tráfego	74
4.4 Definição de estratégias	79
4.5 Saídas do HDM Manager	79
5 ANÁLISE DOS DADOS	81

5.1 Análise da evolução dos parâmetros descritivos da condição da rodovia num trecho específico e comparação com o previsto pelo modelo HDM III....	85
5.2 Calibração do Modelo HDM III	98
6 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DE EQUIPAMENTOS TIPO FWD COM OS DA VIGA BENKELMAN	129
6.1 Tratamento estatístico dos dados obtidos	132
7 CONCLUSÕES	138
7.1 Levantamentos de campo	138
7.2 Simulação com o modelo HDM III	138
7.3 Comparação dos resultados de campo com os valores previstos pelo modelo HDM III	139
7.4 Correlação dos resultados de equipamentos tipo FWD com os da viga Benkelman	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
OBRAS CONSULTADAS	149
APÊNDICE 1	
APÊNDICE 2	

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Conceito serventia - desempenho.....	8
Figura 02 - Utilização de um modelo de deterioração do pavimento para estimar a progressão da deterioração, prever o ano em que o pavimento deverá sofrer uma intervenção e prever o desempenho das diversas alternativas de intervenção que po- derão ser adotadas	9
Figura 03 - Atividades de um sistema de gerência de pavimentos (SGP)	32
Figura 04 - Esquema do simulador de quarto de carro	40
Figura 05 - Localização dos trechos avaliados	44
Figura 06 - Seção longitudinal e a disposição dos segmentos com os diver- sos tipos de base da pista experimental de Dois Córregos	45
Figura 07 - Seção transversal do pavimento - pista experimental de Caba- ceiras - SP255, Km 53 + 850m ao km 55 + 450m	47
Figura 08 - Perfil longitudinal e a disposição dos segmentos com teores variados de cimento da pista experimental de Cabaceiras na SP 255, Km 53 + 850m ao km 55 + 450m	48

Figura 09 - Trecho da rodovia Washington Luís, entre os km 217 e km 227. Localização dos segmentos avaliados	50
Figura 10 - Seção Transversal do Pavimento tipo 1 - primeira pista - SP 310	51
Figura 11 - Seção Transversal do Pavimento tipo 2 - segunda pista - SP 310	51
Figura 12 - Localização dos segmentos-testemunha e superfícies de avaliação em um subtrecho homogêneo	54
Figura 13 - Planilha para calcular o QI a partir das leituras do nivelamento topográfico	59
Figura 14 - Comparação entre as previsões do índice de irregularidade do modelo HDM III, considerando o "ESAL factor" da PICR e o valor médio do período de avaliação	73
Figura 15 - Ajuste linear para determinação da taxa de crescimento do tráfego de caminhões pesados, no trecho de Cabaceiras, sentido Ribeirão Preto - Araraquara	77
Figura 16 - Evolução da condição da rodovia no trecho com 10% de cimento na base, em Cabaceiras, adotando-se a estratégia de remendos em 90% da área de painéis	89
Figura 17 - Evolução da condição da rodovia no trecho com 10% de cimento na base, em Cabaceiras, adotando-se como estratégias de manutenção execução de remendos em 90% da área de painéis e aplicação de lama asfáltica em 1985	91
Figura 18 - Comparação entre os índices de irregularidade internacional (IRI) previstos pelo modelo HDM III, considerando como 1ª estratégia de manutenção apenas execução de remendos	

durante o período de análise e como 2a estratégia remendos mais aplicação de lama asfáltica em 1985, no trecho de Cabaceiras com 10 % de cimento na base	92
Figura 19 - Comparação entre os parâmetros descritivos da condição da rodovia previstos pelo modelo HDM III e os medidos nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e rodovia Washington Luiz.....	95
Figura 20 - Linha de tendência e coeficiente de determinação da reta ajustada para os parâmetros indicadores da condição do pavimento previstos pelo modelo HDM III e medidos nos trechos da rodovia Washington Luiz	97
Figura 21 - Ajuste da linha de tendência ao incremento anual no IRI previsto pelo modelo HDM III bem como no IRI observado nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e rodovia Washington Luiz.....	97
Figura 22 - Índice internacional de irregularidade (IRI) nos trechos do acesso a Dois Córregos	99
Figura 23 - Linha de tendência ajustada para o acréscimo no IRI previsto pelo modelo HDM III e para o IRI medido nos trechos de acesso a Dois Córregos, em dois anos consecutivos	99
Figura 24 - Ajuste linear para os dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III com período de análise de 15 anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos	99
Figura 25 - Ajuste da reta de mínimos quadrados aos dados de IRI medido versus IRI previsto pelo modelo HDM III com período de análise de dois anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos	103

Figura 26 - Modelo de regressão linear passando pela origem, ajustado aos dados de IRI medidos em 1994 versus IRI previstos pelo HDM III para 1994, considerando período de análise de dois anos	104
Figura 27 - Ajuste da reta de mínimos quadrados aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III, nos trechos de Cabaceiras, passando pela origem	107
Figura 28 - Análise de regressão quadrática aplicada aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III com período de análise de 17 anos, nos trechos de Cabaceiras	110
Figura 29 - Ajuste linear para os dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III, nos trechos da rodovia Washington Luiz	114
Figura 30 - Reta de mínimos quadrados passando pela origem, ajustada para os dados de IRI previstos pelo modelo HDM III versus IRI medidos, considerando todos os trechos avaliados e período de análise de 1 ano	118
Figura - 31 Análise de regressão linear múltipla aplicada aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo HDM III com período de análise de um ano, utilizando variável "dummy" A para tipo de revestimento	123
Figura 32 - Reta de mínimos quadrados ajustada aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo HDM III com período de análise de um ano, considerando todos os trechos revestido com concreto asfáltico	127

Figura 33 - Análise de regressão linear simples para os valores de deflexão medidos com a viga Benkelman e com equipamentos do tipo FWD	137
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Modelos de deterioração existentes.....	14
Tabela 02 - Classificação dos tipos de revestimento dos pavimentos, após manutenção ou reabilitação	24
Tabela 03 - Tipos de pavimentos, para os quais foram desenvolvidos mo- delos individuais prevendo o início do trincamento	25
Tabela 04 - Tipos de pavimentos e respectivos coeficientes para previsão da progressão do trincamento	27
Tabela 05 - Tipos de irregularidade e respectivas dimensões	39
Tabela 06 - Matriz de correlação de variáveis usadas para desenvolver a eq.(15)	43
Tabela 07 - Dados sobre as seções testadas e os respectivos materiais, no trecho experimental de Dois Córregos	46
Tabela 08 - Número de dados coletados para a dissertação	60
Tabela 09 - Classificação de veículos	61
Tabela 10 - Características do pavimento no trecho de Cabaceiras, SP 255, km 54, faixa sentido Ribeirão Preto - Araraquara	64

Tabela 11 - Características do pavimento no trecho de Cabaceiras, SP 255, km 54, faixa sentido Araraquara - Ribeirão Preto	65
Tabela 12 - Características do pavimento no trecho de acesso a Dois Cór- regos	66
Tabela 13 - Características do pavimento no trecho da rodovia Washing- ton Luiz	67
Tabela 14 - Cálculo do "ESAL factor" (AF) para caminhões médios, com 2 eixos e 6 rodas	71
Tabela 15 - "ESAL factor" para cada grupo de veículos, calculados com base nos dados de pesagem de veículos realizada pelo DER- SP, na rodovia Anhanguera (SP330) em 1993	72
Tabela 16 - "ESAL factor" para cada grupo de veículos, determinados na PICR, em 21 de setembro de 1977	72
Tabela 17 - Valor médio do "ESAL factor" no período de análise	72
Tabela 18 - Comparação entre as previsões do índice internacional de irregula-ridade, do modelo HDM III, considerando o "ESAL factor" da PICR e o valor médio do período de análise	73
Tabela 19 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, na SP 255, km 54, sentido Ribeirão Preto - Araraquara	75
Tabela 20 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, na SP 255, km 54, sentido Araraqua- ra - Ribeirão Preto	76

Tabela 21 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, no acesso da SP 225 a Dois Córregos	76
Tabela 22 - Cálculo da taxa de crescimento para caminhões pesados, no trecho de Cabaceiras, sentido Ribeirão Preto - Araraquara	77
Tabela 23 - Taxas de crescimento de tráfego na SP 255, km 54	78
Tabela 24 - Taxas de crescimento de tráfego no acesso da SP 225 a Dois Córregos	78
Tabela 25 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, na rodovia Washington Luiz, SP 310, trecho entre os Km 217 e km 227	78
Tabela 26 - Taxas de crescimento de tráfego na rodovia Washington Luiz, SP 310, trecho entre os Km 217 e km 227	78
Tabela 27 - Descrição dos Trechos Analisados	83
Tabela 28 - Numero total de avaliações em cada tipo de pavimento	84
Tabela 29 - Número total de pontos observados, disponível para comparação com os valores previstos pelo modelo HDM III, para cada tipo de pavimento	84
Tabela 30 - Área de trincas e irregularidade previstas pelo modelo HDM III para 1995, nas duas estratégias consideradas, para o trecho de Cabaceiras com 10 % de cimento na base (T31), sentido Ribeirão Preto	86

Tabela 31 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear para os dados de IRI medido versus IRI previsto pelo HDM III com período de análise de 15 anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos	101
Tabela 32 - Resultados estatísticos da análise de regressão aplicada aos dados de IRI medido versus IRI previsto pelo modelo HDM III com período de análise de dois anos, dos trechos do acesso a Dois Córregos	103
Tabela 33 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão, sem a interseção, aplicada aos dados de IRI medido versus IRI previsto pelo modelo HDM III com período de análise de dois anos, dos trechos do acesso a Dois Córregos	106
Tabela 34 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear aplicada aos sub-trechos de Cabaceiras	108
Tabela 35 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear sem a interseção, aplicada aos sub-trechos de Cabaceiras, com período de análise de 17 anos	109
Tabela 36 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão aplicada aos dados de IRI dos trechos de Cabaceiras, considerando um período de análise de 17 anos para efeito de simulação com o modelo HDM III	112
Tabela 37 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear aplicada aos dados de IRI do trecho da rodovia Washington Luiz	113
Tabela 38 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear aplicada aos dados de IRI dos trechos da rodovia Washington Luiz	115

Tabela 39 - Resultados estatísticos da análise de regressão linear aplicada aos dados de IRI previstos pelo modelo HDM III, com período de análise de um ano, versus IRI medidos nos trechos avaliados	118
Tabela 40 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear, passando, pela origem aplicada aos valores de IRI considerando todos os trechos avaliados	119
Tabela 41 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear múltipla utilizando a variável "dummy" B para o tipo de base do pavimento	122
Tabela 42 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear múltipla utilizando a variável "dummy" A para o tipo de revestimento do pavimento	124
Tabela 43 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear simples aplicada aos valores de IRI medidos e previstos pelo modelo HDM III com período de análise de 1 ano, considerando todos os trechos revestidos com concreto asfáltico	126
Tabela 44 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear simples considerando todos os trechos revestidos com concreto asfáltico	127
Tabela 45 - Unidades de amostragem, suas bem como tipo e espessura do pavimento	131
Tabela 46 - Dados utilizados na análise de regressão	133

Tabela 47 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear múltipla utilizando a variável “dummy” para o tipo de revestimento e para o tipo de base do pavimento	134
Tabela 48 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear para os valores de deflexão medidos com a viga Benkelman e com equipamentos do tipo FWD	135
Tabela 49 - Fatores de deterioração definidos na presente dissertação	142

Lista de abreviaturas e siglas

AASHO	- "American Association of State Highway Officials"
AASTHO	- "American Association of State Highway and Transportation Officials"
ASTM	- "American Society for Testing and Materials"
BGTC	- Brita Graduada Tratada com Cimento
BIRD	- Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento
CA	- Concreto Asfáltico
CPGP	- Comissão Permanente de Gerência de Pavimentos do DNER
DER-SP	- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	- Departamento Nacional de estradas de Rodagem
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
ESA	- "Equivalent Standard Axle"
ESAL	- "Equivalent Standard Axle Loads"
FWD	- "Falling Weight Deflectometer"
GEIPOT	- Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
HDM	- "Highway Design and Maintenance Standards Model"
HRB	- "Highway Research Board"
IGG	- Índice de Gravidade Global
IGI	- Índice de Gravidade Individual
IPEA	- Instituto de Planejamento Econômico
IPR	- Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	- "International Roughness Index"
IRRE	- "The International Road Roughness Experiment"
MH	- Macadame Hidráulico
MR	- Módulo de Resiliência

NM	- Nível e Mira
PCI	- "Pavement Condition Index"
PCR	- "Pavement Condition Rating"
PICR	- Pesquisa de Interrelacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias
PM	- Proctor Modificado
PNUD	- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PQI	- "Pavement Quality Index"
PS	- Proctor Simples
PSI	- "Present Serviceability Index"
QI	- "Quarter Car Index"
QI	- Quociente de Irregularidade
RCI	- "Riding Comfort Index"
RMSVA	- "Root Mean Square Vertical Acceleration"
SAFL	- Solo Arenoso Fino Laterítico
SAI	- "Strutural Adequacy Index"
SB	- Solo Brita
SC	- Solo-Cimento
SGP	- Sistema de Gerência de Pavimentos
SUBIN	- Secretaria de Cooperação Econômica e Técnica Internacional
TB	- Trinca de Bloco
TBE	- Trinca de Bloco com Erosão
TRDF	- "Texas Research and Development Foundation"
TS	- Tratamento Superficial
TS-3	- Tratamento Superficial Triplo
VDM	- Volume Diário Médio

Lista de símbolos

α	- Nível de Significância
AF4	- "ESAL Factor" para LE=4,0
AXL	- Carga Média no Eixo
b	- Comprimento de Base
C	- Trincas
D _{BENK}	- Deflexão Média do Trecho Obtida com Viga Benkelman
D _{FWD}	- Deflexão Média do Trecho Obtida com FWD
EqOp	- Equivalência de Operações
FE	- Fator de Equivalência
IC	- Intervalo de Confiança
LE	- Expoente de Equivalência
P	- Painelas
Qlr	- Estimativa do QI pela Aceleração Média Quadrática;
r	- Taxa de Crescimento do Tráfego
R ²	- Coeficiente de Determinação
RD	- Afundamento das Trilhas de Rodas
s	- Intervalo de Amostragem
SAXL	- Carga Padrão do Eixo
SBI	- Estimativa da Derivada da Cota no Ponto i
SV	- Média da Variância das Inclinações Longitudinais
t	- Número de Anos no Período de Análise;
TRE	- Trilha Externa
TRI	- Trilha Interna
VA	- Aceleração Vertical Média Quadrática

Resumo

Com o objetivo de comparar as condições do pavimento previstas pelo modelo HDM III com as observadas, foram avaliados três trechos rodoviários, divididos num total de 19 subtrechos homogêneos, na região central do estado de São Paulo. O método adotado para medir a irregularidade do pavimento nestes trechos foi o de nível e mira. As deflexões recuperáveis foram medidas com a viga Benkelman e com aparelho tipo FWD ("Falling Weight Deflectometer"). O levantamento da condição da superfície baseou-se na especificação de serviço DNER-ES 128/83 e no procedimento DNER-PRO 08-94. Durante todo o período de avaliação foram feitos registros em vídeo (filmagens), dos trechos selecionados. Foi feita uma contagem de tráfego em cada trecho e definido o fator de veículo com base em dados de pesagem de 1993. Com base nestes dados foram testados alguns dos modelos de deterioração do HDM III, aplicados aos casos específicos dos pavimentos que compõem os trechos avaliados. Verificada a necessidade de adaptação destes modelos à região de estudo foram definidos, através de análise de regressão, alguns fatores de deterioração para serem aplicados diretamente no modelo HDM III. Tendo em vista que o modelo HDM III utiliza a deflexão medida com a viga Benkelman, definiu-se uma correlação destes resultados com a deflexão recuperável do pavimento medida com equipamentos tipo FWD.

Abstract

Three highway section divided in nineteen homogeneous subsections were studied in order to compare the pavement conditions predicted by the HDM III model with the values measured "in situ". The roughness was measured by the road and level method and recoverable deflections with Benkelman beam and FWD (Falling Weight Deflectometer). The surface distress survey was based on DNER-ES 128/83 and DNER-PRO 08/94 standards. Television tapes were recorded during the period of evaluation. Traffic countings in each section were made and the equivalent standard axle load factors were estabilished, based on load data from 1993. Running the HDM III software with these data, the prediction models within the HDM III were tested. For the sections under analysis it had shown that adaptations to the deterioration factors should be done. These new deterioration factors are suggested. Since the HDM III model uses the Benkelman beam values, a correlation between FWD and Benkelman beam was established.

1 - Introdução e objetivos da dissertação

A deterioração da rede rodoviária e a limitação dos recursos disponíveis para a sua reabilitação gerou a necessidade de um processo mais racional para selecionar os trechos prioritários numa rede rodoviária. Em consequência, os países desenvolvidos e em desenvolvimento têm adotado os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) para melhor gerenciar a infra-estrutura rodoviária.

Um SGP envolve, num sentido mais amplo, todas as atividades relacionadas ao projeto, construção, manutenção, reabilitação e pesquisa na área de pavimentos. Dentre estas as principais atividades de um SGP são:

- Avaliação periódica do pavimento, que alimenta o banco de dados do SGP. Para "administrar" ou gerir uma rodovia ou rede rodoviária, os tomadores de decisão devem conhecer as condições do pavimento, inclusive acompanhando a serventia do pavimento ao longo do tempo (desempenho).
- Programação de prioridades de investimentos ao nível de rede ou de trecho específico.

A questão fundamental é prever o custo total do ciclo de vida do pavimento, considerando os custos de construção, manutenção e operação de veículos. Os Sistemas de Gerência de Pavimentos utilizam, para tanto, modelos de deterioração que possibilitam a comparação dos custos de construção combinados com futuros custos de manutenção e operação de veículos, de diversas alternativas de intervenções em pavimentos já existentes ou de diversas composições da estrutura para construção de novos pavimentos.

Segundo HAAS et al. (1994), há atualmente vários modelos adotados por vários órgãos rodoviários em diferentes países. Muitos destes modelos prevêem o mesmo tipo de defeito, utilizando diferentes dados, que são tipicamente tráfego, estrutura do pavimento, materiais e clima. São adotados modelos específicos para aplicação em projeto e construção de pavimentos novos ou em atividade de reabilitação ou manutenção de pavimentos existentes.

Porém os modelos de deterioração devem refletir as condições do local onde serão aplicados e para tanto, devem ser baseados em dados locais ou aferidos e modificados com base em tais dados.

1.1 - Modelo HDM III

O modelo HDM III foi desenvolvido pelo Banco Mundial e tem sido utilizado em mais de 40 países em desenvolvimento, bem como economias em transição, para avaliação de projetos, desenvolvimento de programas rodoviários e planejamento ao nível de rede.

No Brasil, tem sido adotado por alguns órgãos rodoviários, inclusive pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, região em que desenvolveu-se a presente dissertação.

O modelo HDM III foi desenvolvido em estudo feito em duas fases.

A primeira fase, visando o desenvolvimento de um método para análise econômica de projetos rodoviários em países em desenvolvimento, teve início em 1969 e foi completada em 1971.

Participaram desta fase uma equipe do "Massachusetts Institute of Technology" em conjunto com o "British Transport and Road Research Laboratory" e foi desenvolvida a estrutura conceitual e o primeiro Modelo de Custos Rodoviários inter-relacionando os custos de construção, manutenção e operação de veículos.

Na segunda fase foram iniciados em vários países em desenvolvimento (Quênia, Ilhas do Caribe, Brasil e Índia), estudos visando a obtenção de resultados experimentais que pudessem servir de base empírica para o desenvolvimento do modelo.

As pesquisas sobre a deterioração dos pavimentos foram conduzidas no Quênia e no Brasil. Os estudos conduzidos no Quênia, entre 1971 e 1974, forneceram a base de dados para o desenvolvimento dos modelos de deterioração da segunda versão do HDM.

Segundo WATANATADA et al (1987) a grande maioria dos trabalhos de campo foram realizados no Brasil, entre 1975 e 1984. Neste estudo, conduzido por um grupo de especialistas do Brasil e de nove outros países, foi considerada uma ampla variedade de estruturas de pavimentos, tipos de materiais, volumes de tráfego, traçados geométricos e tipos de veículos.

O projeto de pesquisa realizado no Brasil, intitulado Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), resultou de um contrato assinado em janeiro de 1975 entre o governo do Brasil e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), representados respectivamente pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT) e pelo Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD). Colaboraram neste projeto, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) através do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), além do Instituto de Planejamento Econômico (IPEA) e da Secretaria de Cooperação Econômica e Técnica Internacional (SUBIN), com apoio do "Texas Research and Development Foundation" (TRDF), incluindo profissionais da Universidade do Texas e vários institutos nos Estados Unidos, Austrália, Inglaterra e África do Sul. Na PICR (GEIPOT) foi medido o desempenho de vários tipos de pavimentos (BRASIL, 1981).

Esta base de dados possibilitou o desenvolvimento de alguns modelos de deterioração e a aferição, o aperfeiçoamento e a operacionalização dos diversos modelos de previsão que simulam, num determinado período de análise, o

comportamento dos pavimentos e da frota de veículos que por eles trafega, e que integram o Modelo HDM III.

1.2 - Modelos de deterioração do procedimento DNER-PRO 159/85 e Índice de Gravidade Global, procedimento DNER-PRO 08/94.

Com base nos dados da PICR foram desenvolvidos por QUEIROZ (1981a) vários modelos de deterioração de pavimentos, posteriormente incorporados pelo DNER, principalmente para projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, no Procedimento 159 de 1985 (DNER-PRO 159/85).

O Índice de Gravidade Global (IGG) foi desenvolvido por Armando Martins Pereira, baseado nas idéias e conceitos desenvolvidos pela província de Saskatchewan do Canadá e em algumas conclusões do "AASHO road test "(PEREIRA, 1972). Foi adaptado às condições brasileiras da época em 1972 e adotado pelo DNER como um procedimento para avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos (DNER-PRO 08/94).

1.3 - Objetivos da Dissertação

Os modelos de deterioração do HDM III foram desenvolvidos para uma diversidade de condições e portanto podem não se aplicar diretamente à região em estudo. O objetivo principal desta dissertação é testar a hipótese anterior, isto é, a validade dos modelos como se encontram no HDM III, e na hipótese da necessidade de adaptação, definição de parâmetros ou fatores de correção que possam ser usados para uma aplicação mais precisa do HDM III à região centro de São Paulo, próximo às cidades de Araraquara, São Carlos e Jaú. Para atingir esse objetivo, a dissertação compara valores previstos pelo HDM III com valores medidos em vários trechos.

2 - Fundamentos de gerência de pavimentos

Num sentido mais amplo, Gerência de Pavimentos inclui todas as atividades envolvidas no planejamento, projeto, construção, manutenção e reabilitação de pavimentos.

A Gerência de Pavimentos tem como função aumentar a eficiência da tomada de decisões, informar as consequências, e assegurar coerência entre as decisões a diversos níveis de administração.

Segundo HAAS et al. (1994) o SGP avalia estratégias alternativas para um determinado período de análise tendo como base informações confiáveis, submetidas a critérios de decisão e restrições predeterminados numa estrutura organizada para produzir um programa visando um maior retorno do capital investido. Envolve, para tanto, um conjunto de ferramentas ou métodos, associados ao planejamento, projeto, construção, manutenção, avaliação e pesquisas sobre pavimentos, que auxiliam aos tomadores de decisão a definir a estratégia ótima para construir e manter os pavimentos numa dada condição de serviço durante um determinado período de tempo.

Deve ser um processo dinâmico, capaz de incorporar as informações conseqüentes das decisões tomadas.

HUDSON et al. (1979) descrevem gerência de pavimentos em termos de dois níveis generalizados:

- Gerência ao nível de rede ou nível de planejamento onde poderão ser tomadas decisões de padrão administrativo referentes ao programa para a rede rodoviária. Considerando as necessidades da rede como um todo, um SGP total promove a comparação dos benefícios e custos para várias estratégias alternativas, tornando possível identificar a estratégia que terá um maior retorno do capital investido, durante o período de análise selecionado;
- Gerência ao nível de projeto, onde decisões técnicas são tomadas para trechos específicos. São feitas considerações detalhadas para as diversas alternativas de projeto, construção, manutenção ou atividades de reabilitação para um trecho específico dentro de um programa global. Através da comparação dos custos e benefícios associados às varias alternativas, é definida uma estratégia ótima que proverá o benefício ou nível de serviço desejado com menor custo durante o período de análise.

Em alguns casos é conveniente definir também um nível de gerência ao nível de pesquisa, no qual dados mais detalhados do que ao nível de projeto são coletados para fins de pesquisa. Um exemplo é a coleta de dados para a calibração do HDM ou para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos.

2.1 - Conceito de Serventia e Desempenho

"Serventia é a habilidade com que um pavimento serve ao tráfego, à época da observação"[HIGHWAY RESEARCH BOARD (HRB), 1962].

CAREY apud HAAS et al. (1994)¹ desenvolveu o conceito de serventia durante o planejamento e execução da pista experimental da AASHO (HRB, 1962), concebida e patrocinada pela American Association of State Highway Officials

¹ CAREY, W.N.; IRICK, P.E. (1960). The Pavement Serviceability-Performance Concept. Highway Research Bulletin, 250.

(presentemente American Association of State Highway and Transportation Officials - AASTHO).

Existem vários índices que refletem a serventia e que são definidos a partir de medidas objetivas feitas na superfície do pavimento. Estes índices de serventia indicam as condições do pavimento à época da sua avaliação.

Considerando que o pavimento serve à sociedade, define-se desempenho como a habilidade de um pavimento em servir ao tráfego durante um certo período de tempo, ou seja, é a evolução da serventia do pavimento no período de observação. Segundo HAAS et al. (1994), apesar da definição precisa de desempenho dada por CAREY-YRICK (1960) no desenvolvimento do conceito serventia - desempenho, o termo desempenho é freqüentemente usado de maneira vaga no campo de pavimentos, talvez por ter o significado de uma idéia geral na vida diária. Como consequência, os pesquisadores e profissionais usam muitas vezes, termos alternativos como deterioração ou dano.

A avaliação do desempenho envolve um estudo do comportamento funcional do pavimento, e para tanto são necessárias informações sobre o histórico da qualidade da superfície de rolamento e das solicitações do tráfego, no período de tempo escolhido. Estas informações podem ser coletadas através de medidas ou observações periódicas da superfície do pavimento e complementadas pelos dados de tráfego durante o período de observação. Este histórico da deterioração do pavimento ou serventia provida ao usuário, define o desempenho do pavimento (HAAS et al., 1994).

A FIGURA 1 ilustra o desempenho de um pavimento em termos de índice internacional de irregularidade (IRI), que pode ser medido, ou previsto através de modelos de previsão do desempenho. O IRI é um parâmetro que reflete a serventia do pavimento.

O conceito serventia - desempenho foi uma contribuição valiosa à tecnologia de pavimentos nos anos 60. Atualmente um dos temas prioritários aos engenheiros rodoviários é o desenvolvimento de modelos de previsão do desempenho do

pavimento, em termos de parâmetros que refletem a serventia versus idade ou aplicação de cargas acumuladas.

FIGURA 1 - Conceito serventia - desempenho.

2.2 - Modelos de Deterioração

Os modelos de deterioração são parte fundamental dos Sistemas de Gerência de Pavimentos. Provêem uma estimativa do desempenho futuro do pavimento, baseando-se em dados obtidos em avaliações anteriores ou na experiência de especialistas, constituindo ferramenta indispensável nos projetos em nível de trecho específico e no planejamento em nível de rede rodoviária.

A FIGURA 2 ilustra a utilização de um modelo de deterioração do pavimento, em determinado trecho, para estimar a progressão da deterioração e prever o ano em que este deverá sofrer uma intervenção. Mostra também a previsão de deterioração das diversas alternativas de intervenção que poderão ser adotadas.

FIGURA 2 - Utilização de um modelo de deterioração do pavimento para estimar a progressão da deterioração, prever o ano em que o pavimento deverá sofrer uma intervenção e prever o desempenho das diversas alternativas de intervenção que poderão ser adotadas.

Os requerimentos básicos para um modelo de previsão de desempenho eficiente são:

- a) Uma base de dados adequada e confiável;
- b) Inclusão das variáveis que mais afetam a deterioração do pavimento;
- c) Cuidadosa seleção da forma funcional do modelo;
- d) Critérios para avaliar a precisão do modelo.

A utilização dos modelos fica restrita à viabilidade de obtenção dos dados requeridos. Um modelo muito preciso mas extremamente complexo que requer uma extensiva coleta de dados, em muitos casos, terá sua utilização prejudicada.

Os modelos de deterioração do pavimento podem ser classificados a princípio como: determinísticos e probabilísticos (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994); (HAAS et. al, 1994); (PATERSON, W.D.O., 1987); (QUEIROZ, 1981).

Entre os modelos determinísticos podemos distinguir:

- a) *Modelos puramente mecânicos*, baseados em alguns parâmetros de resposta estrutural do pavimento como tensão, deformação e deflexão. Este tipo de modelo ainda não foi desenvolvido porque as respostas estruturais, para terem significado para os engenheiros de pavimentação, têm necessariamente que estar relacionadas à deterioração dos pavimentos.
- b) *Modelos Empíricos - Mecânicos*, onde os parâmetros de resposta são relacionados, através de regressões, a medidas de campo do comportamento funcional, tais como defeitos de superfície e irregularidade, e estrutural;
- c) *Modelos formulados através de análise de regressão* baseados em observação ou medidas da deterioração funcional ou estrutural do pavimento, onde a variável dependente é relacionada a uma ou mais variáveis independentes, tais como resistência do subleito, solicitações do tráfego, propriedades e espessura das camadas que constituem o pavimento, fatores ambientais e suas inter-relações. Estes modelos são particularmente aplicáveis em locais que dispõem de uma base de dados envolvendo muitos anos de observação de fatores como irregularidade, defeitos de superfície, tráfego, deflexão e outros.

2.2.1 - Revisão dos modelos de deterioração existentes

Os modelos de deterioração podem ser utilizados nas atividades de manutenção ou reabilitação de pavimentos e para tanto, podem ser classificados como:

- modelos que descrevem a deterioração dos pavimentos novos ou reconstruídos;
- modelos que prevêm o desempenho de pavimentos recapeados.

Segundo FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1994), a maioria dos modelos de deterioração fazem uma estimativa futura dos seguintes parâmetros de desempenho:

- a) Irregularidade, que pode ser expressa em termos de “Riding Comfort Index” (RCI), índice internacional de irregularidade (IRI), ou Quociente de Irregularidade (QI) usado no Brasil;
- b) Parâmetros estruturais, expressa em termos de deflexão ou “Strutural Adequacy Index” (SAI);
- c) Defeitos de superfície, como trincas, desgaste ou deformações permanentes;
- d) Índices combinados, tais como “Present Serviceability Index” (PSI), “Pavement Condition Index” (PCI), “Pavement Condition Rating” (PCR), “Pavement Quality Index” (PQI), Índice de Gravidade Global (IGG).

Alguns exemplos de modelos desenvolvidos conforme a classificação exposta anteriormente são apresentados a seguir:

1º) Modelo formulado através de análise de regressão;

Segundo KARAN apud HAAS et al. (1994)², um exemplo de modelo de regressão, é o desenvolvido em Alberta, EUA, com base em mais de 25 anos de observação da irregularidade, defeitos de superfície, tráfego e outros fatores. O modelo apresentado a seguir aplica-se a pavimentos novos, com base granular. Tem como variável dependente o “Riding Comfort Index” (RCI) e como variáveis independentes o RCI da época da observação e a idade do pavimento, em anos.

$$RCI = -5998 + 6,870 \times LOG_e(RCI_B) - 0,162 \times LOG_e(AGE^2 + 1) + 0,185 \times AGE - 0,084 \times LOG_e(RCI_B) - 0,093 \times \Delta AGE \quad (1)$$

onde:

RCI = “Riding Comfort Index” (escala de 0 a 10) em qualquer idade;

² KARAN, M.A.; CHRISTISON, T.S.; CHEETHAM, A.; BERDAHL, G. (1983). Development and Implementation of Alberta's Pavement Information and Needs System. Highway Research Bulletin, 938.

$RCI_B = RCI$ anterior;

AGE = idade em anos;

ΔAGE = intervalo de tempo em anos.

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,84

Erro padrão da estimativa = 0,38

2º) Modelos Empírico - Mecanísticos;

Segundo HAAS et al. (1994), um bom exemplo são os modelos empírico - mecanísticos desenvolvidos por Queiroz, onde a teoria da elasticidade linear aplicada aos materiais que constituem as diversas camadas do pavimento, foi usada como base num estudo que envolveu 63 trechos de ensaio com pavimento flexível. As respostas calculadas do pavimento incluíram deflexão na superfície; tensão e deformação de tração horizontal e energia de deformação na parte inferior da camada de revestimento; e tensão e deformação de compressão vertical na parte inferior da camada de base e no topo do subleito. Foram feitas várias tentativas para relacionar estas respostas à irregularidade e ao trincamento observados na superfície do pavimento, através de análises de regressão. Como exemplo, as seguintes equações de previsão de irregularidade e trincamentos foram desenvolvidas:

$$\text{Log}(QI) = 1,297 + 9,22 \times 10^{-3} AGE + 9,08 \times 10^{-2} ST - 7,03 \times 10^{-2} RH + 5,57 \times 10^{-4} SEN1 \times \text{Log}N \quad (2)$$

onde:

QI = Irregularidade em contagens/km

AGE = Idade do pavimento em anos

ST = Tipo de revestimento, variável Dummy (0 para concreto asfáltico e 1 para tratamento superficial)

RH = Indicador do estado de restauração (0 se não houve recapeamento e 1 se recapeado)

SEN 1 = Energia de deformação na parte inferior do revestimento (10^{-4} kgf/cm)

N = Número de eixos cumulativos equivalentes.

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,510

Erro padrão da estimativa = 0,112

$$CR = -8,70 + 0,258HST1 \times \text{Log}N + 1,006 \times 10^{-7} HST1 \times N \quad (3)$$

onde:

CR = Percentagem da área do pavimento trincada;

HST1 = Tensão de tração horizontal na parte inferior do revestimento.

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,50

Erro padrão da estimativa = 15,40

QUEIROZ (1981) desenvolveu os modelos de deterioração, tendo como base dados brasileiros, observados na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), citada no capítulo 1.

Existem atualmente vários modelos de deterioração para os diversos tipos de pavimentos, entretanto, a utilização dos modelos Empírico - Mecanísticos assim como dos modelos formulados através de análise de regressão fica restrita às condições climáticas específicas, ao tipo de subleito, materiais e técnicas de construção e manutenção. Para que reflitam as condições às quais são aplicados, estes modelos devem ser baseados em dados locais ou devem ser modificados e comprovados com base em tais dados (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994); (HAAS et. al, 1994); (PATERSON, W.D.O., 1987); (QUEIROZ, 1981). Assim sendo, nesta dissertação daremos maior ênfase aos modelos desenvolvidos a partir de dados Brasileiros, e principalmente aos que envolvem dados obtidos em trechos próximos à região de estudo.

Apresenta-se na TABELA 1 (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994), alguns dos modelos existentes, classificados com base nos parâmetros de desempenho utilizados e quanto ao tipo de modelo adotado.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
Irregularidade				
Enfatizando Efeitos Estruturais	AASHO road test	Irregularidade inicial, ESAL, número estrutural, suporte do subleito; afundamento médio nas trilhas de rodas; trincas e remendos.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão exponencial.
Enfatizando Efeitos Estruturais	Estudo do TRRL (1975)	Número estrutural modificado, espessura e material das camadas, coeficiente de drenagem, irregularidade inicial, ESAL.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão linear.
Enfatizando Efeitos Relativos ao Tempo	Modelos do Arizona	Idade do pavimento, irregularidade inicial, parâmetros ambientais como precipitação pluvial, altitude, gelo e degelo, temperaturas, etc.	Modelo de desempenho funcional empírico, determinístico.	Análise de regressão linear.
	Estudo do Arizona	Tempo e irregularidade inicial.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão linear.
	Austrália, 1972	Idade e irregularidade inicial.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão.
Modelos com interação de efeitos	Queiroz	Número de eixos equivalentes acumulados; tempo e irregularidade inicial	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão linear.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
Irregularidade				
Modelos baseados em Parâmetros Mecânicos	Uzan e Lytton, 1982	Afundamento médio das trilhas de rodas, variância do afundamento das trilhas de rodas, áreas de trincas e de remendos.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão.
Modelos enfatizando Efeitos Estruturais, Condição da Superfície e Efeitos do Tempo	Brasil UNPD - (IRI Banco Mundial)	Tipo de pavimento, espessuras das camadas, idade, defeitos da superfície, tráfego e parâmetros ambientais.		Não disponível.
	Estudo do Brasil-UNPD (base de dados expandida)	Número estrutural modificado, ESAL, idade do pavimento desde o recapeamento ou reconstrução, mas omitindo afundamento de trilha; remendos e trincas.	Modelo de desempenho funcional empírico, determinístico.	Análise de regressão (aproximação linear).
	"Riding Confort Index" (RCI) de Alberta	RCI inicial e idade atual do pavimento	Modelo de desempenho funcional empírico, determinístico;.	Análise de regressão (múltipla)
Medidas estruturais para previsão do desempenho				
Fadiga em concreto asfáltico	Instituto do asfalto (TAI) MS-15	ESAL para 20 anos, deformação na camada de asfalto, % de betume e de vazios	Modelo de deterioração empírico-mecânico, determinístico.	Análise de regressão múltipla.
	MICH-PAVE	ESAL, deterioração da superfície, espes. das camadas, módulo resiliente, temperatura anual do ar, viscosidade cinemática e % de betume da massa asfáltica, tensão e deformação na camada de asfalto.	Modelo de resposta do pavimento empírico-mecânico, determinístico.	Equação empírica com análise mecânica.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
Modelos de Previsão da Deflexão / "Strutural adequacy index" (SAI)	Alberta DOT (modelo SAI para pavimentos com base granular)	Deflexão média no outono x 10^3 , ESAL acumulado/ 10^5	Modelo de deterioração empírico-mecanístico, determinístico.	Análise de regressão múltipla.
	VESYS (procedimentos para projetos flexíveis projetado por FHWA)	Módulo resiliente, fadiga e deformação permanente, distribuição de carga, duração e número de cargas aplicadas, temperatura média das camadas asfálticas, subleito	Modelo de resposta do pavimento empírico-mecanístico, probabilístico.	Análise de regressão.
Medidas de defeitos				
Para Pavimentos Rígidos	COPES	Idade, ESAL, parâmetros ambientais, tipo de pavimento, transferência de carga nas juntas, dano no material de selagem da junta, espessura e propriedades do material de cada camada.	Modelos de desempenho funcional e estrutural, empírico-mecanístico, determinístico.	Análise de regressão múltipla e análise mecânica.
Para pavimentos Flexíveis	Modelo HDM (Banco Mundial)	Tipo de pavimento, espessura das camadas, ESAL, fatores ambientais.	Modelos de desempenho funcional e estrutural Empírico-mecanístico, determinístico.	
	Atribuição de Custos	Características estruturais, fatores ambientais, tráfego, características do subleito, idade do pavimento.	Modelos de desempenho funcional e estrutural Empírico-mecanístico, determinístico.	Curva em forma de S.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
	Afundamento de trilha de roda (prevê deformações na camada de concreto asfáltico, sob cargas repetidas do tráfego)	Deformação, ESAL, espessura e resistência das camadas.	Modelo de resposta principal, mecanístico, determinístico.	Análise de regressão exponencial.
	Afundamento de trilha de roda (estado de Ohio)	Mesmo que o acima e constante experimental em função do tipo de material e do estado de tensão.	Mecanístico, Determinístico, modelo de resposta principal.	Análise de regressão exponencial.
Índices Compostos				
Modelos de PSI	Modelo AASHO	ESAL, número estrutural, suporte do solo, afundamento de trilha médio, trincamento e remendo, variância das inclinações.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão exponencial.
	HPMS (FHWA "Highway Performance Monitoring System".	PSR como uma função do número estrutural e do ESAL	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão exponencial.
	PSI do estado de Idaho	ESAL	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Curva em forma de S.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
	Estado de Minnesota	PSR (PSI) previsto como uma função dele mesmo, PSR do ano anterior, tipo de pavimento e volume de tráfego.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Ajuste linear.
	Modelo Sigmoidal ("Texas Transportation Institute").	Tráfego e localização do trecho.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Curva em forma de S (função sigmoidal).
	PENNDOT modelo de previsão do desempenho.	idade do pavimento.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Ajuste linear, regressão.
	Estado da Virginia	Variáveis de carga e projeto, índice composto de defeitos (DMR) e idade do pavimento.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Exponencial.
	Iowa DOT para pavimentos rígidos e compostos.	Tipo de base, durabilidade do agregado, tipo de junta ou reforço, ESAL	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Ajuste linear.
	Estado de Washington	Idade do pavimento, ESAL, Espessura do recapeamento.	Modelo de desempenho estrutural, empírico-mecânico, determinístico.	Análise de regressão.
	Mississippi PCR	Idade do pavimento, volume de tráfego, espessura do revestimento, espessura estrutural.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
	PQI de Alberta.	Idade do pavimento, tipo de solo e espessura estrutural.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Equação não disponível.
	Modelos OPAC e PARS (desempenho previsto em função da idade do pavimento, tráfego e espessura do recapeamento.)	Características do pavimento, idade, tráfego, espessura do recapeamento, período de reabilitação, PCI.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	Análise de regressão.
Modelos para pavimentos recapeados.				
	NCHRP Projeto 14-6 (AGENCIA e IMPACTO)	Condição do pavimento, fatores estruturais e tráfego.	Modelo de desempenho funcional e defeitos, empírico-mecanístico, determinístico.	Análise de regressão.
	Estudo ARE 1985 (Modelos de previsão de trincas largas e jacaré, desgaste, painéis, irregularidade e afundamento de trilha de roda.	Características do pavimento, histórico, tráfego, condição do pavimento, geometria e meio ambiente.	Modelo de desempenho funcional e estrutural, empírico-mecanístico, determinístico.	Análise de regressão.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
	Sistema AEROMAR-2 (previsão de diferentes categorias de defeitos consideradas no PSI).	Propriedades estruturais dos materiais e propriedades de drenagem, histórico da construção e do carregamento, condição atual da superfície, temperatura sazonal, precipitação pluviométrica, índice de congelamento, fator regional da AASHTO, classificação do subleito, pressão nos pneus.	Modelo de desempenho funcional, empírico-mecanístico, determinístico.	Análise de regressão.
	Sistema de Gerência PAVER (baseado no índice de deterioração da condição do pavimento, PCI, para períodos curtos e longos)	Idade, tipo de pavimento e defeitos de superfície.	Modelo de desempenho funcional, empírico-mecanístico, determinístico.	polinomial de 4º grau (mínimos quadrados restrito).
	Estudo de Indiana (baseado no PSI-ESAL e na irregularidade)	Índice modificado do desempenho do pavimento, perda de PSI-ESAL, influência do clima e do intemperismo na eficácia da manutenção do pavimento.	Modelo de desempenho funcional, empírico, determinístico.	

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
	Procedimento para projeto de recapeamento do Arizona (baseado em modelos de deterioração para irregularidade, fadiga e deformação plástica)	Irregularidade antes e após o recapeamento, critério de limite para a irregularidade, alteração prevista para a irregularidade devido ao recapeamento, inclinação da relação irregularidade versus tempo, deformação de tração na base da camada de CA devido a carga de roda padrão, e parâmetros de análise econômica.	modelo de deterioração, empírico determinístico.	Análise de regressão e exponencial.
	Estudo do custo do ciclo de vida (defeitos modelados para flexíveis: trincas tipo jacaré, desgaste e afundamento de trilha de roda; para rígidos: bombeamento, desnível nas juntas e deterioração das juntas e selantes das trincas.	Acréscimo no PCI devido a reabilitação ou reconstrução, PCI_t , PCI_o , PCI_{t-1} , PCI_{perda} , PCI ganho devido a manutenção, ESAL, idade e Capacidade estrutural do pavimento; para flexíveis: número estrutural corrigido para o subleito e condições do clima; para rígidos: espessura da laje.	Modelo de desempenho estrutural, empírico, determinístico.	Análise de regressão
	NAPCOM	18 kip (80KN) calculado como veículos milhas trafegadas (VMT) e fator de equivalência de carga (LEF), classe funcional, tipo de revestimento, número estrutural, serventia inicial na última reabilitação/reconstrução, custo, índice de congelamento, temperatura, precipitação, índice Thornwaite.	Modelo de desempenho estrutural, empírico-mecânico, determinístico.	Regressão.

TABELA 1 - Modelos de deterioração existentes (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1994) (continuação).

Grupo	Modelo de previsão	Dados requeridos	Categoria/Classificação	Técnica utilizada
	VESYS (apenas para pavimentos flexíveis, modelos de previsão do afundamento de trilha de roda, trincas de fadiga e irregularidade)	<ul style="list-style-type: none"> -Módulo resiliente, características de fadiga e deformação permanente da camada de CA; -Tensão-deformação e deformação permanente para sub-base de brita graduada; -Módulo resiliente e deformação permanente do subleito; -distribuição do tráfego (amplitude e duração da distribuição de carga, número de cargas aplicadas); -Variáveis ambientais (temperatura média das camadas betuminosas e teor de umidade do subleito). 	Modelo de respostas primárias, empírico-mecanístico, probabilístico.	Análise de regressão e mecânica.
	EXPEAR (para JRCP, JPCP, modelos de previsão de desnível nas juntas, trincas, bombeamento, deterioração das juntas, e para CA/PCC, trincas de reflexão e afundamento de trilhas de rodas).	Adequação estrutural, irregularidade, drenagem, deterioração das juntas, movimento da fundação, perda de transferência, perda de suporte, condições dos acostamentos.	Modelo de desempenho estrutural, empírico-mecanístico, determinístico.	Análise de regressão.

2.2.2 - Modelo HDM III

Segundo WATANATADA et al., (1987), o HDM III é composto por modelos de deterioração desenvolvidos por método empírico utilizando princípios mecanísticos em sua formulação. Foi usada uma larga base de dados de campo e técnicas estatísticas avançadas para estimar modelos previamente estruturados em princípios mecanísticos. O modelo difere dos modelos empírico - mecanísticos definidos anteriormente, ou seja, modelos mecanísticos calibrados com dados de campo.

Os modelos de deterioração do HDM III são os resultados de dois estudos conduzidos em países tropicais. O primeiro, conduzido no Quênia no período de 1971 a 1975, forma a base de dados dos modelos contidos no HDM versão II. O segundo e bem mais abrangente estudo, conduzido no Brasil durante a PICR, entre 1975 e 1984, constitui a base de dados dos modelos do HDM versão III. Posteriormente, para avaliar a validade dos modelos e estender sua aplicação a outras regiões e climas diferentes, foram utilizados dados de estudos realizados em regiões de climas variados.

Foram desenvolvidos modelos de deterioração individuais para os tipos de defeitos e manutenção mais relevantes à previsão do desempenho, possibilitando diferentes aplicações.

Segundo WATANATADA et al., (1987), para o desenvolvimento dos modelos, os pavimentos foram classificados por tipo de base em granulares, estabilizadas com cimento ou betuminosas e nos seguintes tipos de revestimento:

- 1- Tratamento superficial (ST);
- 2- Concreto Asfáltico (AC);
- 3- Lama Asfáltica sobre Tratamento superficial (SSST);
- 4- Resselagem em Tratamento superficial (RSST);
- 5- Resselagem em Concreto Asfáltico (RSAC);
- 6- Pré misturado a frio sobre Tratamento superficial (OCMS),

7- Lama Asfáltica ou recapeamento com Concreto Asfáltico sobre Concreto Asfáltico e recapeamento com Concreto Asfáltico sobre Tratamento superficial (OVSA).

Os revestimentos em tratamento superficial e concreto asfáltico aplicam-se aos pavimentos originais, novos ou reconstruídos, e os demais tipos definem a camada de revestimento dos pavimentos que sofreram alguma intervenção de manutenção ou reabilitação, como ilustra a TABELA 2.

TABELA 2 - Classificação dos tipos de revestimento dos pavimentos, após manutenção ou reabilitação.

CLASSIFICAÇÃO ANTES DA MANUTENÇÃO	CLASSIFICAÇÃO APÓS A MANUTENÇÃO COM			
	Tratamento Superficial (RS)	Lama Asfáltica (SS)	Pré Mistu- rado a Frio (CM)	Concreto Asfáltico (OV)
Tratamento Superf. (ST)	RSST	SSST	OCMS	OVSA
Concreto Asfáltico (AC)	RSAC	OVSA	OCMS	OVSA
Pré Misturado a Frio em Tratam. Superficial (CMST)	RSAC	SSST	OCMS	OVSA

O Modelo HDM III faz uma previsão aproximada dos seguintes parâmetros descritivos da condição do pavimento, para os tipos de pavimentos acima classificados:

- Trincamento;
- Desgaste do revestimento;
- Abertura de painéis;
- Afundamento médio nas trilhas de rodas;
- Irregularidade longitudinal do pavimento.

Segundo WATANATADA et al., (1987), o submodelo do HDM III que calcula o custo operacional dos veículos baseia-se na geometria da rodovia, nas características do veículo e na irregularidade longitudinal do pavimento. Como a geometria da rodovia é uma característica permanente a única condição variável do pavimento considerada na análise financeira do modelo HDM III é a irregularidade longitudinal. Assim sendo, entre os modelos de deterioração descritos a seguir, daremos maior ênfase ao que prevê o acréscimo de irregularidade, ou seja, prevê o acréscimo no índice internacional de irregularidade (IRI), considerando as operações de manutenção e recuperação adotadas.

a) Trincamento

Segundo WATANATADA et al. (1987), foram desenvolvidos modelos para previsão do número de anos para o início do trincamento nos pavimentos, desde sua construção ou último recapeamento, bem como para previsão da progressão ou incremento no trincamento durante o ano de análise, em percentagem da área. O Modelo HDM III considera duas classes de trincas, ou seja, com largura maior que 1 mm e com largura maior que 3mm.

a-1) Número de anos para o início do trincamento (TY). Foram desenvolvidos modelos considerando as diversas composições do pavimento, como mostra a TABELA 3.

TABELA 3 - Tipos de pavimentos, para os quais foram desenvolvidos modelos individuais prevendo o início do trincamento.

TIPOS DE PAVIMENTO	
REVESTIMENTO	BASE
ST; AC; SSST; RSST;	granular
todos os tipos;	cimentada
OVSA; RSAC	granular e betuminosa

Como exemplo podemos destacar o modelo para pavimentos constituídos de base tratada com cimento, para qualquer tipo de revestimento (WATANATADA et al., 1987);

$$TY = Kci \{1,12 \exp (0,35 HSE + 0,371 \ln CMOD - 0,418 \ln DEF - 2,87 YE DEF)\} \quad (4)$$

Onde:

Kci = fator de deterioração para o início do trincamento;

YE = número anual de carga equivalente ao eixo simples padrão de 80 KN, em milhões/faixa;

CMOD = Módulo de Resiliência do solo-cimento, em Gpa;

DEF = deflexão medida pela viga Benkelman;

$$HSE = \min [100; HSNEW + (1 - KW) HSOLD]$$

HSNEW = espessura da camada de recapeamento, em mm;

HSOLD = espessura total do revestimento betuminoso anterior ao recapeamento, em mm;

$$KW = \min [0,05 \max (CRW - 10; 0); 1]$$

KW = variável que indica a presença de trincas largas no revestimento antigo;

CRW = área de trincas largas (com abertura maior que 3 mm).

a-2) Modelo para previsão do incremento na área de trincas com abertura maior que 1mm (DCR), durante o ano de análise (WATANATADA et al., 1987); (QUEIROZ, 1994):

$$DCR = Kcp \{a FCR^b DT\} \quad (5)$$

Onde:

DCR = incremento na área de trincas, em percentagem da área total;

Kcp = fator de deterioração para a progressão da área de trincas;

FCR = mínimo (CR, 100 - CR);

CR = área de trincas, em percentagem da área total;

DT = tempo incremental, em anos.

a-3) Modelo para previsão do incremento na área de trincas com abertura maior que 3mm, durante o ano de análise (WATANATADA et al., 1987); (QUEIROZ, 1994):

$$DCRW = K_{cp} \{c FCRW^d DT\} \quad (6)$$

Onde:

DCRW = incremento na área de trincas largas (com abertura maior que 3 mm), em percentagem da área total;

Kcp = fator de deterioração para a progressão da área de trincas;

FCRW = mínimo (CRW, 100 - CRW);

CRW = área de trincas largas, em percentagem da área total;

DT = tempo incremental, em anos.

A TABELA 4 mostra os tipos de pavimentos e respectivos coeficientes para previsão da progressão do trincamento.

TABELA 4 - Tipos de pavimentos e respectivos coeficientes para previsão da progressão do trincamento.

TIPOS DE PAVIMENTO		COEFICIENTES			
REVESTIMENTO	BASE	a	b	c	d
AC	granular	1,84	0,45	2,94	0,56
ST	granular	1,76	0,32	2,5	0,25
OVSA	granular	1,07	0,28	2,58	0,45
lama asfáltica e resselagem	granular	2,41	0,34	3,4	0,35
todos	cimentada	2,13	0,35	3,67	0,38

b) Previsão do desgaste do revestimento

Foram desenvolvidos modelos para previsão do início e progressão ou incremento no desgaste do revestimento.

Como exemplo apresenta-se o modelo para previsão da progressão do desgaste do revestimento que se aplica a tratamento superficial, lama asfáltica e resselagem sobre todos os tipos de base.

$$\text{DRAV} = K_{vi}^{-1} \{ [1,560 \text{ DT} + \text{FRAV}^{0,352}]^{2,84} - \text{FRAV} \} \quad (7)$$

Onde:

DRAV = Incremento na área de desgaste, em percentagem da área total;

K_{vi} = Fator de deterioração para o início do desgaste;

DT = tempo incremental, em anos.

RAV = área de de desgaste inicial, em percentagem da área total;

FRAV = mínimo (RAV; 100 - RAV);

c) Previsão da abertura de panelas

O HDM inclui modelos para previsão do início e progressão da abertura de panelas no revestimento, para bases granulares, cimentadas ou betuminosas.

O modelo apresentado a seguir, para progressão da abertura de panelas, em percentagem da área total, é o único desenvolvido no HDM III e pode ser aplicado a todos os tipos de tratamentos superficiais, resselagem, lama asfáltica e pré misturado a frio. É composto por três parcelas, isto é, novas panelas causadas por trincas largas (DPOTCR), novas panelas causadas por desgaste (DPOTRV) e o alargamento das panelas existentes (DPOTP) (WATANATADA et al., 1987); (QUEIROZ, 1994):

$$\text{DPOT} = \min (\text{DPOTCR} + \text{DPOTRV} + \text{DPOTP}; 10) \quad (8)$$

Onde:

DPOT = incremento na área de panelas durante o ano de análise;

$$\begin{aligned} \text{DPOTCR} &= K_{pp} \min (2 \text{ CRW } U; 6) && \text{se CRW} > 20 \\ &= 0 && \text{se CRW} < 20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DPOTRV} &= K_{pp} \min (0,4 \text{ RAV } U; 6) && \text{se RAV} > 30 \\ &= 0 && \text{se RAV} < 30 \end{aligned}$$

$$U = (1 + CR) (YA / SNC) / (HS \cdot 0,8 \cdot W / E)$$

$$\text{DPOTP} = \min \{ \text{APOT} [K \cdot YA (MMP + 0,1)]; 10 \}, \text{ onde:}$$

$$\begin{aligned} K &= \max (2 - 0,02HS; 0,3) && \text{para base granular;} \\ &= 0,6 && \text{para base tratada com cimento;} \\ &= 0,3 && \text{para base betuminosa;} \end{aligned}$$

K_{pp} = fator de deterioração para progressão de panelas;

CRW = área de trincas largas, em percentagem da área total;

RAV = área de desgaste, em percentagem da área total;

CR = área de trincas, em percentagem da área total;

YA = fluxo anual de eixos, em milhões por ano por faixa.

SNC = número estrutural corrigido;

HS = espessura total do revestimento betuminoso, mm;

E = número de faixas

APOT = área de panelas, em percentagem;

MMP = precipitação mensal média, em m/mês.

d) Previsão do afundamento nas trilhas de rodas

O HDM inclui modelos para previsão da progressão ou incremento no desvio padrão e no afundamento médio das trilhas de rodas durante o ano de análise, em milímetros. O mesmo modelo é usado para as diversas composições do pavimento. Os modelos seguintes são usados para prever o afundamento médio e

o desvio padrão do afundamento nas trilhas de rodas, respectivamente (PATERSON, 1987); (QUEIROZ, 1994):

$$RD = K_{rp} \{ AGE^{0,166} SNC^{-0,502} COMP^{-2,30} N^{ERM} \} \quad (9)$$

$$ERM = 0,092 + 0,0384 DEF - 0,0009 RH + 0,00158 MMP CRX$$

$$RDS = K_{rp} \{ 2,06 RD^{0,532} SNC^{-0,422} COMP^{-1,66} NE^{ERS} \}$$

$$ERS = -0,009 RH + 0,00116 MMP CRX$$

Onde:

RD = afundamento médio nas trilhas de rodas, em mm;

RDS = desvio padrão do afundamento nas trilhas de rodas, em mm;

K_{rp} = fator de deterioração para o afundamento de trilha;

AGE = idade do pavimento desde o ultimo recapeamento ou construção, em anos;

SNC = número estrutural corrigido;

COMP = índice de compactação do pavimento;

N = número acumulado de eixo padrão equivalente;

DEF = deflexão medida pela viga Benkelman;

RH = estado de reabilitação:

RH = 1 para pavimentos recapeados

RH = 0 para pavimento original;

MMP = precipitação mensal média, em m/mês;

$$CRX = 0,62 CRA + 0,39 CRW;$$

CRX = área de trincas indexada, em percentagem;

CRA = área de trincas, em percentagem;

CRW = área de trincas largas, em percentagem.

e) Previsão da irregularidade longitudinal do pavimento.

O Modelo HDM faz a previsão da progressão da irregularidade do pavimento, durante o ano de análise, em IRI (índice internacional de irregularidade). O modelo apresentado a seguir, é utilizado para todos os tipos de pavimentos (WATANATADA et al., 1987); (QUEIROZ, 1994):

$$\text{DIRI} = K_{gp} \{134 e^{(0,023 \text{ AGE})} \text{SNCK}^{-5,0} \text{YE} + 0,114 \text{DRDS} + 0,0066 \text{DCRX} + 0,42 \text{DPOT}\} + K_{ge} \{0,023 \text{IRI}\} \quad (10)$$

Onde:

DIRI = incremento na irregularidade durante o período de um ano, IRI em m/km;

IRI = irregularidade no início de um período de um ano, em m/km;

Kgp = fator de deterioração para progressão da irregularidade;

Kge = fator de deterioração para o incremento na irregularidade, devido ao intemperismo durante o ano de análise;

AGE = idade do pavimento ou recapeamento, em anos;

DRDS = incremento no desvio padrão da flecha nas trilhas de rodas, mm;

DPOT = incremento na área de panelas, em percentagem;

YE = número anual de carga equivalente ao eixo simples padrão de 80kN, em milhões/faixa;

DCRX = incremento na área de trincas indexadas, em percentagem;

$$\text{DCRX} = 0,62 \text{DCR} + 0,39 \text{DCRW}$$

$$\text{SNCK} = 1 + \text{SNC} - 0,000758 \text{H CRX}, \text{ onde:}$$

SNC = número estrutural corrigido;

CRX = área de trincas indexada, em percentagem;

H = espessura da camada trincada, em mm.

2.3 - Avaliação de pavimentos

A avaliação de pavimentos é um item essencial na gerência de pavimentos. Fornece informações para a fase de programação de investimentos em manutenção, avaliando as diferenças dos trechos existentes e identificando as necessidades de restauração. As informações sobre os trechos existentes são utilizadas também como retroalimentação para projeto e construção de novos pavimentos.

Outro objetivo da avaliação de pavimentos é verificar se o desempenho esperado esta sendo alcançado.

O grau de detalhes e a freqüência das medições necessárias na avaliação dos pavimentos depende da situação e das exigências particulares de cada órgão administrador.

A base de dados fornece as informações necessárias para as decisões nas áreas de planejamento, projeto, construção, manutenção e pesquisa. A FIGURA 3 ilustra a inter-relação entre os diversos subsistemas do SGP.

FIGURA 3 - Atividades de um sistema de gerência de pavimentos (SGP).

Os dados para gerência de pavimentos são usados tanto ao nível de rede como de trecho específico.

As classes de dados mais utilizados são:

- 1º) Dados relativos ao desempenho do pavimento, como irregularidade, defeitos da superfície, deflexão, etc;
- 2º) Histórico da construção e manutenção do pavimento, bem como do tráfego e acidentes;
- 3º) Dados de geometria;
- 4º) Dados relativos ao meio ambiente;
- 5º) Dados relativos às políticas e alternativas a serem avaliadas;
- 6º) Dados de custos de construção, manutenção, reabilitação e também relativos aos usuários.

As quatro primeiras classes são necessárias para analisar e modelar o desempenho do pavimento.

Entre estas, a avaliação mais importante é a relativa ao desempenho do pavimento. Tem como objetivo principal avaliar a condição atual de sua estrutura e pode ser feita nas seguintes etapas:

- 1º) *Avaliação da capacidade estrutural do pavimento;*
- 2º) *Avaliação da condição da superfície do pavimento* (comportamento funcional) onde são avaliados a irregularidade longitudinal e os defeitos apresentados na superfície do pavimento, tais como panela, trincas e afundamentos;
- 3º) *Avaliação das condições de segurança do pavimento*, que está relacionada ao atrito superficial ou resistência ao escorregamento (deslizamento). A segurança do pavimento pode ser afetada também pelos afundamentos de trilha de roda e panelas.

Estas são as variáveis que podem ser medidas para determinar quando o desempenho do pavimento é satisfatório ou não. Podem ser previstas na fase de projeto e medidas periodicamente durante a vida útil do pavimento. Quando

alguma destas variáveis atinge um nível mínimo aceitável poderá ser indicada uma reabilitação que dará início a um novo ciclo da vida útil do pavimento.

2.3.1 - Avaliação estrutural versus avaliação do comportamento funcional

O termo avaliação estrutural refere-se ao mecanismo de interação carga - estrutura do pavimento, ou seja, solicitação do tráfego - resistência do pavimento.

A avaliação do comportamento funcional baseia-se no conceito serventia - desempenho do pavimento e está mais ligada ao usuário da rodovia.

Tanto a avaliação estrutural como a funcional são importantes, uma complementa a outra. Enquanto a avaliação do comportamento funcional (serventia) é uma medida da condição atual da superfície do pavimento, a avaliação estrutural é usada para estimar a resposta futura do pavimento às solicitações do tráfego.

Como exemplo do inter-relacionamento destes dois enfoques de avaliação, podemos imaginar um pavimento constituído de camadas (sub-base , base e capa) com baixa resistência estrutural e que atualmente apresenta um alto índice de serventia. Poderemos prever que este pavimento perderá serventia rapidamente, ou seja, com poucas solicitações do tráfego.

Por outro lado, podemos ter um pavimento apresentando vários defeitos na superfície, mas com resistência adequada, necessitando apenas de correção superficial.

2.3.2 - Avaliação da capacidade estrutural do pavimento

A capacidade estrutural do pavimento pode ser medida através de sua deflexão. LOBO CARNEIRO (1966) define a "deflexão recuperável do pavimento como a deformação elástica vertical que ocorre no pavimento com a passagem das rodas dos veículos".

A carga de uma roda atuando sobre uma região da superfície de um pavimento gera uma série de deslocamento nos pontos vizinhos, embora diminuam de grandeza à medida que se afastam da carga. Quando se representa graficamente os deslocamentos sofridos por uma seqüência de pontos numa mesma direção, fica determinada a superfície de influência da carga, em termos de deflexão. A esta linha dá-se o nome de bacia de deformação (LOBO CARNEIRO, 1966).

Segundo HAAS et al. (1994), os métodos de avaliação estrutural ou capacidade de suporte dos pavimentos são classificados em:

- Métodos destrutivos - com abertura de poços para coleta de amostras e ensaios "in situ", dos materiais que compõem o pavimento;
- Métodos não destrutivos - Onde as medidas são feitas na superfície do pavimento ou com coleta de amostras pequenas que não afetam o pavimento.

Os métodos não destrutivos são mais utilizados por serem menos expensivos, apresentarem menor interferência com o tráfego e menor dano ao pavimento, características que possibilitam a execução de medidas em pontos suficientes para quantificar sua variabilidade.

O equipamento tradicionalmente utilizado para medidas de deflexão do pavimento no Brasil é a viga Benkelman (QUEIROZ, 1981), porém atualmente, em alguns órgãos rodoviários como o DNER, o DER de São Paulo, o DER do Paraná, e outros, a deflexão dos trechos homogêneos esta sendo medida com a viga Benkelman e com um "Falling Weight Deflectometer" (FWD), possibilitando a obtenção de um modelo de correlação entre os valores medidos.

Os deflectômetros de impacto ou “Falling Weight Deflectometer” (FWD) permitem a medida e o registro automático das bacias de deformações (deflexões) geradas por diferentes níveis de cargas aplicadas sobre o pavimento, bem como os módulos de elasticidade de cada camada que compõe o pavimento.

Atualmente a tendência mundial é adotar instrumentos mecanizados para medidas de deflexão, pois apresentam algumas vantagens como maior velocidade de operação e maior confiabilidade dos resultados, por eliminar os erros humanos que ocorrem nas medidas fitas com viga Benkelman.

A viga Benkelman, embora apresentando maior lentidão na obtenção dos resultados, é largamente utilizada, principalmente em países em desenvolvimento, por apresentar um baixo custo operacional, simplicidade de operação, fácil manutenção, respaldo teórico interpretativo e principalmente por transmitir às camadas estruturais do pavimento durante o ensaio, as condições reais de carregamento impostas pelo tráfego (QUEIROZ, 1981).

2.3.3 - Avaliação da condição do pavimento - IGG

Entre os métodos de avaliação do comportamento funcional do pavimento destacam-se os índices combinados, que têm como objetivo traduzir a condição atual do pavimento através de um modelo. Como exemplo tem-se o “present serviceability index” (PSI), mundialmente conhecido, que para a Pista Experimental da AASHTO (HRB, 1962) tem a seguinte expressão, aqui apresentada com conotação histórica:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log (1+SV) - 0,01 (C+P)^{1/2} - 1,38 RD^2 \quad (11)$$

onde:

PSI = índice de serventia atual;

SV = média da variância das inclinações longitudinais;

C = trincas;

P = panelas;

RD = afundamento das trilhas de rodas.

O Índice de Gravidade Global (IGG) é um índice combinado (várias ocorrências na superfície e apenas um índice final adaptado às condições brasileiras. Foi desenvolvido pelo engenheiro Armando Martins Pereira, baseado nas idéias e conceitos desenvolvidos pela província de Saskatchewan do Canadá e em algumas conclusões do "AASHO road test" (PEREIRA, 1972). Foi adaptado às condições brasileiras da época em 1972 e adotado pelo DNER, como um procedimento para avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, em 1978 (DNER-PRO 08-94).

Este procedimento não utiliza diretamente dados de irregularidade mas faz uma tentativa de correlacionar os defeitos de superfície com a irregularidade, atribuindo pesos maiores aos defeitos de superfície que influenciam mais no valor da irregularidade.

O procedimento DNER-PRO 08-94, para definição do índice de gravidade global (IGG), consiste na demarcação de superfícies de avaliação com seis metros de extensão, abrangendo a largura total da faixa de tráfego, localizadas a cada vinte metros. O método traz uma planilha para ser preenchida no campo, que já contém a denominação dos defeitos e em cada estação devem ser assinalados os defeitos apresentados pelo pavimento.

Os dados coletados no campo são agrupados em oito tipos e trabalhados em termos da frequência em que ocorreram no trecho todo. A cada tipo de defeito é atribuído um peso, que multiplicado pela frequência relativa fornece o índice de gravidade individual (IGI) de cada tipo de defeito. O índice de gravidade global (IGG) é o somatório dos IGI.

2.3.4 - Levantamento da condição de superfície de segmentos testemunha

Existe atualmente a tendência de dar preferência aos levantamentos da condição de superfície que forneçam uma medida de cada tipo de defeito, separadamente e em porcentagem da área total do pavimento, pois a utilização destes dados não fica restrita a um determinado modelo.

Durante a Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (PICR) foi desenvolvido um método para fazer o inventário da condição de superfície do pavimento. Segundo QUEIROZ (1981), este método é uma adaptação dos métodos usados na pista experimental da AASHO, no Texas e na África do Sul, descrita em detalhes por VISSER et al. (1978).

Posteriormente, com base neste procedimento, a Comissão Permanente de Gerência de Pavimentos (CPGP) do DNER preparou algumas instruções para coleta e codificação de dados da malha rodoviária federal pavimentada (QUEIROZ et al., 1984 b), resultando deste trabalho a especificação de serviço DNER-ES 128/83, levantamento da condição de superfície de segmentos testemunha de rodovias de pavimento flexível ou semi-rígido para gerência de pavimentos ao nível de rede, que fornece como resultado uma medida de cada tipo de defeito, separadamente e em porcentagem da área total do pavimento.

2.3.5 - Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal de uma via é definida pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como "o desvio de uma superfície de pavimento em relação a uma superfície perfeitamente plana, desvio esse com magnitude capaz de afetar a qualidade do rolamento, a ação das cargas dinâmicas sobre a via e a drenagem, medido nas trilhas de rodas". A irregularidade longitudinal é a variável

ligada à condição dos pavimentos que mais influencia os custos de operação dos veículos, tendo impacto sobre a segurança, o conforto e a velocidade do tráfego.

Partindo do princípio de que o pavimento foi construído para os usuários e tendo em vista que a irregularidade é a característica operacional que mais afeta o usuário, conclui-se que a irregularidade define a serventia ou resposta funcional do pavimento.

PAUL AUTRET (1990)³ classifica a irregularidade da superfície de rolamento conforme seu comprimento de onda e flecha. A TABELA 5 mostra o domínio de cada tipo de irregularidade.

A irregularidade longitudinal pode ser medida em várias escalas padronizadas, na dependência do equipamento de medição.

TABELA 5 - Tipos de irregularidade e respectivas dimensões.

IRREGULARIDADE DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO		
DOMÍNIO	DIMENSÕES	
	HORIZONTAL	VERTICAL
MICROTEXTURA	0,0 - 0,5 mm	0,0 - 0,2 mm
MACROTEXTURA	0,5 - 50 mm	0,2 - 10 mm
MEGATEXTURA	5,0 - 50 cm	1,0 - 50 mm
IRREGULARIDADE LONGITUDINAL		
ONDAS CURTAS	0,5 - 5,0 m	1,0 - 20 mm
ONDAS MÉDIAS	5,0 - 15 m	0,5 - 5,0 cm
ONDAS GRANDES	15 - 50 m	1,0 - 20 cm

³AUTRET, P. Patologia e auscultação de pavimentos / Curso ministrado na POLI - USP, São Paulo, em novembro de 1990.

Segundo QUEIROZ (1981 b) durante a Pesquisa De Inter-Relacionamento Dos Custos De Construção, Manutenção e Operação De Rodovias (PICR) foi utilizado como referência o perfilômetro dinâmico de superfície - GMR que mede a irregularidade em QI ("quarter car index"), expresso em contagens/quilômetro. O "quarter car index" é o somatório do movimento da carroceria (X_1) em relação à roda (X_2), num quarto de carro (FIGURA 4), ao longo de um determinado percurso. No Brasil adotou-se a mesma sigla QI para quociente de irregularidade, expresso em contagens/quilômetro, medido pelos sistemas de medição de irregularidade "tipo resposta", calibrados em bases que foram niveladas pelo método de nível e mira para avaliação do quociente de irregularidade (QI).

FIGURA 4 - Esquema do simulador de quarto de carro.

Segundo SAYERS et al. (1986), como resultado de uma pesquisa internacional de medição de irregularidade, realizada por iniciativa do Banco Mundial em Brasília no ano de 1982, denominada "The International Road Roughness Experiment" (IRRE), foi definida a escala "International Roughness Index" (IRI). O IRI, expresso em m/km, é uma escala de referência transferível para todos os sistemas de medição. É definido matematicamente a partir de um perfil obtido com nível e mira, visando simular os movimentos verticais induzidos no deslocamento de um quarto de carro.

Segundo QUEIROZ (1981 b), na definição do IRI houve a preocupação de desenvolver um índice que tivesse uma boa correlação com os aparelhos medidores de irregularidade "tipo resposta", mais utilizados mundialmente. Como

decorrência deste critério, os conceitos de QI e IRI são bastante similares. A relação aproximada entre QI e IRI é dada por:

$$QI = 13 IRI \quad (12)$$

onde:

QI = Quociente de irregularidade, em contagens/km e;

IRI = Índice internacional de irregularidade, em m/km.

2.3.6 - Fundamentos do método de nível e mira para avaliação do QI

QUEIROZ (1981 b) desenvolveu o método de nível e mira para avaliação do quociente de irregularidade (QI), baseado em nivelamento geométrico de trechos de rodovias, durante a PICR.

O perfilômetro S.D., utilizado a princípio como referência do padrão de irregularidade para calibrar os Maysmeters, serviu de base para o desenvolvimento do método de nível e mira para calibração dos equipamentos medidores de Irregularidade compostos por sistemas de medição de irregularidade "tipo resposta".

O método consiste em medidas de perfil do pavimento, por nivelamento topográfico, a cada 500 mm, sobre as trilhas de rodas, respeitando uma distância padronizada entre as duas trilhas.

QUEIROZ (1981) adotou o procedimento de aceleração vertical média quadrática para calcular o QI por medidas de nível e mira do perfil do pavimento.

A aceleração vertical média quadrática (RMSVA) pode ser definida como a diferença média quadrática entre inclinações adjacentes de perfil, onde cada inclinação é a razão entre a variação de inclinação e o intervalo de distância

horizontal correspondente. Esta distância horizontal é o comprimento de base e a RMSVA pode ser computada para diversos comprimentos de base (QUEIROZ, 1981).

A RMSVA é obtida de elevações Y_1, Y_2, Y_n de pontos igualmente espaçados ao longo de uma trilha de roda por:

$$VA_b = \left[\sum_{i=k+1}^{N-k} \frac{(SB_i)^2}{(N - 2k)} \right]^{1/2} \quad (13)$$

onde:

VA_b = Aceleração vertical média quadrática, correspondente ao comprimento de base b ;

$b = ks$ (comprimento de base);

k = um número inteiro, arbitrário, usado para definir b como um múltiplo de s ;

s = intervalo de amostragem, ou distância horizontal entre pontos adjacentes;

SB_i = uma estimativa da derivada segunda de Y no ponto i , dada por:

$$SB_i = (Y_{i+k} - 2Y_i + Y_{i-k}) / (ks)^2 \quad (14)$$

Conforme QUEIROZ (1981) a aceleração vertical média quadrática tem as unidades de uma recíproca de distância. As elevações foram medidas em milímetros e as distâncias horizontais são geralmente medidas em metros. Portanto RMSVA é dada em mm/m^2 ou $10^{-6}/\text{mm}$.

O modelo de previsão do QI do Perfilômetro pela RMSVA do perfil obtido por nivelamento topográfico que se ajustou melhor aos dados foi:

$$QI_r = -8,54 + 6,17 VA_{1,0} + 19,38 VA_{2,5} \quad (15)$$

Coeficiente de determinação (R^2): 0,95

Erro padrão: 5,65

IC = QI $\pm$ 11,68,

onde:

Qlr = estimativa do QI pela aceleração média quadrática;

VA_{1,0} e VA_{2,5} = RSMVA correspondentes aos comprimentos de base de 1,00 m e 2,50 m respectivamente (10^{-6} /mm);

IC = intervalo de confiança de aproximadamente 95 %.

A matriz de correlação de variáveis usadas para desenvolver a eq.(15) é dada na TABELA 6. Essa tabela mostra que os maiores coeficientes de correlação simples entre o QI e RMSVA correspondem a comprimentos de base na faixa de 1 a 3m. Este fato reforça a adoção dos valores VA_{1,0} e VA_{2,5} no modelo da eq. (15).

Baseado nestes estudos, o DNER oficializou o uso do método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta, na especificação de serviço DNER-ES 173/86 e no procedimento DNER-PRO 164/85. Este método tem sido usado em vários países como um padrão universal de irregularidade.

TABELA 6 - Matriz de correlação de variáveis usadas para desenvolver a eq.(15).

VARIÁVEIS	QI	VA _{0,5}	VA _{1,0}	VA _{1,5}	VA _{2,0}	VA _{2,5}	VA _{3,0}	VA _{5,0}
QI	1,00	0,911	0,947	0,969	0,962	0,947	0,934	0,823
VA5		1,00	0,959	0,928	0,888	0,859	0,842	0,734
VA10			1,00	0,976	0,927	0,898	0,890	0,817
VA15				1,00	0,984	0,965	0,956	0,862
VA20					1,00	0,995	0,986	0,888
VA25						1,00	0,996	0,901
VA30							1,00	0,933
VA50								1,00

NOTA: VAI = valor de aceleração vertical média quadrática correspondente ao comprimento de base i (decímetros).

3 - Levantamentos de campo (trechos experimentais)

Com o objetivo de comparar os valores previstos pelo modelo HDM III com os observados, foram feitos levantamentos da condição do pavimento nos trechos experimentais de Dois Córregos, localizado no acesso da SP 225 à Dois Córregos e de Cabaceiras, localizados na SP 255, próximo ao km 54, entre Araraquara e Ribeirão Preto, bem como no trecho da rodovia Washington Luiz, SP 310, entre os km 217 e 227.

Um convênio entre o DER-SP e a EESC-USP, tendo como um dos objetivos o acompanhamento de alguns trechos experimentais construídos pelo DER-SP, deu início à base de dados utilizada nesta dissertação. Nesta primeira fase foram definidos os trechos que seriam avaliados. A FIGURA 5 mostra a localização dos trechos de avaliação, descritos a seguir:

FIGURA 5 - Localização dos trechos avaliados.

- Trecho Experimental de Dois Córregos

Este trecho foi construído em caráter experimental em 1972. Faz parte do acesso de Dois Córregos à SP-225 e atende à demanda de acesso a Dois Córregos e de transporte de cana da Usina da Barra e da Usina Santa Adelaide.

O trecho é composto por nove seções onde variam o tipo de base e sub-base, numa extensão total de 800 m. As espessuras da base e sub-base mantêm-se constantes e igual a 15 cm. A FIGURA 6 mostra a seção longitudinal e a disposição dos segmentos com os diversos tipos de base.

Algumas seções deste trecho fizeram parte da Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos de Construção, Manutenção e Operação de Rodovias (PICR) (THE WORLD BANK, 1985), onde foram designadas de seções T41, T42, T43, T44, T45, e recebem a mesma denominação na TABELA 7. Alguns dados coletados pela PICR foram utilizados neste trabalho.

A TABELA 7 resume os dados sobre as seções testadas e os respectivos materiais.

TATAMENTO SUPERFICIAL TRIPLO										
BASE ESPES = 15 Cm	Solo-Cimento 10%		Solo-Cal 5%		Solo Arenoso Fino		Solo-Cal 5%		Solo-Brita	
SUB-BASE ESPES = 15 CM			Solo-Cal 3%		Solo Arenoso Fino				Solo-Cal 3%	
MELHORIA DO SUBLEITO ESPES = 15 CM			T 41		T 42		T 43		T 44	
									T 45	
ESTACA	25	32	37	39	44		54	59	62	67 70

T41 a T45, Segmentos avaliados durante a PICR

FIGURA 6 - Seção longitudinal e a disposição dos segmentos com os diversos tipos de base da pista experimental de Dois Córregos.

TABELA 7 - Dados sobre as seções testadas e os respectivos materiais, no trecho experimental de Dois Córregos.

TRE- CHO PICR	ESTACAS	SUB-BASE	BASE	SEÇÃO TRANS- VERSAL
T 41	30 - 32	Solo A - 2 - 4	Solo - Cimento	Aterro
	32 - 37	Solo - Cal (3%)	Solo - Cimento	Aterro
	37 - 39 + 10m	Solo - Cal (3%)	Solo - Cal (5%)	Aterro
T 42	39 + 10m - 44 + 10m	Solo A - 2 - 4	Solo - Cal (5%)	Aterro
T 43	44 + 10m - 54 + 10m	Solo A - 2 - 4	Solo Arenoso Fino	Mista
T 44	54 + 10m - 59 + 10m	Solo A - 2 - 4	Solo - Cal (5%)	Corte
T 45	59 + 10m - 62	Solo - Cal (3%)	Solo - Cal (5%)	Corte
	62 - 67	Solo - Cal (3%)	Solo - Brita	Corte
	67 - 70	Solo a - 2 - 4	Solo - Brita	Corte

- Trecho Experimental de Cabaceiras

Foi construído em caráter experimental em 1962, na SP-255 km 54, trecho entre Araraquara e Ribeirão Preto. É composto de oito segmentos de 200 m, com base de solo-cimento, com teores que variam de 3% a 10%. O perfil longitudinal do trecho é em aterro com rampa de 4%. As FIGURAS 7 e 8 mostram respectivamente a seção transversal do pavimento e o perfil localizando os segmentos com teores variados de cimento.

O subleito apresenta características geotécnicas similares ao solo da jazida de solo-cimento, que é constituído de solo arenoso pertencente ao grupo A-2-4 da classificação HRB (DER-SP, 1976).

O pavimento, originalmente construído com revestimento de tratamento superficial triplo, sofreu o primeiro recapeamento em 1970, com uma camada de regularização de concreto asfáltico, faixa B do DER-SP, com espessura variando

de 3cm a 5cm, e revestimento de 5cm de concreto asfáltico, faixa C do DER-SP. Em 1975 e posteriormente em 1985 foi executado o rejuvenescimento da camada de rolamento através da aplicação de lama asfáltica.

Este trecho fez parte da PICR (THE WORLD BANK, 1985), onde foi designado por T31 a T38 e os dados coletados também foram utilizados neste trabalho.

FIGURA 7 - Seção transversal do pavimento - pista experimental de Cabaceiras - SP255, Km 53 + 850m ao km 55 + 450m.

FIGURA 8 - Perfil longitudinal e a disposição dos segmentos com teores variados de cimento da pista experimental de Cabaceiras na SP 255, Km 53 + 850m ao km 55 + 450m.

- Rodovia Washington Luiz, SP 310, trecho entre os km 217 e km 227

Este trecho, em pista dupla, foi escolhido por ter sido recapeado durante o período de avaliação do desempenho do pavimento.

Como complemento das observações deste trecho, foi feito um levantamento do histórico do pavimento. Este histórico compreende as seguintes fases:

- 1ª - 1959 - Construção da primeira pista com base de macadame hidráulico;
- 2ª - 1961 - Primeiro recapeamento da primeira pista;
- 3ª - 1969 - Segundo recapeamento da primeira pista;
- 4ª - 1979 - Terceiro recapeamento da primeira pista e construção da segunda pista, com base de brita graduada com 4% de cimento (DER-SP/EESC-USP, 1991b);
- 5ª - 1989 - Recapeamento das duas pistas (DER-SP/EESC-USP, 1991).

Ainda durante o período de execução do convênio DER-SP/EESC-USP, foi definido o método que seria utilizado no acompanhamento dos trechos experimentais.

A avaliação estrutural dos diversos tipos de pavimentos foi feita através da determinação das deflexões do pavimento pela viga Benkelman (DNER-ME 24-78).

Quanto à avaliação do comportamento funcional do pavimento, por não haver disponibilidade de equipamentos apropriados e pessoal treinado em número suficiente, a princípio foi feita uma tentativa de definir um método de avaliação da superfície do pavimento que pudesse agilizar a coleta de dados baseando-se num levantamento expedito de ocorrências de defeitos em função de sua intensidade. Porém, verificou-se que, por ser muito subjetiva, seria difícil expressar a intensidade de deterioração atingida pelo pavimento, através de um parâmetro numérico (quantificar os defeitos apresentados pelo pavimento), com precisão suficiente para ser usado em pesquisa.

O trecho da rodovia Washington Luiz, escolhido para ser avaliado, tinha a princípio uma extensão de vinte quilômetros mas como resultado desta primeira avaliação, foi possível identificar alguns segmentos menores que se mostraram bem definidos como os de melhor, intermediário e pior aspecto superficial, nos dois tipos de pavimento. Foram selecionados segmentos paralelos em ambas as pistas, para possibilitar a comparação dos dois tipos de pavimentos, resultando num total de onze segmentos homogêneos. A FIGURA 9 mostra a localização destes segmentos. As FIGURAS 10 e 11 mostram respectivamente as seções transversais tipo das duas pistas.

FIGURA 9 - Trecho da rodovia Washington Luís, entre os km 217 e km 227.
Localização dos segmentos avaliados.

FIGURA 10 - Seção Transversal do Pavimento tipo 1 - primeira pista - SP 310.

FIGURA 11 - Seção Transversal do Pavimento tipo 2 - segunda pista - SP 310.

Uma dificuldade encontrada foi a necessidade de treinamento da equipe que deveria fazer a avaliação do comportamento funcional, pois devem-se adotar padrões e linguagem comuns a todos. Este treinamento foi dado pelos professores da EESC envolvidos no convênio.

Numa segunda fase, foi possível contar com a colaboração da Residência de Conservação de São Carlos, do DER de São Paulo o que, somando-se à redução da extensão do trecho a ser observado, possibilitou que fossem adotadas, com algumas adaptações, as seguintes normas para avaliação de pavimentos nos três trechos escolhidos.

- DNER-ME 24-78 - Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman;

-DNER-PRO 08-94 - Avaliação Objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos;

-DNER-ES 128/83 - Levantamento da condição de superfície de segmentos testemunha de rodovias de pavimento flexível ou semi-rígidos para gerência de pavimentos ao nível de rede;

- DNER-ES 173/86 - Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta;

- Durante todo o período de avaliação foram feitos registros em vídeo (filmagens), dos trechos selecionados;

3.1 - Determinação das deflexões do pavimento

Nesta dissertação foi adotada a viga Benkelman para medida das deflexões, pela disponibilidade do equipamento e de uma equipe treinada para a execução do ensaio e principalmente porque o modelo HDM III utiliza como dado de entrada o

valor médio das leituras da viga Benkelman. Nos casos em que a deflexão é medida com outros equipamentos deve ser feita uma correlação com as medidas da viga Benkelman para ser utilizada no modelo HDM III.

Foram feitas também medidas com um equipamento do tipo “Falling Weight Deflectometer” (FWD) da marca Dynatest, possibilitando a análise das bacias de deflexão e a comparação com a viga Benkelman.

As medidas foram feitas de acordo com o método de ensaio DNER-ME 24-78. Foram usadas vigas Benkelman de relação entre os braços de 4:1.

Foram feitas duas medidas de deflexão, nos três trechos acompanhados, em épocas diferentes do ano, sendo uma feita após um período de chuvas e outra após um longo período de seca. Adotamos a primeira medição para o presente estudo, por ser a mais desfavorável ou crítica.

3.2 - Índice de Gravidade Global

Foi feita a avaliação objetiva da superfície do pavimento, de acordo com o procedimento DNER-PRO 08-94, mencionado no item 3.3.2.

No levantamento de campo foram encontradas dificuldades por exigir um treinamento da equipe de campo para reconhecer os defeitos, principalmente sua classe. Por exemplo, para diferenciar os defeitos de trinca de bloco (TB), classe-2 dos defeitos de trinca de bloco com erosão acentuada nos bordos das trincas (TBE), classe-3. No trecho de Cabaceiras, com base de solo-cimento variando a percentagem de cimento de 3% a 10%, encontramos trincas com abertura de até dois centímetros, sem erosão de borda, que poderiam ser interpretadas como TBE.

3.3 - Especificação de serviço DNER-ES 128/83

Nesta dissertação foi feito o levantamento da condição de superfície dos trechos de estudo baseado na especificação de serviço DNER-ES 128/83, porém com algumas adaptações, para que os dados coletados pudessem ser usados no modelo HDM III.

Conforme a especificação de serviço DNER-ES 128/83 os subtrechos homogêneos quanto as condições superficiais do pavimento devem ser identificados no campo, pelo engenheiro residente, visualmente, não havendo necessidade de utilizar qualquer equipamento. A extensão máxima de cada subtrecho deve ser de 20 km e a mínima de 0,3 km.

Em cada subtrecho homogêneo devem ser identificados três segmentos-testemunha de 100 metros, localizados no início, meio e fim do subtrecho homogêneo.

As superfícies de avaliação devem ser distribuídas duas a duas ao longo do segmento de 100 metros. A FIGURA 12 ilustra a localização dos segmentos-testemunha e superfícies de avaliação em um subtrecho homogêneo.

FIGURA 12- Localização dos segmentos-testemunha e superfícies de avaliação em um subtrecho homogêneo.

3.3.1 - Adaptação ao Estudo

A primeira alteração feita foi quanto às classes de trincas pois o modelo HDM III utiliza como dados de entrada a porcentagem de trincas com abertura entre 1mm e 3mm e a porcentagem de "trincas largas " com abertura maior que 3mm. A Especificação de serviço DNER-ES 128/83 prevê três classes de trincas:

- Classe 1 - Trincas capilares, com largura até 1mm, normalmente designadas fissuras;
- Classe 2 - Trincas com largura maior que 1mm, sem desintegração (ou erosão) nas bordas;
- classe 3 - Trincas com largura maior que 1mm, com desintegração nas bordas.

Para evitar este problema, as medidas de campo foram feitas conforme a classificação utilizada por QUEIROZ (1981):

- Classe 1 - Trincas capilares, com abertura até 1mm;
- Classe 2 - Trincas com abertura entre 1mm e 3mm;
- Classe 3 - Trincas com abertura maior que 3mm mas que não apresentam erosão nas bordas;
- Classe 4 - Trincas com aberturas geralmente superiores a 3mm e que apresentam erosão ao longo das bordas.

Outra alteração foi na forma de identificar os subtrechos homogêneos, segmentos - testemunha e superfícies de avaliação pois a especificação de serviço DNER-ES 128/83 foi desenvolvida para ser utilizada na gerência de pavimentos ao nível de rede e neste trabalho foi aplicada em trechos específicos, isto é, ao nível de projeto, ou ao nível de pesquisa, que implica mais detalhes que o nível de projeto.

Em cada superfície de avaliação foi feito um levantamento qualitativo e quantitativo detalhado dos defeitos apresentados pelo pavimento, de acordo com a especificação DNER-ES 128/83. Os defeitos foram inventariados e transcritos na ficha de levantamento de campo da especificação acima citada.

3.3.1.1 - Trecho da Rodovia Washington Luiz, entre os km 217 e km 227 - Pista Dupla

Os subtrechos homogêneos com melhor, intermediário e pior estado de superfície, foram definidos anteriormente, como relatado no item 4. Porém, por se tratar de um trabalho de pesquisa, foi marcada uma superfície de avaliação a cada 100 metros o que resultou em um maior número de superfícies de avaliação. Esse maior detalhamento caracteriza o nível de pesquisa, em contraste com o nível de projeto.

3.3.1.2 - Trechos de Cabaceiras e de Dois Córregos

No trecho de Cabaceiras cada segmento homogêneo tem extensão de 200m, e no trecho de Dois Córregos os seguimentos homogêneos têm extensão variando entre 80m e 160 m, extensão menor que a mínima prevista na ES 128/83. Foram definidas no mínimo três superfícies de avaliação em cada segmento homogêneo.

3.3.2 - Medidas do afundamento nas trilhas de rodas

As flechas foram medidas em milímetros, utilizando-se uma trelça com base de 1,20m, conforme especifica o procedimento DNER-PRO 08-94.

Foram medidas em cada estaca ao longo do subtrecho homogêneo, nas trilhas interna (TRI) e externa (TRE), deslocando-se a trelça transversalmente dentro da trilha até obter a leitura máxima.

3.4 - Método de nível e mira para avaliação do quociente de irregularidade

Neste trabalho foi utilizada a especificação de serviço DNER-ES - 173/86 - "Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta", com algumas alterações pois o objetivo era determinar o QI dos trechos experimentais.

3.4.1 - Adaptações ao estudo

Para a presente pesquisa foram feitas as seguintes adaptações:

- *Quanto ao tamanho dos segmentos* - Alguns trechos experimentais, como os de Cabaceiras e de Dois Córregos, têm extensão menor que a especificada pela DNER-ES 173/86. Nestes trechos a medida de irregularidade foi feita como na PICR, adotando a mesma extensão.
- *Localização das trilhas de roda e definição da distância entre elas para nivelamento* - Na maioria dos trechos experimentais as trilhas de roda já estavam definidas pelo tráfego e nos casos em que a distância entre as trilhas de roda não coincidiram com a recomendada pela norma, os nivelamentos topográficos foram feitos sobre as trilhas de roda, desprezando a recomendação da DNER-ES 173/86, pois o objetivo era medir a irregularidade das trilhas de roda e não aferir um aparelho medidor de irregularidade "tipo resposta".
- *Verificação da consistência dos dados* - Foram tomadas algumas precauções para diminuir a possibilidade de erros, pois o valor do QI mostrou-se muito sensível aos erros de digitação ou leitura que podem ocorrer durante o nivelamento topográfico. No nivelamento de julho de 1995, no trecho de Cabaceiras com 9% de cimento, ocorreu um erro de leitura de 50mm que alterou o valor do QI da trilha interna de 97contagens/km para 115contagens/km, e o

valor do QI considerando as duas trilhas de rodas, passou de 87contagens/km para 96contagens/km. Com uma simples verificação na coluna dos valores de SBi (estimativa da derivada da cota no ponto i), na planilha que calcula os valores do QI acima citada, podemos detectar os “saltos” que ocorrem no perfil. Estes “saltos” quando ocorrem por erro de digitação são facilmente corrigidos, porém, quando ocorrem por erro de leitura ou de anotações, exigem uma verificação no campo e em alguns casos o nivelamento deve ser refeito. Uma outra maneira de verificar a consistência dos dados de nivelamento seria plotando as cotas já calculadas.

O trabalho com os dados foi automatizado, através do desenvolvimento de:

- *Planilha de campo* - Foi feita uma planilha de campo para as medidas com nível e mira, visando facilitar os serviços de anotação no campo e posterior introdução dos dados na planilha de cálculo do valor do QI.
- *Planilha para calcular o valor do QI* - Foi desenvolvida uma planilha (FIGURA 13), utilizando o programa Excel, para calcular o QI a partir das leituras do nivelamento topográfico. Esta planilha faz o cálculo das cotas e do Q.I., com os dados sendo digitados apenas uma vez e facilitou muito o trabalho, considerando o número de dados trabalhados.

CABACEIRAS 3%				trecho 95cab03				QI(ex)= 96				QI= 96													
Data21/07/95				401				est.ini.= 1159				est.fin.= 1150				QI(in)= 97				IRI = 7,39					
																		Trilha de roda Externa				Trilha de roda Interna			
estaca	n	dist.	Leit.E	Leit.I	cota ant	ré	altapar	cota ext	cota int	SB1	SB2,5	VA1	VA2,5	QI	SB1	SB2,5	VA1	VA2,5	QI						
1159	1	20	1168	1218	10000	1218	11218	10050	10000																
1159	2	20,5	1168	1218	10000	1218	11218	10050	10000																
1159	3	21	1168	1218	10000	1218	11218	10050	10000	2		0,0101					0,0403								
1159	4	21,5	1168	1210	10000	1218	11218	10050	10008	-4		0,0403					0,0403								
1159	5	22	1166	1214	10000	1218	11218	10052	10004	-3		0,0227					0,0101								
1159	6	22,5	1172	1206	10000	1218	11218	10046	10012	11	2,24	0,3048	0,0128				0,0101	0,0065							
1159	7	23	1167	1208	10000	1218	11218	10051	10010	0	-0,3	0,0000	0,0003				0,0025	0,0016							
1159	8	23,5	1165	1204	10000	1218	11218	10053	10014	-6	-0,6	0,0907	0,0010				0,0000	0,0128							
1159	9	24	1168	1203	10000	1218	11218	10050	10015	7	0	0,1234	0,0000				0,0907	0,0032							
1159	10	24,5	1164	1202	10000	1218	11218	10054	10016	-5	-0,3	0,0630	0,0003	96			0,0227	0,0065	97						
1159	11	25	1162	1204	10000	1218	11218	10056	10014	-10	-2,1	0,2519	0,0111				0,0025	0,0000							
1159	12	25,5	1168	1203	10000	1218	11218	10050	10015	4	0,16	0,0403	0,0001				0,0025	0,0001							
1159	13	26	1166	1204	10000	1218	11218	10052	10014	6	0,64	0,0907	0,0010				0,0403	0,0042							
1159	14	26,5	1168	1203	10000	1218	11218	10050	10015	3	0,96	0,0227	0,0024				0,0025	0,0032							
1159	15	27	1164	1203	10000	1218	11218	10054	10018	-6	-1	0,0907	0,0024				0,0025	0,0000							
1159	16	27,5	1165	1202	10000	1218	11218	10053	10016	-1	0,8	0,0025	0,0016				0,0630	0,0065							
1159	17	28	1168	1197	10000	1218	11218	10050	10021	10	2,08	0,2519	0,0111				0,0101	0,0001							
1159	18	28,5	1163	1196	10000	1218	11218	10055	10022	-9	0,64	0,2040	0,0010				0,1612	0,0000							
1159	19	29	1162	1195	10000	1218	11218	10056	10022	-7	1,28	0,1234	0,0042				0,0630	0,0001							
1159	20	29,5	1170	1196	10000	1218	11218	10048	10020	22	4,48	1,2191	0,0513				0,1612	0,0053							
1159	21	30	1163	1190	10000	1218	11218	10055	10028	8	2,72	0,1612	0,0189				0,0403	0,0065							
1159	22	30,5	1155	1192	10000	1218	11218	10063	10026	-8	-0,6	0,1612	0,0010				0,0101	0,0006							
1159	23	31	1156	1188	10000	1218	11218	10062	10030	1	1,12	0,0025	0,0032				0,0025	0,0016							
1159	24	31,5	1148	1188	10000	1218	11218	10070	10030	-3	-1,6	0,0227	0,0065				0,0403	0,0147							
1159	25	32	1148	1187	10000	1218	11218	10070	10031	-6	-2,9	0,0907	0,0212				0,0101	0,0317							
1159	26	32,5	1144	1188	10000	1218	11218	10074	10030	-2	-2,7	0,0101	0,0189				0,0227	0,0001							
1159	27	33	1146	1184	10000	1218	11218	10072	10034	0	-0,2	0,0000	0,0001				0,4937	0,0065							
1159	28	33,5	1142	1185	10000	1218	11218	10076	10033	-4	-1,6	0,0403	0,0065				0,6448	0,0065							
1159	29	34	1144	1185	10000	1218	11218	10074	10023	0	0,48	0,0000	0,0006				1,1108	0,0236							
1159	30	34,5	1144	1188	10000	1218	11218	10074	10020	8	0	0,1612	0,0000				1,5743	0,0477							
1159	31	35	1142	1185	10000	1218	11218	10076	10033	2	0	0,0101	0,0000				0,7280	0,0000							
1159	32	35,5	1138	1183	10000	1218	11218	10080	10032	-5	-1	0,0630	0,0024				0,2040	0,0006							
1159	33	36	1138	1182	10000	1218	11218	10080	10026	-6	-0,5	0,0907	0,0006				0,7280	0,0289							
1159	34	36,5	1137	1183	10000	1218	11218	10081	10035	-4	-1,9	0,0403	0,0094				0,0101	0,0079							
										9,5949 1,7108					9,7991 1,7185										

FIGURA 13 - Planilha para calcular o QI a partir das leituras do nivelamento topográfico.

3.5 - Medições de irregularidade com equipamentos tipo resposta

O quociente de irregularidade dos trechos de estudo foi medido também com o Integrador IPR/USP, em duas épocas com intervalo de dois anos. A segunda medição, executada em setembro de 1995, também foi usada para verificar possíveis erros grosseiros na medição do quociente de irregularidade com nível e mira.

3.6 - Resumo dos dados coletados de avaliação de pavimentos

Nesta dissertação foram avaliados três trechos divididos em subtrechos, durante o período de 1993 a 1995. Assim sendo foram coletados um total de 22.800 valores com nível e mira, 1028 valores com viga Benkelman e avaliadas 1378 estações com a DNER-PRO 08/94 e 314 estações com a DNER-ES 128/83, somando 25.520 dados nos três trechos avaliados, conforme TABELA 8.

TABELA 8 - Número de dados coletados para a dissertação.

TRECHO	Nº DE SEGM. HOM.	EXTEN- SÃO (m)	PONTOS NÍVEL.	PRO-08/94	ES- 128/83	VIGA BENK.	SUB- TOTAL
Washington Luiz	11	7.620	(3.840) 3	(382) 3	(85) 3	(382) 2	13.685
Cabaceiras	8	1.600	(3.600) 2	180	44	(90) 2	7.604
Dois Córregos.	7	1020	(2.040)2	52	15	(42) 2	4.231
SUB- TOTAL	26	10.240	22.800	1378	314	1.028	TOTAL 25.520

3.7 - Dados de tráfego

O volume diário médio (VDM) foi estimado com base em filmagens do tráfego feitas nos trechos de estudo. O tráfego foi filmado durante 24 horas seguidas possibilitando estudos mais detalhados e com menor possibilidade de erros.

Neste trabalho foi adotada a mesma classificação de veículos usada na PICR, para efeito de comparação com os dados coletados no período de 1977 a 1981. A classificação adotada esta descrita na TABELA 9.

A definição dos fatores de veículos teve como base os dados de pesagem de caminhões feita pelo DER/SP na rodovia Anhanguera, em 1993.

TABELA 9 - Classificação de veículos.

TIPO DE VEÍCULO	CLASSE (PICR)	SÍMBOLO (DNER-PRO 159/85)
VEÍCULOS LEVES	1 e 3	
ÔNIBUS	2	2C
CAMINHÕES MÉDIOS	4	2C
CAMINHÕES PESADOS	5	3C
CAMINHÕES ARTICULADOS	6 a 13	2S1, 2S2, 2S3, 3S2, 3S3, 2C2, 4C, 2C3

4 - Simulação com o modelo HDM III

O modelo HDM III, em sua versão original, apresenta alguma dificuldade no seu manuseio e na análise de seus dados. Este fato levou ao desenvolvimento, pelo Banco Mundial, de um programa que trabalhasse em um ambiente amigável, para aplicações específicas do modelo HDM (ARCHONDO-CALLAO, 1995).

Assim, foi criado o HDM Manager que interage com o HDM III da seguinte maneira:

- Armazena os dados de entrada;
- Gera todas as necessidades dos arquivos de entrada do HDM III;
- Executa o programa HDM III;
- Coleta os dados produzidos pelo HDM III;
- Apresenta os resultados em uma forma prática.

O presente trabalho foi desenvolvido com o auxílio do HDM Manager, e o apêndice 1 apresenta suas telas de entrada de dados.

4.1- Fonte dos dados

Para os trechos de Cabaceiras (SP 255, km 54) e Dois Córregos (acesso à SP 225), foram adotados, a princípio, os dados da Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR) (BRASIL [GEIPOT], 1981), para rodar o HDM Manager. Foi considerada como inicial a avaliação feita em 21 de setembro de 1977.

4.1.1- Trecho de Cabaceiras

O apêndice 1 apresenta as telas de entrada do HDM Manager com os dados do subtrecho com 10% de cimento na base, sentido Ribeirão Preto - Araraquara. Nos demais sub-trechos variam apenas alguns dados sobre as características do pavimento e esses dados são apresentados nas TABELAS 10 e 11, montadas com dados da PICR. Os demais dados de entrada são constantes em todos os sub-trechos.

4.1.2 - Trecho de Dois Córregos

A TABELA 12, montada com dados da PICR, apresenta alguns dados de entrada do subsistema “características da rodovia”, do HDM Manager. Os demais dados de entrada foram apresentados no item 4.

4.1.3 - Trecho da rodovia Washington Luiz

Neste trecho a avaliação inicial, adotada para rodar o HDM Manager, foi a de 1994. A TABELA 13 apresenta alguns dados de entrada do subsistema “características da rodovia”, do HDM Manager. Os demais dados de entrada foram apresentados no item 4.

TABELA 10 - Características do pavimento no trecho de Cabaceiras, SP 255, km 54, faixa sentido Ribeirão Preto - Araraquara.

PAVIMENTO											
TRECHO	REVES- TIMENTO espessura (mm)	BASE		NÚMERO ESTRU- TURAL	DETERIORAÇÃO						
		% de cimento	MR (GPa)		IRI (m/km)	Trincas (%)	Trincas Largas (%)	Panelas (%)	Desgaste (%)	Afundamento de Trilha (mm)	Desvio Padrão Afund. de Trilha (mm)
T31	130	10	26,01	3,72	2,90	1,2	0	0	0	1,72	1,01
T32	130	9	16,40	4,82	2,39	1,1	0	0	0	2,5	0,91
T33	130	8	21,76	4,82	1,45	0	0	0	0	2,43	0,83
T34	130	7	21,63	5,57	1,63	0	0	0	0	2,58	0,79
T35	130	6	14,39	6,01	1,22	0	0	0	0	2,93	1,19
T36	115	5	26,20	5,35	1,50	0	0	0	0	2,53	0,87
T37	115	4	13,67	5,35	1,72	0	0	0	0	2,45	1,13
T38	100	3	7,59	4,67	1,36	0	0	0	0	2,23	0,89

Fonte dos dados: PICR 21/09/1977;

MR = Módulo de Resiliência, em Gpa;

IRI = Índice de Irregularidade Internacional, em m/km.

TABELA 11 - Características do pavimento no trecho de Cabaceiras, SP 255, km 54, faixa sentido Araraquara - Ribeirão Preto.

PAVIMENTO											
TRECHO	REVES- TIMENTO espessura (mm)	BASE		NÚMERO ESTRU- TURAL	DETERIORAÇÃO						
		% de cimento	MR (GPa)		IRI (m/km)	Trincas (%)	Trincas Largas (%)	Panelas (%)	Desgaste (%)	Afundamento de Trilha (mm)	Desvio Padrão Afund. de Trilha (mm)
T31	130	10	26,01	3,72	1,93	8,2	0	0	0	2,08	0,93
T32	130	9	16,40	4,82	1,94	19,3	0	0	0	2,69	1,1
T33	130	8	21,76	4,82	1,49	2,1	0	0	0	2,78	1,12
T34	130	7	21,63	5,57	1,73	4,0	2,7	0	0	2,63	1,13
T35	130	6	14,39	6,01	1,54	0	0	0	0	2,63	1,44
T36	115	5	26,20	5,35	1,28	0	0	0	0	2,33	0,85
T37	115	4	13,67	5,35	1,61	6,0	4,0	0	0	2,85	0,98
T38	100	3	7,59	4,67	1,6	68,9	66,9	0	0	2,43	1,28

Fonte dos dados: PICR 21/09/1977;

MR = Módulo de Resiliência, em Gpa;

IRI = Índice de Irregularidade Internacional, em m/km.

TABELA 12 - Características do pavimento no trecho de acesso a Dois Córregos.

TRECHO SUBLEITO	Base						Deterioração				NÚMERO ESTRU- TURAL
	CBR	Tipo	MR (GPa)	IRI (m/km)	Trincas (%)	Trincas Largas (%)	Panelas (%)	Desgaste (%)	Afundamento de Trilha (mm)	Desv.Padrão Afund.Trilha (mm)	
T41	44	Solo- Cimento	75,9	1,82	0	0	0	0	1,38	1,38	4,23
T42	33	Solo-Cal		2,82	0	0	0	0	1,82	1,37	3,88
T43	49	SAFL		2,69	0	0	0	0	3,30	2,17	4,09
T44	53	Solo-Cal		2,27	0	0	0	0	2,78	1,37	4,07
T45	8	Solo- Brita		2,34	0	0	0	0	2,14	1,87	4,32

Fonte dos dados: PICR 24/09/1977;

MR = Módulo de Resiliência, em Gpa;

IRI = Índice de Irregularidade Internacional, em m/km;

SAFL = Solo Arenoso Fino Laterítico.

TABELA 13 - Características do pavimento no trecho da rodovia Washington Luiz.

TRECHO	Base		Deterioração						Deflexão	
	Tipo	¹ MR (GPa)	IRI (m/km)	Trincas (%)	Tr.Largas (%)	Panelas (%)	Desgaste (%)	Afund.Trilha (mm)	Desv.Padrão Af.Trilha (mm)	V. Benkelman (0,01mm)
S2A	MH		2,93	0	0	0	0	5,86	1,61	15
S2B	MH		5,74	9,8	5,67	0	0	6,85	2,83	29
S2C	MH		3,09	18,70	16,02	0	0	5,60	2,74	28
S5E	BGTC	0,115	6,23	17,22	10,10	0,01	0	4,68	3,14	32
S6E	BGTC	0,172		0	0	0	0	4,10	1,61	13
N3E	BGTC	0,200	5,01	10,76	5,980	0	0	2,85	3,62	38
N4E	BGTC	0,195	2,42	2,78	0,90	0	0	1,3	1,7	24

Fonte dos dados : Este estudo, em 1994;

MR = Módulo de Resiliência, em Gpa;

IRI = Índice de Irregularidade Internacional, em m/km;

VB = Viga Benkelman.

BGTC = Brita Graduada Tratada Com Cimento.

MH = Macadame Hidráulico.

¹ Os módulos deste trecho foram determinados por retroanálise de ensaios com o FWD. Para rodar o HDM Manager foi adotado o valor mínimo aceitável que é 1 GPa.

4.2 - Fatores de Equivalência de tráfego para serem utilizados no modelo HDM III

Segundo WATANATADA et al. (1987), para simular o efeito do tráfego no pavimento o Modelo HDM III utiliza o "Equivalent Standard Axle Loads" (ESAL) ou carga de eixo equivalente ao padrão.

Para cada grupo de veículo, o número de ESAL ("carga de eixo equivalente ao padrão") percorrendo um dado trecho em um dado ano é calculado como o produto do volume de tráfego anual deste grupo pelo "Equivalent Standard Axle Load Factor" (ESAL Factor ou AF) ou fator de equivalência do grupo (fator de veículo):

$$ESAL = \Sigma(\text{Vol. de Tráfego Anual} * AF) \quad \text{Por grupo de veículo}$$

Observa-se que as principais diferenças que existem entre o ESAL e o N (número equivalente de operações do eixo simples padrão) definido na norma de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER são:

- A primeira refere-se ao fato do ESAL ser anual (calculado com o Volume de tráfego anual) e o N ser calculado com o volume total de tráfego previsto para o período de projeto;
- Os dois métodos utilizam fatores de equivalência diferentes.

Um ponto em comum é que tanto o N como o ESAL englobam todos os tipos de veículos.

O "ESAL Factor (AF)" ou fator de equivalência é definido como o número de aplicações de um eixo simples de rodas duplas com carregamento de 80 KN (8,16 t, tomado como padrão) que causa o mesmo dano ao pavimento de uma aplicação do veículo considerado.

O AF e o fator de veículo definido na norma de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER têm conceito semelhante, porém apresentam uma grande diferença em suas equações.

Os valores dos fatores de equivalência são calculados através da expressão abaixo, para os diferentes carregamentos e configurações de eixos (WATANATADA et al., 1987):

$$AF4_k = \sum_{i=1}^{I_k} \frac{P_{ki}}{100} \sum_{j=1}^{J_{ki}} \left(\frac{AXL_{kij}}{SAXL_j} \right)^{4,0} \quad (17)$$

$AF4_k$ = fator de equivalência baseado no expoente de equivalência $LE=4,0$ por grupo de veículo k , em ESA (eixo padrão equivalente) por veículo;

P_{ki} = percentagem de veículos no subgrupo i (faixa de carga i) dos veículos no grupo k ;

I_k = número de subgrupos (faixa de carga) no grupo de veículos k ;

J_{ki} = número de eixos simples por veículo no subgrupo i do grupo de veículos k (um eixo tandem é tratado como dois eixos simples separados);

AXL_{kij} = Carga media no eixo j da faixa de carga i no grupo de veículos k ; e

$SAXL_j$ = Carga padrão do tipo de eixo do grupo j :

= 6,60 t para eixo simples de roda simples;

= 8,16 t para eixo simples de rodas duplas;

= $15,10/2 = 7,55$ t para eixo tandem duplo de rodas duplas;

= $22,90/3 = 7,65$ t para eixo tandem triplo de rodas duplas.

Para o presente trabalho foram calculados os valores atuais do "ESAL factor" para cada grupo de veículos utilizando como base de dados a pesagem de veículos realizada pelo DER-SP, na rodovia Anhanguera (SP 330) em 1993, objeto do Relatório Interno de junho de 1993, do convênio DER-SP/EESC-USP nº 1353/88. A TABELA 14 apresenta, como exemplo, o cálculo do "ESAL factor" para caminhões médios.

Não foram realizadas pesagens de ônibus e veículos comerciais leves, de modo que os valores obtidos restringem-se aos veículos classificados como caminhões

médios, caminhões pesados e caminhões articulados. Para as demais classes de veículos foram mantidos os valores da PICR.

As TABELAS 15, 16 e 17 apresentam o “ESAL factor” para cada grupo de veículos, que foram determinados utilizando o método anteriormente descrito e os dados de pesagem de veículos de 1993, os valores da PICR e os valores médios, respectivamente.

O modelo HDM III não prevê acréscimo no fator de equivalência de carga. Para verificar a sensibilidade do modelo, foram feitas simulações utilizando o “ESAL factor” determinado na PICR, em 1977 (TABELA 16) bem como com o valor médio entre este e o determinado em 1993, apresentado na TABELA 17. Os resultados obtidos foram muito próximos, com uma variação no índice internacional de irregularidade (IRI) de 4%, num período de análise de 17 anos, no trecho de Cabaceiras com 10% de cimento na base, como mostra a TABELA 18 e a FIGURA 14. A simulação, para efeito de comparação dos valores previstos pelo modelo HDM III, foi feita com o “ESAL factor” de 1977 (TABELA 16), nos trechos de Cabaceiras e Dois Córregos.

Nos trechos da rodovia Washington Luiz a simulação com o modelo HDM III foi feita com os valores atuais do “ESAL factor”, TABELA 15.

TABELA 14 - Cálculo do "ESAL factor" (AF) para caminhões médios, com 2 eixos e 6 rodas.

faixa de carga (t)	numero de veículos	percen- tagem de eixos (P)	fator de equivalência (FE)	Equivalência de Operações (EqOp)
			$FE = \left(\frac{AXL_{kij}}{SAXL_j} \right)^{4,00}$	$EqOp = \frac{P}{100} * FE$
faixa de carga i	primeiro eixo (j=1)			
1	1500	7	11,67	0,001287
2	2000	17	28,33	0,004943
3	2500	8	13,33	0,013507
4	3000	7	11,67	0,030141
5	3500	8	13,33	0,058797
6	4000	6	10,00	0,104220
7	4500	5	8,33	0,171941
8	5000	0	0,00	0,268286
9	5500	2	3,33	0,400370
10	Subtotal=	60	100,00	0,05280
	segundo eixo (j=2)			
1	2000	0	0,00	0,002115
2	2500	1	1,67	0,005781
3	3000	8	13,33	0,005781
4	3500	6	10,00	0,005781
5	4000	5	8,33	0,005781
6	4500	8	13,33	0,005781
7	5000	4	6,67	0,114819
8	5500	4	6,67	0,171347
9	6000	0	0,00	0,246553
10	6500	2	3,33	0,345262
11	7000	0	0,00	0,468225
12	7500	6	10,00	0,623148
13	8000	3	5,00	0,813666
14	8500	1	1,67	1,044853
15	9000	5	8,33	1,322122
16	9500	3	5,00	1,651225
17	10000	0	0,00	2,038252
18	10500	4	6,67	2,489630
	Subtotal	60	100	0,51241
	total			0,56521
Fator de	Veículo	(AF4 _k)=	0,5652135	

AXL_{kij} = carga média no eixo j, da faixa de carga i, no grupo de veículo k;

$SAXL_j$ = carga padrão do tipo de eixo do grupo j (pag. 69);

TABELA 15 - "ESAL factor" para cada grupo de veículos, calculados com base nos dados de pesagem de veículos realizada pelo DER-SP, na rodovia Anhanguera (SP330) em 1993.

Classificação do Veículo	"ESAL factor" (AF)
Caminhões Médios	0,565
Caminhões Pesados	3,250
Caminhões Articulados	9,567

TABELA 16 - "ESAL factor" para cada grupo de veículos, determinados na PICR, em 21 de setembro de 1977.

Classificação do Veículo	"ESAL factor" (AF)
Automóveis e Utilitários	0,000
Ônibus	0,500
Caminhões Médios	0,565
Caminhões Pesados	1,132
Caminhões Articulados	3,493

TABELA 17 - Valor médio do "ESAL factor" no período de análise.

Classificação do Veículo	"ESAL factor" (AF)
Automóveis e Utilitários	0,000
Ônibus	0,500
Caminhões Médios	0,565
Caminhões Pesados	2,191
Caminhões Articulados	6,530

TABELA 18 - Comparação entre as previsões do índice internacional de irregularidade, do modelo HDM III, considerando o "ESAL factor" da PICR e o valor médio do período de análise.

Ano	Operação de manutenção	Índice de Irregularidade (IRI) (m/km)	
		ESAL - PICR	ESAL - médio
1977		3	3
1978		3,1	3,1
1979		3,2	3,2
1980		3,4	3,4
1981		3,6	3,6
1982		3,7	3,8
1983		3,9	3,9
1984		4	4
1985	resselagem	3,7	3,7
1986		3,8	3,8
1987		3,9	3,9
1988		4	4
1989		4,1	4,1
1990		4,2	4,3
1991		4,3	4,4
1992		4,4	4,5
1993		4,5	4,7
1994		4,7	4,8
1995		4,8	5
1996		5	5,2

FIGURA 14 - Comparação entre as previsões do índice de irregularidade do modelo HDM III, considerando o "ESAL factor" da PICR e o valor médio do período de avaliação.

4.3 - Taxa de crescimento do tráfego

O modelo HDM III trabalha com uma taxa de crescimento de tráfego anual (WATANATADA et al., 1987) e (ARCHONDO-CALLAO, 1995), definido por:

$$VDM_t = VDM_0 (1+r)^t \quad (18)$$

onde:

r = taxa de crescimento do tráfego anual, expressa em percentagem/100;

t = número de anos no período de análise;

VDM_t = Volume Diário Médio de tráfego no ano t ;

VDM_0 = VDM inicial, ou VDM no ano 0.

Aplicando-se logarítimo na eq. 18, resulta:

$$\log VDM_t = \log VDM_0 + t \log (1+r)$$

ou

$$y = a + b t$$

obtendo-se b da regressão e sendo:

$$\log (1+r) = b$$

resulta:

$$r = 10^b - 1 \quad (19)$$

ou

$$r = 10^{\left(\frac{\log VDM_t - \log VDM_0}{t} \right)} - 1$$

Nos trechos de Cabaceiras e Dois Córregos, para simular o crescimento real do tráfego, foram utilizados os dados da PICR e uma contagem de tráfego feita no trecho em estudo, em 1995. As TABELAS 19, 20, e 21 apresentam os valores de VDM adotados para determinar as taxas de crescimento de tráfego .

Foram calculadas taxas de crescimento do tráfego para ambos os sentidos, no trecho de Cabaceiras, como mostra a TABELA 23. Como exemplo, a TABELA 22 e a FIGURA 15 apresentam o cálculo da taxa de crescimento para caminhões pesados, no trecho de Cabaceiras, sentido Ribeirão Preto - Araraquara.

A TABELA 24 apresenta as taxas de crescimento do tráfego estimadas para o trecho de acesso à Dois Córregos.

Para determinar a taxa de crescimento do tráfego nos trechos da rodovia Washington Luiz, foi utilizada a estimativa do volume diário médio (VDM) do DER de São Paulo, de 1994 e uma contagem de tráfego, acompanhada de filmagem, durante 24 horas, em 1995. O VDM e a taxa de crescimento do tráfego estimados são apresentados nas TABELAS 25 e 26.

TABELA 19 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, na SP 255, km 54, sentido Ribeirão Preto - Araraquara.

ano	VDM (veículos por dia)					
	V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
1977	1499	314	257	43	29	2142
1978	1516	318	259	43	30	2166
1979	1521	317	259	43	33	2173
1980	1529	319	260	43	33	2184
1981	1533	319	260	43	35	2190
1995	1688	412	548	540	90	3278

TABELA 20 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, na SP 255, km 54, sentido Araraquara - Ribeirão Preto.

ano	VDM (veículos por dia)					
	V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
1977	1499	314	257	43	29	2142
1978	1516	318	259	43	30	2166
1979	1521	317	259	43	33	2173
1980	1529	319	260	43	33	2184
1981	1533	319	260	43	35	2190
1995	1814	388	672	666	66	3606

TABELA 21 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, no acesso da SP 225 a Dois Córregos.

ANO	VDM (veículos por dia)					
	V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
1977	1080	375	61	18	9	1543
1978	1103	383	63	18	9	1576
1979	1107	384	63	18	9	1581
1980	1111	384	63	18	11	1587
1981	1114	386	63	18	11	1592
1995	1268	176	274	99	139	1956

TABELA 22 - Cálculo da taxa de crescimento para caminhões pesados, no trecho de Cabaceiras, sentido Ribeirão Preto - Araraquara.

ano	VDM (vpd)	log VDM	$b = \log(1+r)$ (obtido por regressão)	Taxa de crescimento (r) (%/100) $r = 10^b - 1$
1977	257	2,4099		
1978	259	2,4133		
1979	259	2,4133	0,01948	0,046
1980	260	2,415		ou
1981	260	2,415		4,6% p.a.
1995	548	2,7388		

vpd = veículos por dia.

FIGURA 15 - Ajuste linear para determinação da taxa de crescimento do tráfego de caminhões pesados, no trecho de Cabaceiras, sentido Ribeirão Preto - Araraquara.

TABELA 23 - Taxas de crescimento de tráfego na SP 255, km 54.

Sentido	Taxas de crescimento de tráfego(r), em %/100					
	V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
Araraquara	0,007	0,016	0,046	0,163	0,066	0,025
Rib. Preto	0,011	0,012	0,059	0,178	0,047	0,031

TABELA 24 - Taxas de crescimento de tráfego no acesso da SP 225 a Dois Córregos.

Taxas de crescimento de tráfego (r), em %/100					
V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
0,009	-0,045	0,092	0,107	0,175	0,013

TABELA 25 - Valores de VDM adotados para determinar a taxa de crescimento de tráfego, na rodovia Washington Luiz, SP 310, trecho entre os Km 217 e km 227.

ANO	VDM (veículos por dia)					
	V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
1994	8272	1108	3053	2078	587	15098
1995	11448	1539	3312	2666	636	19601

TABELA 26 - Taxas de crescimento de tráfego na rodovia Washington Luiz, SP 310, trecho entre os Km 217 e km 227.

Taxas de crescimento de tráfego(r), em %/100					
V.Leves	C.Médios	C.Pesados	C.Reboque	Ônibus	Total
0,384	0,389	0,0848	0,283	0,08348	0,29825

4.4 - Definição de estratégias

4.4.1 - Trecho de Cabaceiras

Foram consideradas duas estratégias de manutenção, a primeira prevê apenas execução de remendos em 90% da área de painéis no trecho. A segunda estratégia é a que melhor se adapta ao histórico do trecho durante o período em análise, de 1977 a 1995, e considera execução de remendos em 90% da área de painéis e resselagem com lama asfáltica no ano de 1985. O apêndice 1 mostra a tela de entrada de dados do subsistema "definição de estratégias" do HDM Manager, com os dados das estratégias adotadas. As políticas utilizadas para compor estas estratégias também são apresentadas no apêndice 1.

4.4.2 - Trecho de Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz

A estratégia de manutenção utilizada para o período de análise em ambos os trechos considera apenas execução de remendos em 90% da área de painéis.

4.5 - Saídas do HDM Manager

O HDM Manager reproduz os dez relatórios do modelo HDM III que contêm os arquivos de dados, mensagens de erros e todos os resultados. Além destes, o HDM Manager produz mais que quarenta tabelas divididas nas quatro opções de saída, discriminadas a seguir:

- Deterioração;
- Impacto aos usuários;
- Fluxo dos custos;
- Análise econômica.

A maioria destas tabelas envolvem parâmetros de avaliação econômica, que constitui a principal finalidade do programa. Porém consideramos apenas algumas tabelas com parâmetros de deterioração do pavimento apresentadas no apêndice 1 que são de maior interesse para o presente estudo.

5 - Análise dos dados

Foram analisados trechos com pavimentos recapeados, fresados, revestidos com concreto asfáltico e tratamento superficial, com bases cimentadas e granulares como mostra a TABELA 27.

Em cada trecho foram medidos os defeitos de superfície, incluindo trincas, panelas, remendos, pontos de exsudação, desgaste do revestimento, afundamentos, ondulações, afundamento nas trilhas de roda e a irregularidade longitudinal.

Dispõe-se de uma medição dos defeitos de superfície em cada trecho, para efeito de comparação com os valores previstos pelo modelo HDM III. Com exceção do trecho de Cabaceiras, SP-255, que foi avaliado em 1995, nas duas faixas de tráfego. Como este trecho apresenta VDM diferente nas duas faixas de tráfego, considerou-se como trechos distintos para uma análise "cross section" da evolução da deterioração.

Foi feita também uma estimativa dos defeitos da superfície do pavimento, com base em filmes feitos nos trechos de Cabaceiras em maio de 1993 e Dois Córregos em janeiro de 1992. As filmagens foram bastante detalhadas nas superfícies de avaliação, facilitando a avaliação dos parâmetros indicadores da condição da superfície. Para verificar a consistência dos dados, os filmes foram comparados com as fichas de levantamento de campo do procedimento DNER-PRO 08-94 e da especificação de serviço DNER-ES 128-83, preenchidas no levantamento de 1995 nos trechos de Cabaceiras e da rodovia Washington Luiz e de 1994 nos trechos de Dois Córregos.

Foram feitos dois levantamentos de irregularidade pelo método de nível e mira, com intervalo de dois anos, no trecho de Dois Córregos e de um ano nos demais trechos.

Nos trechos da rodovia Washington Luiz, em pista dupla com duas faixas de tráfego em cada pista, no segundo ano de avaliação, foi medida também a irregularidade da faixa interna (da esquerda) para que, utilizando a avaliação de 1994 como entrada de dados para o modelo HDM III, tivéssemos previsão de deterioração passível de comparação com as outras duas avaliações de 1995. Porém, não foi possível a utilização da avaliação da faixa interna pois o volume diário médio (VDM) nesta faixa em 1995, foi menor que o VDM da faixa externa em 1994 e portanto, deveria ser considerada como ano base para a simulação com o modelo HDM III.

A TABELA 28 apresenta o número de avaliações executadas agrupando os trechos por tipo de pavimento.

A TABELA 29 apresenta o número total de pontos observados, disponível para comparação com os valores previstos pelo modelo HDM III, para cada tipo de pavimento.

TABELA 27 - Descrição dos Trechos Analisados.

TRECHO	TIPO DE CAPA	TIPO DE BASE	Nº DE SEGMENTOS	Nº DE AVALIAÇÕES
SP 255 CABA- CEIRAS	TS-3 (Recapeado com CA)	Solo-Cimento (SC)	8	2 ^a
SP 310 WASH. LUIZ	CA (Recap. com CA e com fresagem em pontos localizados)	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) Macadame Hidráulico (MH)	6 ^b 5 ^b	3 3
DOIS - CÓRRE GOS	Tratamento Superficial Triplo (TS-3)	Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL) Solo-Cal Solo Brita (SB) Solo-Cimento (SC)	1 1 1 1	2 ^a 2 ^a 2 ^a 2 ^a

CA = Concreto Asfáltico;

TS-3 = Tratamento Superficial Triplo;

a - Estes trechos foram avaliados na PICR e portanto, conta-se com mais uma avaliação para análise estatística;

b - No trecho da rod. Washington Luiz, foi medida a irregularidade (QI) em apenas 3 segmentos com base de BGTC e 3 segmentos com base de Macadame Hidráulico.

TABELA 28 - Numero total de avaliações em cada tipo de pavimento.

TIPO DE BASE	GRANULAR		CIMENTADA	
TIPO DE CAPA	TS-3	CA	TS-3	CA
CABACEIRAS				16
WASH. LUIZ		15		18
D. CÓRREGOS	8		2	
TOTAL	8	15	2	34

TS-3 = Tratamento Superficial Triplo;

CA = Concreto Asfáltico.

TABELA 29 - Número total de pontos observados, disponível para comparação com os valores previstos pelo modelo HDM III, para cada tipo de pavimento.

TIPO DE PAVIMENTO		TRECHO			NÚMERO TOTAL DE SEGMENTOS AVALIADOS
CAPA	BASE	Cabaceiras	Washington Luiz	Dois Córregos	
CA	Granular		3		3
	Cimentada	16	3		19
TS-3	Granular			8	8
	Cimentada			2	2
TOTAL		16	6	10	32

TS-3 = Tratamento Superficial Triplo;

CA = Concreto Asfáltico.

5.1 - Análise da evolução dos parâmetros descritivos da condição da rodovia num trecho específico e comparação com o previsto pelo modelo HDM III

Foi analisado o efeito das duas estratégias de manutenção adotadas na simulação com o modelo HDM III, para os trechos de Cabaceiras. A primeira estratégia, cujos resultados são comparados com os parâmetros medidos no campo na FIGURA 16, considera apenas execução de remendos em 90% da área de painéis, durante o período de análise. A segunda estratégia (FIGURA 17) considera uma aplicação de lama asfáltica em 1985, além dos remendos em 90% da área de painéis durante todo o período de análise.

Comparando as FIGURAS 16 e 17 observa-se que, em uma análise a longo prazo, a previsão do modelo HDM III que mais se aproxima do desempenho real do pavimento é a que não considera a aplicação de lama asfáltica. Ou seja, a resselagem com lama asfáltica teve, na realidade, um desempenho pior que o previsto pelo modelo HDM III.

A aplicação de lama asfáltica teve grande influência na previsão de trincas, porém a previsão da irregularidade longitudinal do modelo HDM III foi pouco afetada, mesmo com alteração de aproximadamente 100% na área de trincas, como mostram a FIGURA 18 e a TABELA 30. A pequena influência da área de trincas na previsão do acréscimo no IRI já era esperada, de acordo com a eq. 10 ou o modelo de previsão do acréscimo no IRI. Assim sendo, para a análise estatística, foi considerada apenas a estratégia que prevê aplicação de lama asfáltica em 1985, por ser a que mais se identifica com o histórico do trecho.

As FIGURAS 16 e 17 ilustram a grande diferença encontrada entre os parâmetros descritivos da condição da rodovia medidos e os previstos pelo modelo HDM III, quando aplicado a um trecho específico. Tal situação se repete nos demais trechos de Cabaceiras, bem como nos trechos de Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz, como demonstra a FIGURA 19.

Em todos os trechos, as áreas de panelas mantiveram-se muito próximas de zero, devido à estratégia de manutenção adotada, que é de tapa-buracos em 90% da área de panelas.

TABELA 30 - Área de trincas e irregularidade previstas pelo modelo HDM III para 1995, nas duas estratégias consideradas, para o trecho de Cabaceiras com 10 % de cimento na base (T31), sentido Ribeirão Preto.

	Área de Trincas (%)	Irregularidade IRI (m/km)
1ª Estratégia	100	3,8
2ª Estratégia	3,2	3,3

1ª estratégia = remendos em 90% da área durante o período de análise;

2ª estratégia = aplicação de lama asfáltica em 1985, além de remendos em 90% da área.

A FIGURA 19 dá uma indicação visual de que as previsões de áreas de trincas e desgaste diferem substancialmente das medidas nos trechos de Cabaceiras e Dois Córregos. Nos trechos da rodovia Washington Luiz as previsões do modelo foram um pouco mais próximas das observadas e a FIGURA 20 apresenta, através da linha de tendência e do coeficiente de determinação da reta, a relação entre os parâmetros indicadores da condição do pavimento previstos pelo modelo HDM III e medidos nos trechos da rodovia Washington Luiz.

Observa-se na FIGURA 19 que a previsão do afundamento médio das trilhas de rodas feita pelo modelo HDM III apresenta alguma relação com o medido. Quanto à previsão de irregularidade longitudinal, é a que melhor se relaciona com o observado nos trechos.

As medidas de afundamento de trilhas de rodas e de irregularidade são bem mais objetivas que as medidas de áreas de trincas e desgaste. Esta subjetividade pode explicar em parte, a grande diferença entre as previsões do modelo HDM III e o

observado nos trechos de estudo. A hipótese anterior é reforçada na análise dos trechos da rodovia Washington Luiz, FIGURAS 19 e 20, onde o levantamento das condições da superfície do pavimento foi feito pela mesma equipe, tanto no ano base (1994), para entrada de dados do modelo HDM III, como em 1995, para comparação com os resultados do modelo.

Porém observa-se nas FIGURAS 19 e 20 que também há uma relação melhor entre o previsto e o observado para os demais parâmetros indicadores da condição do pavimento nos trechos da rodovia Washington Luiz, indicando que o fator preponderante para melhor relação entre a previsão do modelo HDM III e as medidas de campo é o período de análise que neste trecho foi de apenas um ano enquanto nos demais foi de 17 anos. Esta diferença se deve a um acúmulo de erro ano a ano, já que o modelo HDM III prevê um incremento anual para os diversos parâmetros descritivos da condição do pavimento. Como exemplo, a FIGURA 21 mostra uma linha de tendência ajustada para o acréscimo anual no IRI previsto pelo modelo HDM III bem como para o acréscimo anual no IRI observado nos trechos. Como os trechos avaliados abrangem um grande intervalo de variação do IRI e a maioria das rodovias na região central do estado de São Paulo foram construídas na mesma época destes trechos e apresentam desempenho semelhante, podemos concluir que nesta região o incremento anual médio no IRI foi de aproximadamente 30% enquanto a previsão do modelo HDM III foi de aproximadamente 4%.

Em especial na previsão do incremento anual no IRI, esta diferença se deve ao fato de que na realidade foram executadas operações de tapa buracos ao invés de remendos e o modelo não prevê a perda de qualidade do pavimento que ocorre neste tipo de operação de manutenção.

A análise dos trechos da rodovia Washington Luiz, composto por 6 trechos, 3 com base granular e 3 com base cimentada, apresentada na FIGURA 20, dá uma indicação de que o tipo de base tem pouca influência na previsão dos parâmetros descritivos da condição do pavimento pelo modelo HDM III, pois em geral há uma relação linear para o acréscimo destes parâmetros.

FIGURA 16 - a) Evolução do Índice internacional de irregularidade (IRI) durante o período de análise;

FIGURA 16 - b) Progressão da área de trincas;

FIGURA 16 - c) Progressão da área de trincas largas;

FIGURA 16 - d) Evolução do afundamento médio das trilhas de rodas.

FIGURA 16 - Evolução da condição da rodovia no trecho com 10% de cimento na base, em Cabaceiras, adotando-se a estratégia de remendos em 90% da área de painéis.

FIGURA 17 - a) Evolução do Índice internacional de irregularidade (IRI) durante o período de análise;

FIGURA 17 - b) Progressão da área de trincas;

FIGURA 17 - c) Progressão da área de trincas largas;

FIGURA 17 - d) Evolução do afundamento médio das trilhas de rodas.

FIGURA 17 - Evolução da condição da rodovia no trecho com 10% de cimento na base, em Cabaceiras, adotando-se como estratégias de manutenção execução de remendos em 90% da área de painéis e aplicação de lama asfáltica em 1985.

FIGURA 18 - Comparação entre os valores do índice internacional de irregularidade (IRI) medidos e previstos pelo modelo HDM III, considerando como 1ª estratégia de manutenção apenas execução de remendos durante o período de análise e como 2ª estratégia remendos mais aplicação de lama asfáltica em 1985, no trecho de Cabaceiras com 10 % de cimento na base.

FIGURA 19 - a) Irregularidade longitudinal medida e prevista pelo modelo HDM III, nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz;

FIGURA 19 - b) Áreas de trincas medidas e previstas pelo modelo HDM III, nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz;

FIGURA 19 - c) Áreas de trincas largas previstas pelo modelo HDM III e medidas nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz;

FIGURA 19 - d) Áreas de desgaste previstas pelo modelo HDM III e medidas nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz;

FIGURA 19 - e) Áreas de panelas previstas pelo modelo HDM III e medidas nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz;

FIGURA 19 - f) Afundamento médio de trilhas de rodas previsto pelo modelo HDM III e medido nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e da rodovia Washington Luiz.

FIGURA 19 - Comparação entre os parâmetros descritivos da condição da rodovia previstos pelo modelo HDM III e os medidos nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e rodovia Washington Luiz.

FIGURA 20 - a) Índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III versus IRI medido nos trechos da rodovia Washington Luiz.

FIGURA 20 - b) Área de trincas prevista pelo modelo HDM III versus área de trincas medida nos trechos da rodovia Washington Luiz.

FIGURA 20 - c) Área de trincas largas prevista pelo modelo HDM III versus área de trincas largas medida nos trechos da rodovia Washington Luiz.

FIGURA 20 - d) Afundamento médio das trilhas de rodas previsto pelo modelo HDM III versus afundamento médio das trilhas de rodas medidos nos trechos da rodovia Washington Luiz.

FIGURA 20 - Linha de tendência e coeficiente de determinação da reta ajustada para os parâmetros indicadores da condição do pavimento previstos pelo modelo HDM III e medidos nos trechos da rodovia Washington Luiz.

FIGURA 21 - Ajuste da linha de tendência ao incremento anual no IRI previsto pelo modelo HDM III bem como no IRI observado nos trechos de Cabaceiras, Dois Córregos e rodovia Washington Luiz.

5.2 - Calibração do Modelo HDM III

Entre os modelos de deterioração do HDM III, foi possível calibrar apenas o de previsão do acréscimo anual na irregularidade, em termos de índice internacional de irregularidade (IRI). O IRI é a mais importante variável utilizada na análise econômica, objetivo principal do modelo HDM III (item 3.2.2). Portanto, foi dado maior ênfase para a calibração deste modelo.

No apêndice 2 é apresentado um resumo dos procedimentos estatísticos usados para análise de regressão.

5.2.1 - Análise do índice internacional de irregularidade (IRI) nos trechos do acesso a Dois Córregos - revestidos com tratamento superficial triplo

O revestimento do trecho de acesso a Dois Córregos, feito com tratamento superficial triplo, sofreu uma desagregação acentuada durante o período de análise. Este desgaste do revestimento contribuiu de maneira determinante para que o acréscimo no IRI chegasse a 67% em média, em dois anos consecutivos, enquanto o modelo HDM III previu acréscimo de 6% no IRI para o mesmo período, como mostram as FIGURAS 22 e 23. Observa-se ainda na FIGURA 23 que o acréscimo no IRI teve uma evolução uniforme nos diversos trechos do acesso a Dois Córregos, apesar de serem compostos por tipos de base diferentes, o que confirma a hipótese de que o acréscimo no IRI se deve fundamentalmente à desagregação da camada de revestimento.

FIGURA 22 - Índice internacional de irregularidade (IRI) nos trechos do acesso a Dois Córregos.

FIGURA 23 - Linha de tendência ajustada para o acréscimo no IRI previsto pelo modelo HDM III e para o IRI medido nos trechos de acesso a Dois Córregos, em dois anos consecutivos.

5.2.1.1 - Modelo de regressão linear para calibração da previsão de IRI do HDM III, considerando período de análise de 15 anos.

A FIGURA 24 apresenta o ajuste linear e a equação de regressão para os dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo HDM III com período de análise de 15 anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos.

Os resultados da análise de regressão apresentados na TABELA 31, com $R^2=0,12$ demonstram que não há correlação linear entre o IRI medido e o previsto pelo modelo HDM III com período de análise de 15 anos.

A estatística $F=2,28$ corresponde ao nível de significância $\alpha=17\%$ e portanto conclui-se que não há relação entre as variáveis e a regressão não é útil para ajustar o valor do IRI, nos trechos do acesso a Dois Córregos.

FIGURA 24 - Ajuste linear para os dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III com período de análise de 15 anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos.

TABELA 31 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear para os dados de IRI medido versus IRI previsto pelo HDM III com período de análise de 15 anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos.

TABELA 31 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,12470195
Erro padrão	1,65205694
Observações	10

TABELA 31 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	6,22882297	6,22882297	2,2822119	0,16930965
Resíduo	8	21,834337	2,72929213		
Total	9	28,06316			

TABELA 31 c) Teste t para os parâmetros de regressão.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	-1,30025234	4,61578324	-0,28169701	0,78532537
IRI _{HDM}	1,52168951	1,00727502	1,51069914	0,16930965

5.2.1.2 - Modelo de regressão linear para calibração da previsão de IRI do HDM III, calculada com período de análise de 2 anos.

A princípio foi definida uma equação de regressão linear simples de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$\text{IRI}_{\text{medido}} = a_1 \text{IRI}_{\text{HDM}} + a_0 \quad (20)$$

onde:

a_0, a_1 = Coeficientes de regressão;

IRI_{HDM} = Índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, em m/km;

IRI_{medido} = Índice internacional de irregularidade (IRI) do trecho, em m/km, definida pela relação:

$$QI = 13 IRI$$

onde QI = Quociente de irregularidade em contagens/km, medido com nível e mira.

Os resultados da análise de regressão são apresentados na FIGURA 25 e TABELA 32.

Do teste t conclui-se que o parâmetro a_0 não é significativo no nível 5% e portanto não é útil para a calibração do IRI previsto pelo HDM III.

Assim sendo, foi ajustada uma reta de mínimos quadrados passando pela origem e obteve-se a seguinte equação:

$$IRI_{medido} = 1,5184 IRI_{HDM} \quad (21)$$

Os resultados da análise de regressão são apresentados na FIGURA 26 e TABELA 33.

Do teste t, conclui-se que o coeficiente de regressão linear é significativo ao nível 0,00027% e portanto, é útil para a calibração do IRI previsto pelo HDM III, para os trechos do acesso a Dois Córregos.

O coeficiente de determinação da reta (R^2) é 0,62 e portanto há correlação entre as variáveis, o que é confirmado pelos resultados do teste F, no nível de significância 1,38%.

Observa-se na eq. 21 que o IRI medido nestes trechos foi em média, 52% maior que o previsto pelo modelo HDM com período de análise de dois anos, confirmando a hipótese levantada anteriormente na FIGURA 23.

FIGURA 25 - Ajuste da reta de mínimos quadrados aos dados de IRI medido versus IRI previsto pelo modelo HDM III com período de análise de dois anos, nos trechos do acesso a Dois Córregos.

TABELA 32 - Resultados estatísticos da análise de regressão aplicada aos dados de IRI medido versus IRI previsto pelo modelo HDM III com período de análise de dois anos, dos trechos do acesso a Dois Córregos.

TABELA 32 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R^2 ajustado	0,8609363
Erro padrão	0,42761856
Observações	5

TABELA 32 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	4,71110709	4,71110709	25,7637976	0,01476969
Resíduo	3	0,54857291	0,18285764		
Total	4	5,25968			

TABELA 32 c) Teste t para os parâmetros de regressão.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	1,01230185	1,20439099	0,84050932	0,46233108
IRI _{HDM}	1,30501582	0,25710519	5,07580511	0,01476969

FIGURA 26 a) Reta de mínimos quadrados passando pela origem;

FIGURA 26 b) Diagrama de resíduos.

FIGURA 26 - Modelo de regressão linear passando pela origem, ajustado aos dados de IRI medidos em 1994 versus IRI previstos pelo HDM III para 1994, considerando período de análise de dois anos.

TABELA 33 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão, sem a interseção, aplicada aos dados de IRI medido versus IRI previsto pelo modelo HDM III com período de análise de dois anos, dos trechos do acesso a Dois Córregos.

TABELA 33 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,62114164
Erro padrão	0,41162901
Observações	5

TABELA 33 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	4,58192623	4,58192623	27,0418342	0,01381729
Resíduo	4	0,67775377	0,16943844		
Total	5	5,25968			

TABELA 33 c) Teste t para os parâmetros de regressão.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>nível de significância (α)</i>
Interseção	0			
IRI _{HDM}	1,51837358	0,03929744	38,6379723	2,6801E-06

5.2.2 - Modelo para calibração do índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, para os trechos de Cabaceiras - pavimentos revestidos com concreto asfáltico (CA).

A princípio tentou-se um ajuste linear para os dados de irregularidade dos trechos de Cabaceiras, considerando um período de análise de 17 anos, utilizando dados da PICR desde 1977.

A equação de regressão linear simples para calibração do índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III para os trechos de Cabaceiras, foi desenvolvida com base no modelo estatístico apresentado na eq. 20.

Os resultados da análise de regressão são apresentados na TABELA 34.

Observa-se nos resultados do teste t, o nível de significância $\alpha=50\%$ para o parâmetro de regressão a_0 , o que leva a concluir que este parâmetro não é útil para prever o valor estimado.

Assim sendo decidiu-se forçar a reta de mínimos quadrados pela origem, no diagrama de dispersão do IRI previsto pelo HDM III versus IRI medido nos trechos e definiu-se o seguinte modelo:

$$IRI_{\text{medido}} = 1,81 IRI_{\text{HDM}} \quad (22)$$

$$R^2 = 0,41$$

$$\text{Erro padrão} = 0,79$$

$$n = 16 \text{ observações}$$

Observa-se na eq. 22 que o IRI medido nos trechos de Cabaceiras é, em média, 80% maior que o IRI previsto pelo modelo HDM III considerando um período de análise de 17 anos.

Os resultados da análise estatística são apresentados na TABELA 35 e na FIGURA 27.

Do teste t conclui-se que o coeficiente de regressão é significativo no nível 1% e portanto é útil para prever o valor estimado.

Como resultado do teste F concluímos, ao nível de significância de 0, 2%, que a relação entre as variáveis não ocorre por acaso. Porém o coeficiente de determinação (R^2) indica que a equação de regressão explica apenas 41% da variação do IRI medido em relação ao IRI previsto pelo modelo HDM III.

TABELA 34 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear aplicada aos sub-trechos de Cabaceiras.

TABELA 34 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,45914685
Erro padrão	0,80039163
Observações	16

TABELA 34 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	8,798343	8,798343	13,7339609	0,00234955
Resíduo	14	8,96877475	0,64062677		
Total	15	17,7671178			

TABELA 34 c) Teste t para os parâmetros de regressão.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	-1,14460686	1,65276383	-0,69254109	0,49992449
IRI _{HDM}	2,22049098	0,59917145	3,70593591	0,00234955

FIGURA 27 - Ajuste da reta de mínimos quadrados aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III, nos trechos de Cabaceiras, passando pela origem.

TABELA 35 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear sem a interseção, aplicada aos sub-trechos de Cabaceiras, com período de análise de 17 anos.

TABELA 35 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,41124371
Erro padrão	0,78638531
Observações	16

TABELA 35 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	8,49108997	8,49108997	13,7306995	0,00235159
Resíduo	15	9,27602778	0,61840185		
Total	16	17,7671178			

TABELA 35 c) Teste t para os parâmetros de regressão;

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	0			
IRI _{HDM}	1,80859245	0,07127147	25,3761075	9,7808E-14

Numa tentativa de melhorar o R², foi ajustada uma parábola aos dados de irregularidade dos sub-trechos de Cabaceiras, considerando um período de análise de 17 anos.

A função quadrática utilizada para o ajuste da curva de mínimos quadrados, foi linearizada através de transformações nas variáveis independentes e ajustada ao seguinte modelo estatístico:

$$\text{IRI}_{\text{medido}} = a_2 Z + a_1 \text{IRI}_{\text{HDM}} + a_0 \quad (23)$$

onde:

$$Z = \text{IRI}_{\text{HDM}}^2$$

a_0 , a_1 , a_2 = Coeficientes de regressão;

IRI_{HDM} = Índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, em m/km;

IRI_{medido} = Índice internacional de irregularidade (IRI) do trecho, em m/km, definida pela relação:

$$QI = 13 IRI$$

onde QI = Quociente de irregularidade em contagens/km, medido com nível e mira.

A eq. 24 foi definida para adaptação do índice de irregularidade previsto pelo modelo HDM III, com período de análise de 17 anos, ao trecho de Cabaceiras.

$$IRI_{medido} = 3,821 IRI_{HDM}^2 - 17,979 IRI_{HDM} + 25,087 \quad (24)$$

A FIGURA 28 mostra a parábola ajustada aos dados de IRI medido versus IRI previstos pelo HDM III com período de análise de 17 anos, nos trechos de Cabaceiras.

O coeficiente de determinação (R^2) 0,56 indica que há relação entre as variáveis porém o modelo explica apenas 56% da variação da variável dependente. Os resultado do teste F confirmam a relação, no nível de significância de 0,17%, porém, do teste t apresentado na TABELA 36, conclui-se que todos os coeficientes de regressão não são significativos no nível 1% e portanto não são úteis para prever o valor estimado.

Assim sendo optou-se pela eq. 22 para calibrar o HDM III nos trechos de Cabaceiras, até que seja definido outro melhor, com novos dados.

FIGURA 28 a) Ajuste da parábola de mínimos quadrados;

FIGURA 28 b) Diagrama dos resíduos da variável IRI_{HDM} ;

FIGURA 28 c) Diagrama dos resíduos da variável IRI_{HDM}^2 ;

FIGURA 28 - Análise de regressão quadrática aplicada aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III com período de análise de 17 anos, nos trechos de Cabaceiras.

TABELA 36 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão aplicada aos dados de IRI dos trechos de Cabaceiras, considerando um período de análise de 17 anos para efeito de simulação com o modelo HDM III.

TABELA 36 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,56524315
Erro padrão	0,71760602
Observações	16

TABELA 36 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	2	11,07265847	5,536329236	10,75102216	0,00175647
Resíduo	13	6,694459278	0,514958406		
Total	15	17,76711775			

TABELA 36 c) Teste t para os parâmetros de regressão;

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>nível de significância (α)</i>
Interseção	25,086953	12,56966895	1,995832433	0,067340887
IRI _{HDM}	-17,9786041	9,626533032	-1,867609455	0,08452203
IRI _{HDM} ²	3,82134797	1,818349284	2,10154782	0,055656014

5.2.3 - Modelo para calibração do índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo HDM III, para os trechos da rodovia Washington Luiz - pavimentos revestidos com concreto asfáltico (CA).

A equação de regressão linear simples ajustada aos dados de índice internacional de irregularidade (IRI) dos trechos da rodovia Washington Luiz seguiu o modelo estatístico apresentado na eq. 20.

Nos resultados do teste t, apresentados na TABELA 37, observa-se que o nível de significância α é 65% para o parâmetro a_0 , o que leva a concluir que a interseção não é significativa.

Forçando-se a reta de mínimos quadrados pela origem, obteve-se a seguinte equação:

$$IRI_{\text{medido}} = 1,1036 IRI_{\text{HDM}} \quad (25)$$

$$R^2 = 0,79$$

$$\text{Erro padrão} = 0,24$$

$$n = 6 \text{ observações}$$

A reta ajustada e os resultados da análise de regressão são apresentados na FIGURA 29 e TABELA 38. Do teste t conclui-se que o coeficiente de regressão é significativo no nível 1% e portanto é útil para prever o valor estimado.

O coeficiente de determinação da reta ($R^2=0,79$) indica uma boa relação entre as variáveis. Como resultado do teste F conclui-se, ao nível de significância de 0,003%, que a relação entre as variáveis não ocorre por acaso. Entretanto dispõe-se de apenas 6 observações, desta maneira, a equação de regressão será útil

para calibrar a previsão do modelo HDM III nos trechos da rodovia Washington Luiz até que novos sob-trechos homogêneos sejam avaliados.

Observa-se na eq. 25 que o IRI medido nos trechos da rodovia Washington Luiz é, em média, 10% maior que o IRI previsto pelo modelo HDM III considerando um período de análise de 1 ano.

TABELA 37 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear aplicada aos dados de IRI do trecho da rodovia Washington Luiz.

TABELA 37 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,9864632
Erro padrão	0,23345569
Observações	6

TABELA 37 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	19,9128771	19,9128771	365,363445	4,4139E-05
Resíduo	4	0,21800623	0,05450156		
Total	5	20,1308833			

TABELA 37 c) Teste t para os parâmetros de regressão;

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>nível de significância (α)</i>
Interseção	-0,13869653	0,2838355	-0,48865109	0,65066891
IRI _{HDM}	0,92719018	0,04850721	19,1144826	4,4139E-05

FIGURA 29 a) Ajuste da reta de mínimos quadrados passando pela origem;

FIGURA 29 b) Diagrama de resíduos.

FIGURA 29 - Ajuste linear para os dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo modelo HDM III, nos trechos da rodovia Washington Luiz.

TABELA 38 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear aplicada aos dados de IRI dos trechos da rodovia Washington Luiz.

TABELA 38 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,78783558
Erro padrão	0,23738806
Observações	6

TABELA 38 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	22,8813179	22,8813179	406,034829	3,5804E-05
Resíduo	5	0,28176546	0,05635309		
Total	6	23,1630833			

TABELA 38 c) Teste t para os parâmetros de regressão;

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	0			
IRI _{HDM}	1,10362352	0,01829118	60,3363656	2,3666E-08

TABELA 38 d) Resultados de resíduos;

<i>Observação</i>	<i>IRI previsto</i>	<i>Resíduos</i>	<i>Resíduos padrão</i>
1	3,39916044	-0,24916044	-1,04959128
2	6,80935711	-0,03935711	-0,1657923
3	4,11651573	0,42348427	1,78393248
4	8,44271992	-0,06271992	-0,26420841
5	7,00800935	-0,08800935	-0,37074041
6	3,14532703	0,16467297	0,69368682

5.2.4 - Modelo genérico para calibração do modelo de previsão do IRI, considerando período de análise de um ano

5.2.4.1 - Modelo de regressão linear simples

A eq. 26 foi definida seguindo o modelo estatístico da eq. 20 para ajustar uma reta de mínimos quadrados aos dados de IRI previstos pelo modelo HDM III, com período de análise de um ano, versus IRI medidos nos trechos avaliados.

$$IRI_{\text{medido}} = 1,02 IRI_{\text{HDM}} + 1,21 \quad (26)$$

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,63

Erro padrão da estimativa = 0,92

n = 19 observações

onde:

IRI_{HDM} = Índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, em m/km,

IRI_{medido} = Índice internacional de irregularidade (IRI) medido no trecho, em m/km.

Do teste t, cujos resultados são apresentados na TABELA 39, conclui-se que o coeficiente de regressão $a_0=1,21$, com estatística $t=1,4$, não é significativo ao nível de confiança de 95% e portanto não é útil para prever o valor estimado.

Como a interseção não é significativa decidiu-se forçar a reta pela origem e obteve-se a seguinte equação:

$$IRI_{\text{medido}} = 1,265 IRI_{\text{HDM}} \quad (27)$$

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,56

Erro padrão da estimativa = 0,95

n = 19 observações

onde:

IRI_{HDM} = Índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, em m/km,

IRI_{medido} = Índice internacional de irregularidade (IRI) medido no trecho, em m/km.

A reta de mínimos quadrados e os resultados da análise de regressão são apresentados na FIGURA 30 e TABELA 40.

Do teste t conclui-se que o coeficiente de regressão é significativo no nível 1% e portanto é útil para prever o valor estimado.

O coeficiente de determinação (R^2) indica que o modelo explica 56% da variação do IRI. Do resultado do teste F concluímos, ao nível de significância de 0,005%, que a relação entre as variáveis não ocorre por acaso e a regressão será útil para ajustar o IRI previsto pelo modelo HDM III à região central do estado de São Paulo.

A eq. 27 sugere que o IRI observado na região central do estado de São Paulo é em média 26% maior que o IRI previsto pelo modelo HDM III num período de análise de um ano, confirmando a relação apresentada na FIGURA 21.

TABELA 39 - Resultados estatísticos da análise de regressão linear aplicada aos dados de IRI previstos pelo modelo HDM III, com período de análise de um ano, versus IRI medidos nos trechos avaliados.

TABELA 39 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R^2 ajustado	0,63602142
Erro padrão	0,92182344
Observações	19

TABELA 39 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	27,5776015	27,5776015	32,4534597	2,622E-05
Resíduo	17	14,4458936	0,84975845		
Total	18	42,0234952			

TABELA 39 c) Teste t para os parâmetros de regressão.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	1,21253523	0,86518226	1,40147953	0,17906345
IRI _{HDM}	1,0212656	0,17927024	5,69679381	2,622E-05

FIGURA 30 - Reta de mínimos quadrados passando pela origem, ajustada para os dados de IRI previstos pelo modelo HDM III versus IRI medidos, considerando todos os trechos avaliados e período de análise de 1 ano.

TABELA 40 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear, passando pela origem aplicada aos valores de IRI considerando todos os trechos avaliados.

TABELA 40 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,56096986
Erro padrão	0,9461895
Observações	19

TABELA 40 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	25,9085529	25,9085529	28,9392256	4,9926E-05
Resíduo	18	16,1149423	0,89527457		
Total	19	42,0234952			

TABELA 40 c) Teste t para os parâmetros de regressão;

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	0			
IRI _{HDM}	1,2649	0,04498	28,1223	2,51E-16

TABELA 40 e) Resultados de resíduos.

<i>Observação</i>	<i>IRI previsto</i>	<i>Resíduos</i>	<i>Resíduos padrão</i>
1	4,11088558	1,24911442	1,32015248
2	6,54579473	1,23420527	1,30439544
3	5,8184842	0,5815158	0,61458703
4	5,97659519	1,58340481	1,67345422
5	6,7987723	1,3412277	1,41750431
6	7,1845631	-0,6545631	-0,69178859
7	5,97027075	0,74972925	0,79236691
8	4,88246718	-0,08246718	-0,08715715
9	6,42563038	-0,40163038	-0,4244714
10	4,95836045	-0,16836045	-0,17793524
11	5,38842233	-1,02842233	-1,08690947
12	5,26193354	0,54806646	0,57923541
13	5,41372008	1,08627992	1,14805746
14	3,89585464	-0,74585464	-0,78827195
15	7,80435816	-1,03435816	-1,09318288
16	4,71803176	-0,17803176	-0,18815655
17	9,67639221	-1,29639221	-1,37011899
18	8,03203798	-1,11203798	-1,1752804
19	3,60493043	-0,29493043	-0,31170334

5.2.4.2 Modelo de regressão linear múltipla utilizando a variável “dummy” para o tipo de revestimento e para tipo de base do pavimento.

Foi utilizada a variável “dummy” para determinar a influência do tipo de base e de capa na definição de um modelo genérico para calibração do índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, conforme o seguinte modelo:

$$IRI_{medido} = a_2 IRI_{HDM} + a_1 B + a_0 \quad (28)$$

onde:

a_0, a_1, a_2 = Coeficientes de regressão;

$B = 0$ para base granular

1 para base cimentada;

IRI_{HDM} = Índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, em m/km,

IRI_{medido} = Índice internacional de irregularidade (IRI) do trecho, em m/km, definida pela relação:

$$QI = 13 IRI$$

onde QI = Quociente de irregularidade em contagens/km, medido com nível e mira.

Os dados obtidos foram processados através da análise de regressão matricial do modelo acima no programa Microsoft Excel. Do resultado do processamento apresentado na TABELA 41, definiu-se o seguinte modelo:

$$IRI_{medido} = 1,0194 IRI_{HDM} - 0,52 B + 1,5498 \quad (29)$$

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,64

Erro padrão da estimativa = 0,91

$n = 19$ observações

Do teste t, conclui-se que o parâmetro de regressão da variável “dummy” B não é significativo no nível 5% e portanto não é útil para prever o valor estimado.

Ficou comprovado estatisticamente ao nível de confiança de 95% que, para a amostra utilizada, o tipo de base não tem influência na definição de um modelo genérico para adaptação do modelo de previsão do IRI do HDM III à região central do estado de São Paulo, confirmando a hipótese levantada no item 5.1.

Assim sendo, definiu-se a equação de regressão linear múltipla considerando variável “dummy” A apenas para o tipo de revestimento, conforme apresentado a seguir:

Do resultado do processamento apresentado na TABELA 42, definiu-se o seguinte modelo:

$$IRI_{\text{medido}} = 1,0369 IRI_{\text{HDM}} - 1,5105 A + 2,2523 \quad (30)$$

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,84

Erro padrão da estimativa = 0,61

n = 19 observações

A FIGURA 31 mostra o diagrama de dispersão dos dados de IRI previstos pelo HDM III, com período de análise de um ano, versus IRI medidos em todos os trechos e a reta de mínimos quadrados ajustada, considerando variável “dummy” para o tipo de revestimento do pavimento.

Do teste t, conclui-se que todos os coeficientes de regressão são significativos ao nível 1% e portanto, para a amostra analisada, o tipo de revestimento tem influência significativa na definição de um modelo genérico para calibração do índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III.

O coeficiente de determinação (R^2) indica uma forte relação entre as variáveis. Do resultado do teste F concluímos, ao nível de significância de 0,000018%, que a relação entre as variáveis não ocorre por acaso e portanto, a regressão será útil

para ajustar o IRI previsto pelo modelo HDM III à região central do estado de São Paulo. Entretanto, neste estudo foi considerados apenas um trecho revestido com tratamento superficial (dividido em cinco sub-trechos homogêneos) e portanto esta influência do tipo de revestimento na previsão do IRI pelo modelo HDM III pode ser restrita apenas a este trecho.

TABELA 41 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear múltipla utilizando a variável “dummy” B para o tipo de base do pavimento.

TABELA 41 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,64526803
Erro padrão	0,91003899
Observações	19

TABELA 41 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	2	28,7727599	14,3863799	17,3712684	9,772E-05
Resíduo	16	13,2507353	0,82817095		
Total	18	42,0234952			

TABELA 41 c) Teste t para os parâmetros de regressão.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	1,549841	0,89909032	1,72378788	0,10401072
B	-0,51995685	0,43282723	-1,20130346	0,24711498
IRI _{HDM}	1,01936122	0,17698558	5,75957228	2,929E-05

FIGURA 31 a) Ajuste da reta de mínimos quadrados;

FIGURA 31 b) Diagrama de resíduos;

FIGURA 31 - Análise de regressão linear múltipla aplicada aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo HDM III com período de análise de um ano, utilizando variável "dummy" A para tipo de revestimento.

TABELA 42 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear múltipla utilizando a variável “dummy” A para o tipo de revestimento do pavimento.

TABELA 42 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,83811948
Erro padrão	0,61476216
Observações	19

TABELA 42 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	2	35,9765749	17,9882874	47,596559	1,838E-07
Resíduo	16	6,0469203	0,37793252		
Total	18	42,0234952			

TABELA 42 c) Teste t para os parâmetros de regressão, e

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	2,25233795	0,61771051	3,64626782	0,0021758
A	-1,51045542	0,32040696	-4,71417793	0,00023396
IRI _{HDM}	1,0368999	0,11960095	8,66966298	1,9249E-07

TABELA 42 d) Resultados de probabilidade.

<i>Observação</i>	<i>IRI previsto</i>	<i>Resíduos</i>	<i>Resíduos padrão</i>
1	5,62226263	-0,26226263	-0,42660829
2	7,61829495	0,16170505	0,26303677
3	7,0220775	-0,6220775	-1,01189946
4	7,15168999	0,40831001	0,66417557
5	7,82567493	0,31432507	0,51129541
6	6,63147398	-0,10147398	-0,16506217
7	5,63605007	1,08394993	1,76320209
8	4,74431615	0,05568385	0,09057787
9	6,00933403	0,01466597	0,02385632
10	4,80653015	-0,01653015	-0,02688869
11	5,15907611	-0,79907611	-1,29981342
12	5,05538612	0,75461388	1,22748913
13	5,17981411	1,32018589	2,1474742
14	3,93553423	-0,78553423	-1,27778558
15	7,13955493	-0,36955493	-0,6011348
16	4,60951917	-0,06951917	-0,11308302
17	8,67416679	-0,29416679	-0,47850503
18	7,32619691	-0,40619691	-0,66073831
19	3,69704725	-0,38704725	-0,6295886

5.2.5 Modelo de regressão linear simples para todos os trechos revestidos com concreto asfáltico.

Um modelo alternativo que mostrou-se mais adequado, considera todos os trechos revestido com concreto asfáltico, na forma:

$$IRI_{medido} = a_1 IRI_{HDM} + a_0 \quad (31)$$

Do teste t, apresentado na TABELA 43, conclui-se que o parâmetro de regressão da constante não é significativo no nível 5% e portanto decidiu-se forçar a reta de mínimos quadrados pela origem.

Com a análise estatística, apresentada na FIGURA 32 e TABELA 44, definiu-se o seguinte modelo:

$$IRI_{medido} = 1,1813 IRI_{HDM} \quad (32)$$

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,72

Erro padrão da estimativa = 0,68

n = 14 observações

Do teste t, conclui-se que o coeficiente de regressão é significativo ao nível 1% e portanto é útil para a calibração do índice internacional de irregularidade (IRI) previsto pelo modelo HDM III, para os trechos revestidos com concreto asfáltico.

O coeficiente de determinação (R^2) indica que há relação entre as variáveis. Do resultado do teste F concluímos, ao nível de significância de 0,0013518%, que a relação entre as variáveis não ocorre por acaso e portanto, a regressão será útil para ajustar o IRI previsto pelo modelo HDM III à região central do estado de São Paulo, para os trechos revestidos com concreto asfáltico.

TABELA 43 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear simples aplicada aos valores de IRI medidos e previstos pelo modelo HDM III com período de análise de 1 ano, considerando todos os trechos revestidos com concreto asfáltico.

TABELA 43 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,80420763
Erro padrão	0,66308857
Observações	14

TABELA 43 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	23,917566	23,917566	54,3968679	8,5541E-06
Resíduo	12	5,27623746	0,43968645		
Total	13	29,1938034			

TABELA 43 c) Teste t para os parâmetros de regressão, e

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	0,88922645	0,66474601	1,33769355	0,2057967
IRI _{HDM}	1,00554537	0,13633731	7,37542323	8,5541E-06

TABELA 43 d) análise dos resíduos.

<i>Observação</i>	<i>IRI previsto</i>	<i>Resíduos</i>
1	6,60072414	-0,07072414
2	5,63540058	1,08459942
3	4,77063157	0,02936843
4	5,99739691	0,02660309
5	4,83096429	-0,04096429
6	5,17284971	-0,81284971
7	5,07229518	0,73770482
8	5,19296062	1,30703938
9	3,98630618	-0,83630618
10	7,09344137	-0,32344137
11	4,63991067	-0,09991067
12	8,58164851	-0,20164851
13	7,27443953	-0,35443953
14	3,75503075	-0,44503075

FIGURA 32 - Reta de mínimos quadrados ajustada aos dados de IRI medidos versus IRI previstos pelo HDM III com período de análise de um ano, considerando todos os trechos revestido com concreto asfáltico.

TABELA 44 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear simples considerando todos os trechos revestidos com concreto asfáltico.

TABELA 44 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R^2 ajustado	0,71539508
Erro padrão	0,68292487
Observações	14

TABELA 44 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	23,1307805	23,1307805	49,5957459	1,3518E-05
Resíduo	13	6,06302296	0,46638638		
Total	14	29,1938034			

TABELA 44 c) Teste t para os parâmetros de regressão, e

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	0			
IRI _{HDM}	1,18132242	0,03743414	31,5573519	1,1344E-13

TABELA 44 d) Análise dos resíduos.

<i>Observação</i>	<i>IRI previsto</i>	<i>Resíduos</i>
1	6,70991137	-0,17991137
2	5,57584184	1,14415816
3	4,55990456	0,24009544
4	6,00111792	0,02288208
5	4,6307839	0,1592161
6	5,03243353	-0,67243353
7	4,91430129	0,89569871
8	5,05605998	1,44394002
9	3,63847307	-0,48847307
10	7,28875936	-0,51875936
11	4,40633264	0,13366736
12	9,03711655	-0,65711655
13	7,5013974	-0,5813974
14	3,36676891	-0,05676891

6 - Correlação dos resultados de equipamentos tipo FWD com os da viga Benkelman

Devido à crescente utilização de equipamentos tipo FWD ("Falling Weight Deflectometer") para medida das deflexões recuperáveis de pavimentos decidiu-se incluir nesta dissertação um estudo sobre a correlação dos resultados do FWD com os da viga Benkelman. Uma correlação desse tipo é essencial para rodar o HDM III quando as medições de deflexão são feitas com o FWD, já que o HDM III usa como dado de entrada a deflexão medida com a viga Benkelman.

As medidas de deflexões recuperáveis determinadas pelos dois processos, foram fornecidos pelo DER de São Paulo. Foram definidas 32 unidades de amostragens selecionados em função dos números estruturais corrigidos, obtidos por retroanálise.

Foram designados 8 segmentos para cada uma das seguintes situações:

- Pavimentos revestidos com tratamento superficial (TS);
- Pavimentos revestidos com concreto asfáltico (CA) sobre base granular
 - a) capa < 8 cm
 - b) capa $\geq$ 8 cm
- Pavimentos com base cimentada.

Os segmentos foram selecionados buscando cobrir amplamente as faixas de resultados obtidos dentro de cada uma das categorias acima, respeitando-se as características inerentes a cada uma delas

Em cada segmento foram executados 11 ensaios, sendo o primeiro no início do trecho e os subsequentes em intervalos de 100m no sentido crescente da quilometragem ou do tráfego, no caso de pista dupla, totalizando assim 1km, coincidente com o levantamento com o FWD (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO, 1996).

A TABELA 45 apresenta a relação das unidades de amostragem selecionadas, sua localização e os resultados das medições.

TABELA 45 - Unidades de amostragem, suas localizações bem como tipo e espessura do pavimento.

Tre- cho	SP	Segmento em análise	Revestimento		Base	
			tipo	espessura (cm)	tipo	espessura (cm)
1	063	100m do ret. Atibaia - 3ª faixa	CA	5,0	G	15,0
2	081	início em frente a Colinas do Ermitage	TS	3,0	G	7,0
3	095	início km 44 - próximo a Amparo	CA	3,0	G	15,0
4	107	início 100m SP-095	TS	4	G	30,0
5	191	início marco km 11	CA	7,0	G	15,0
6	191	início marco km 26	CA	7,0	G	15,0
7	225	início marco km 24	CA	4,0	G	20,0
8	225	início marco km 39	CA	5,5	G	20,0
9	253	início marco km 126	TS	3,0	G	20,0
10	253	início marco km 172	TS	1,5	G	15,0
11	253	início marco km 174	TS	3,0	G	15,0
12	253	início marco km 197	TS	3,0	G	15,0
13	255	início marco km 02	CA	8,0	SC	15,0
14	271	início marco km 02	CA	8,0	G	10,0
15	328	início marco km 306	CA	5,0	G	15,0
16	328	início marco km 310	CA	5,0	G	15,0
17	328	início marco km 335	CA	3,0	G	15,0
18	330	início marco km 169	CA	15,0	G	20,0
19	330	início marco km 205	CA	10,0	G	20,0
20	330	início marco km 207	CA	10,0	G	20,0
21	330	início marco km 269	CA	5,0	G	20,0
22	330	início marco km 277	CA	10,0	G	20,0
23	330	início marco km 305	CA	10,0	G	15,0
24	330	início marco km 311	CA	10,0	G	15,0
25	330	início marco km 332	CA	10,0	G	15,0
26	332	início marco km 261	TS	4,0	G	15,0
27	334	início marco km 322	CA	8,0	SC	15,0
28	334	início marco km 343,400 - 3ª faixa	CA	8,0	SC	15,0
29	340	início marco km 174	CA	7,5	G	20,0
30	351	início marco km 89,5	TS	3,0	SC	15,0
31	360	início em frente ao hospital reg. de Itatiba	CA	8,0	G	12,0
32	360	início KM 127 - próximo a Amparo	CA	8,0	G	12,0

6.1 - Tratamento estatístico dos dados obtidos

Devido à grande variação dos dados obtidos com a viga Benkelman em trechos de relativamente baixa deflexão, representativos de maior percentagem da malha do DER-SP, os cálculos de regressão foram efetuados a partir da deflexão média de cada um dos segmentos, conforme o seguinte modelo:

$$D_{\text{BENK}} = K_1 + K_2 A + K_3 B + K_4 C + K_5 D_{\text{FWD}} \quad (33)$$

onde:

D_{BENK} = Deflexão média do trecho obtida com viga Benkelman, em mm x 10^{-2} ;

K_n = Coeficientes de regressão;

$A = 0$ para TS

1 para CA

$B = 0$ para capa < 8 cm

1 para capa ≥ 8 cm

$C = 0$ para base granular

1 para base cimentada

D_{FWD} = Deflexão média do trecho obtida com FWD, em mm x 10^{-2}

A TABELA 46 apresenta os dados utilizados na análise de regressão.

Os dados obtidos foram processados através da análise de regressão matricial do modelo acima no programa Microsoft Excel. A TABELA 47 apresenta os resultados do processamento.

TABELA 46 - Dados utilizados na análise de regressão.

trecho	SP	DMED _{FWD} (mm 10 ⁻²)	A	B	C	DMED _{BENK} (mm 10 ⁻²)
1	63	73,5	1	0	0	46,2
2	81	105,4	0	0	0	72,9
3	95	42,1	1	0	0	35,3
4	107	119,7	0	0	0	72,5
5	191	42,5	1	0	0	26,7
6	191	34	1	0	0	20,2
7	225	54,9	1	0	0	28,6
8	225	33,5	0	0	0	19,3
9	253	46,9	0	0	0	28,9
10	253	61,2	0	0	0	34,4
11	253	49	0	0	0	34
12	253	35,9	0	0	0	25,1
13	255	37,9	1	1	1	16,4
14	271	44,9	1	1	0	32,4
15	328	39,3	1	0	0	21
16	328	29,9	1	0	0	16,5
17	328	26,3	1	0	0	32
18	330	35,4	1	1	0	21
19	330	11,9	1	1	0	10,4
20	330	12,9	1	1	0	13,8
21	330	18,1	1	0	1	14,2
22	330	40,6	1	1	0	25,8
23	330	14,7	1	1	1	8,5
24	330	16,8	1	1	1	8,9
25	330	11,3	1	1	1	11,2
26	332	29,7	0	0	0	12
27	334	24,9	1	1	1	24,2
28	334	22,6	1	1	1	17,5
29	340	29	1	0	0	16
30	351	45,7	0	0	1	19,3
31	360	56,4	1	1	0	38,2
32	360	89,1	1	1	0	64

TABELA 47 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear múltipla utilizando a variável “dummy” para o tipo de revestimento e para o tipo de base do pavimento.

TABELA 47 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R ² ajustado	0,899137865
Erro padrão	5,324832283
Observações	32

TABELA 47 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	4	7949,0051	1987,25128	70,0875563	7,32265E-14
Resíduo	27	765,553649	28,3538388		
Total	31	8714,55875			

TABELA 47 c) Teste T para os parâmetros de regressão.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	-1,497264164	3,22068279	-0,46489029	0,64573752
DMED _{FWD}	0,634611605	0,04402458	14,414938	3,3579E-14
A	2,699289875	2,59759275	1,03915053	0,30795153
B	1,992860763	2,39898811	0,8307089	0,41342389
C	-2,564938579	2,5305631	-1,01358412	0,31977868

Do teste t, conclui-se que a interseção e os parâmetros de regressão das variáveis “dummy” não são significativos no nível 5% e portanto não são úteis para prever o valor estimado, com base na amostra utilizada.

Ficou comprovado estatisticamente ao nível de confiança de 95 % que, para esta amostra, a relação entre a deflexão medida com aparelhos do tipo FWD e com a viga Benkelman não dependem do tipo de pavimento

Assim sendo, definiu-se a equação de regressão linear simples, passando pela origem, apresentada a seguir:

Do resultado do processamento apresentado na TABELA 48, definiu se o seguinte modelo:

$$D_{\text{BENK}} = 0,64 D_{\text{FWD}} \quad (34)$$

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,87

Erro padrão da estimativa = 5,34

n = 32 observações

A FIGURA 33 apresenta a reta de mínimos quadrados ajustada aos valores de deflexão e o diagrama de resíduos.

Do teste t, conclui-se que o coeficiente de regressão é significativo ao nível 1% e portanto é útil para prever o valor estimado.

O coeficiente de determinação ($R^2=0,87$) indica uma forte relação entre as variáveis. Do resultado do teste F concluímos, ao nível de significância de $1,2285 \times 10^{-14}\%$, que a relação entre as variáveis não ocorre por acaso e portanto, a regressão será útil para estimar a D_{BENK} quando as medições forem feitas com o FWD, na região central do estado de São Paulo.

TABELA 48 - Resultados estatísticos detalhados da análise de regressão linear para os valores de deflexão medidos com a viga Benkelman e com equipamentos do tipo FWD.

TABELA 48 a) Resumo dos resultados da análise de regressão;

<i>Estatística de regressão</i>	
R^2 ajustado	0,86618316
Erro padrão	5,34318948
Observações	32

TABELA 48 b) Análise de variância;

	<i>graus de liberdade</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrados Médios</i>	<i>F</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Regressão	1	7829,51886	7829,51886	274,241973	1,2285E-16
Resíduo	31	885,039888	28,5496738		
Total	32	8714,55875			

TABELA 48 c) Teste t para os parâmetros de regressão;

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Estatística t</i>	<i>Nível de significância (α)</i>
Interseção	0			
DMED _{FWD}	0,64152817	0,01936228	33,1328791	9,1002E-26

TABELA 48 d) Análise de resíduos.

<i>Observação</i>	<i>DMED_{BENK} prevista</i>	<i>Resíduos</i>	<i>Resíduos padrão</i>
1	47,1523203	-0,9523203	-0,17823068
2	67,6170688	5,28293117	0,98872241
3	27,0083358	8,29166416	1,55181923
4	76,7909216	-4,29092163	-0,80306372
5	27,2649471	-0,56494711	-0,10573219
6	21,8119577	-1,61195769	-0,30168455
7	35,2198964	-6,61989639	-1,23894098
8	21,4911936	-2,1911936	-0,41009094
9	30,087671	-1,18767105	-0,22227755
10	39,2615238	-4,86152384	-0,90985428
11	31,4348802	2,5651198	0,48007278
12	23,0308612	2,06913879	0,38724788
13	24,3139175	-7,91391754	-1,48112238
14	28,8046147	3,59538529	0,67289122
15	25,212057	-4,21205698	-0,78830388
16	19,1816922	-2,6816922	-0,50188978
17	16,8721908	15,1278092	2,83123203
18	22,7100971	-1,71009712	-0,32005175
19	7,63418519	2,76581481	0,51763368
20	8,27571336	5,52428664	1,03389308
21	11,6116598	2,58834017	0,48441856
22	26,0460436	-0,24604359	-0,04604808
23	9,43046406	-0,93046406	-0,1741402
24	10,7776732	-1,87767321	-0,3514143
25	7,24926829	3,95073171	0,73939577
26	19,0533866	-7,05338657	-1,32007046
27	15,9740514	8,22594863	1,53952029
28	14,4985366	3,00146342	0,56173629
29	18,6043169	-2,60431685	-0,48740867
30	29,3178372	-10,0178372	-1,87487966
31	36,1821886	2,01781136	0,37764174
32	57,1601597	6,83984029	1,28010439

FIGURA 33 a) Diagrama de dispersão dos dados de deflexão e a reta de mínimos quadrados ajustada;

FIGURA 33 b) Diagrama de resíduos da variável D_{FWD} .

FIGURA 33 - Análise de regressão linear simples para os valores de deflexão medidos com a viga Benkelman e com equipamentos do tipo FWD.

7 - Conclusões

7.1- Levantamentos de campo

Os resultados dos levantamentos do índice de gravidade global (IGG, DNER-PRO 08-78) são apresentados em termos de frequência dos defeitos na superfície do pavimento, o que torna difícil sua utilização para coleta e entrada de dados no modelo HDM III e outros, restringindo o uso dos dados apenas ao cálculo do IGG.

O método de levantamento da condição da superfície de pavimentos da especificação de serviço DNER-ES 128/83 é mais apropriado para avaliação de pavimentos visando a alimentação de bancos de dados de sistemas de gerência de pavimentos (SGP), pois tem como resultado as percentagens de área do pavimento que apresentam os diversos tipos de defeitos, possibilitando sua aplicação em diversos modelos de SGP.

7.2 - Simulação com o modelo HDM III.

O índice de irregularidade internacional (IRI) previsto pelo modelo HDM III é pouco afetado pela variação dos fatores de veículos ("ESAL Factors") ao longo do período de análise. Houve uma diferença de 4% entre o IRI previsto pelo HDM III calculado com os fatores de veículos de 1977 e com os fatores de veículos médios do período de análise, no trecho de Cabaceiras com 10% de cimento na base. Este trecho foi considerado um caso crítico por ter apresentado um dos maiores valores de IRI previsto pelo modelo HDM III, de 4,7m/km, e uma variação de

aproximadamente 180% nos fatores de veículos dos caminhões pesados e dos caminhões articulados, durante um período de análise de 17 anos.

7.3 - Comparação dos resultados de campo com os valores previstos pelo modelo HDM III

Verificou-se uma diferença apreciável entre os valores medidos e previstos pelo modelo HDM III para os parâmetros descritivos da condição da rodovia.

O período de análise, para efeito de previsão do modelo HDM III, é o fator preponderante na relação entre a previsão do modelo HDM III e as medidas de campo. Isto se deve a um acúmulo de erro ano a ano, já que o modelo HDM III prevê um incremento anual para os diversos parâmetros descritivos da condição do pavimento. Nos trechos estudados na presente dissertação o incremento anual médio no IRI foi de aproximadamente 30% enquanto a previsão do modelo HDM III foi de aproximadamente 4%.

Em especial na previsão do incremento anual no IRI, esta diferença se deve em grande parte, ao fato do modelo considerar apenas execução de remendos e não de tapa buracos que, na realidade, é feito em grande parte da malha estadual, ou seja o modelo não prevê a perda de qualidade do pavimento que ocorre nas operações de tapa buracos.

Foram definidos os seguintes “fatores de deterioração”, através de análise de regressão, para o modelo de previsão do índice de irregularidade internacional (IRI) do HDM III:

- “Fator de deterioração” para o trecho de Dois Córregos;
- “Fator de deterioração” para o trecho da rodovia Washington Luiz;

- "Fator de deterioração" genérico, para ser aplicado a todos os tipos de pavimentos. Porém este modelo deve ser melhorado com a avaliação de mais trechos revestidos com tratamento superficial. Ficou comprovado estatisticamente que, para a amostra utilizada, o tipo de revestimento tem influência na definição do modelo. Entretanto, neste estudo foi considerado apenas um trecho revestido com tratamento superficial e portanto esta influência do tipo de revestimento na previsão do IRI pelo modelo HDM III pode ser restrita apenas este trecho;
- "Fator de deterioração" para os trechos revestidos com concreto asfáltico. Este modelo mostrou-se mais adequado que o anterior;
- "Fator de deterioração" para o trecho de Cabaceiras para adaptação do IRI previsto pelo HDM III, com período de análise de 17 anos. Neste caso o ajuste não deu bons resultados (item 6.2.3).

Os "fatores de deterioração" definidos pelos modelos formulados na presente dissertação estão apresentados, de forma resumida, na TABELA 49.

Estes modelos poderão ser verificados e melhorados com mais pontos ou futuras avaliações destes mesmos trechos bem como de trechos que possam estar disponíveis. Uma verificação possível é a comparação de novas medidas do índice de irregularidade (IRI) com a previsão do modelo HDM III já corrigida pelas relações definidas nesta dissertação.

A resselagem com lama asfáltica teve, na realidade, um desempenho pior que o previsto pelo modelo HDM III, numa análise a longo prazo dos trechos de Cabaceiras, indicando a necessidade de uma adaptação do modelo de previsão de trincas em pavimentos rejuvenescidos com aplicação de lama asfáltica.

Não foi possível deduzir nenhuma calibração para os modelos de previsão de trincas, panelas, desgaste e afundamento médio de trilhas de rodas do HDM III. Na ausência de um modelo melhor, é recomendável que sejam usados os modelos como se encontram no HDM III, até que pesquisas adicionais sejam completadas. Mesmo porque, o índice de irregularidade internacional (IRI) previsto

pelo modelo HDM III é pouco afetado pela variação na área de trincas e a previsão do acréscimo anual na irregularidade, em termos de índice de irregularidade internacional (IRI), é uma das principais variáveis utilizadas na análise econômica, objetivo principal do modelo HDM III.

Portanto quanto à comparação das medidas de campo com os valores previstos pelo modelo HDM III, os principais resultados desta dissertação foram:

- a) Confirmação da conveniência de adaptação dos modelos de deterioração do HDM III;
- b) Definição dos parâmetros de correção ou “fatores de deterioração” que podem ser usados para uma aplicação mais precisa do modelo HDM III à região Centro do estado de São Paulo, levando em consideração a limitação dos dados disponíveis, utilizados nesta dissertação. Neste sentido, um fator de deterioração de 1,265 é recomendado para corrigir os valores de IRI previstos pelo modelo HDM III, para aplicações na região estudada nesta dissertação.

TABELA 49 - Fatores de deterioração definidos na presente dissertação.

TRECHO	PERÍODO DE ANÁLISE (anos)	FATOR DE DETERIORAÇÃO	EQUAÇÃO
Dois Córregos	2	1,518	$IRI_{medido} = 1,518 IRI_{HDM}$ eq. 21
Cabaceiras	17	1,809	$IRI_{medido} = 1,809 IRI_{HDM}$ eq. 22
Washington Luiz	1	1,104	$IRI_{medido} = 1,104 IRI_{HDM}$ eq. 25
Genérico	1	1,265	$IRI_{medido} = 1,265 IRI_{HDM}$ eq. 27
Pavimentos revestidos com concreto asfáltico	1	1,181	$IRI_{medido} = 1,181 IRI_{HDM}$ eq. 32

7.4 - Correlação dos resultados de equipamentos tipo FWD com os da viga Benkelman

Foi definido um modelo, apresentado na eq. 34, para determinar o valor aproximado da deflexão recuperável do pavimento medido com a viga Benkelman a partir de medidas do FWD, pois é crescente o uso de equipamentos tipo FWD ("Falling Weight Deflectometer") para medida das deflexões recuperáveis de pavimentos e o modelo HDM III utiliza como entrada de dados as deflexões recuperáveis medidas com a viga Benkelman.

O tipo de pavimento não tem influência significativa na correlação entre os resultados da viga Benkelman e os de equipamentos tipo FWD, para a amostra avaliada. O modelo de regressão linear simples, apresentado no capítulo 6, teve como base de dados as medidas de deflexão dos tipos de pavimentos mais comuns no estado de São Paulo.

Referências bibliográficas

BRASIL. Ministério dos Transportes. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes [GEIPOT] (1981). *Pesquisa sobre o Interrelacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias, Relatório Final*. Brasília, D.F..

CAREY, JR., W.N.; IRICK, P.E. (1960) - *The Pavement Serviceability - Performance Concept*. HRB Bulletin 250.

COSTA NETO, P.L.O. (1977). *Estatística*. São Paulo, Edgard Blucher.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO (1976). *Trecho Experimental na SP 255, entre os km 53 + 850 m e km 55 + 450 m*. DER-SP, Grupo de Trabalho GT. 40. (Relatório Técnico, 1).

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO (1996). *Cálculo da correlação entre as deflexões recuperáveis dos pavimentos medidas por intermédio de equipamento tipo FWD e aquelas obtidas com o uso de viga Benkelman para o banco de dados do DER/SP*. DER-SP, Grupo de Gerência de Pavimentos. (Relatório de Trabalho, 3).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1978). *Método de Ensaio DNER-ME 24/78 - Determinação das Deflexões no Pavimento pela Viga Benkelman*.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1978).
Procedimento DNER-PRO 08/94 - *Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos.*

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1983).
Especificação de Serviço DNER-ES 128/83 - *Levantamento da Condição de Superfície de Sgmentos Testemunha de Rodovias de Pavimento Flexível para uso em Gerência de Pavimentos a Nível de Rede.*

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1983). *Guia de Gerência de Pavimentos.* Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1985).
Procedimento DNER-PRO 159/85 - *Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos.*

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1985).
Procedimento DNER-PRO 164/85 - *Calibração e Controle de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta.*

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1986).
Especificação de Serviço DNER-ES 173/86 - *Método de Nível e Mira pra Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta.*

DER-SP/EESC-USP (1991). *Programa de Pesquisa Integrada DER-SP/EESC-USP.* São Carlos, Departamento de Transportes da EESC-USP. (Relatório Técnico Provisório, 6).

DER-SP/EESC-USP (1991). *Programa de Pesquisa Integrada DER-SP/EESC-USP.* São Carlos, Departamento de Transportes da EESC-USP. (Relatório Técnico Provisório, 7).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1994). *Using Pavement Performance Data to Develop Mechanistic-Empirical Concepts for Deteriorated and Rehabilitated Pavements*. McLean, Virginia, Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center of FHA. (Publication, FHWA-RD-93-162).

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWISKI, J. (1994). *Modern Pavement Management*. Malabar, Flórida, Krieger Publishing Co.

HIGHWAY RESEARCH BOARD [HRB], (1962). *The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research*. HRB Special Report 61E - Washington, D.C..

HUDSON, W. R.; HAAS, R.; DARYL PEDIGO, R. (1979). *Pavement Management System Development*. Report 215. National Cooperative Highway Reserch Program. TRB. National Reserch Council, Whashington, D.C..

LOBO CARNEIRO (1966). *Viga Benkelman, Instrumento Auxiliar do Engenheiro de Conservação*. Rio de Janeiro, Secretaria de Comunicações e Transportes, Deprtamento de Estradas de Rodagem. (Cadernos de Engenharia Rodoviária, v.2)

PATERSON, W.D.O (1987). *The Highway Design and Maintenance Standards Model*. Baltimore / London, The World Bank, The Johns Hopkins University Press. (Road Deterioration and Maintenance Effects, Models for Planning and Management)

PATERSON, W.D.O; SCULLION, T. (1990). *Information Systems for Road Management: Draft Guidelines on System Design and Data Issues*. Washington, D.C., The World Bank. (Report, INU 77). (Technical Paper of Policy Planning and Research Staff, Infrastrusture and Urban Development Department.)

PEREIRA,A.M. (1972). *Um Método de Avaliação de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos*. 1ª Reunião das Organizações Rodoviárias e International Road Federation, 2, Brasília,1972.

- QUEIROZ, C. A. V.; (1984). *Modelos de Previsão de Desempenho Para a Gerência de Pavimentos no Brasil*. Brasília, D.F., GEIPOT.
- QUEIROZ, C. A. V.; HUDSON, W. R.; HAAS, R. (1992). *Pavement Management and Performance*. Washington, D.C., TRB, TRR, 1344.
- QUEIROZ, C.A.V. (1981a). *Performance Prediction Models for Pavement Management in Brasil*, Austin. Ph.D. Dissertation. The University of Texas at Austin, U.S.A..
- QUEIROZ, C.A.V. (1981b). *A Procedure For Obtaining a Stable Roughness Scale From Road And Level Profiles*. Brasília, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes [GEIPOT]. (Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Maintenance and Utilization - Working Documents, 22).
- QUEIROZ, C.A.V. (1994). *Technical and Economic Issues in Road Deterioration and Maintenance*. Seminário PROVIAL. Fortaleza, 1994.
- QUEIROZ, C.A.V.; BIRMAN, S. (1984). *Estado da arte de Gerência de Pavimentos no Brasil*. In International Road Federation, World Meeting, 10, Rio de Janeiro, 1984. *Anais*. p.257-265.
- SAYERS, M.W.; GILLESPIE, T.D.; PATERSON, W.D.O. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. Washington, D.C., U.S.A., The World Bank (Technical Paper, 46).
- SAYERS, M.W.; GILLESPIE, T.D.; QUEIROZ, C.A.V. (1986). *The International Road Roughness Experiment [IRRE] Establishing Correlation and Calibration Standard for Measurements*. Washington, D.C., The World Bank (Technical Paper, 45).

THE WORLD BANK (1985). *Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Mainenance and Utilization - Brazil [PICR], Road Deterioration Study: Listing of Paved Data Files*. Washington, D.C., The World Bank, Transportation Department,.

VISSER, A.; QUEIROZ, C.A.V.; MACHADO, I. (1978). *A Methodology for Pavement Condition Surveys on the Paved Sections of the Pavement Performance and Maintenance Estudy*. Brasília, D.F., GEIPOT, UNDP, IBRD (Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Mainenance and Utilization - Brazil [PICR] - Working Documents, 5 [Project Technical Memorandums, 1977]).

WATANATADA, T.; HARRAL, C.G.; PATERSON, W.D.O.; DHARESHWAR, A.M.; BHANDARI, A.; TSUNOKAWA, K. (1987). *The Highway Design and Maintenance Standards Model*. Baltimore / London, The World Bank, The Johns Hopkins University Press. (Description of the HDM-III Model, v.1)

Bibliografia consultada

AASHTO (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C..

ARANOVICH, L.A.S. (1985). *Desempenho de Pavimentos de Baixo Custo no Estado do Paraná*. Rio de Janeiro. Tese (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ARCHONDO-CALLAO, R. (1995). *HDM Manager Version 3.0: User-friendly Shell Environment for the Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM)*. Washington, D.C., U.S.A., The World Bank.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G., HUNTER, J.S.(1978). *Statistics For Experimenters*.

CORRÊA, F.C. (1976). *Comportamento de Trechos Experimentais com Bases de Solo Arenoso Fino*. São Carlos. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DER-SP (1978 a 1995). *Estatística do Trânsito*. São Paulo, Diretoria de Planejamento do DER de São Paulo.

QUEIROZ, C. A. V.; HUDSON, W. R.; HAAS, R. (1992). *Pavement Management and Performance*. Washington, D.C., TRB, TRR, 1344.

QUEIROZ, C.A.V.; GUILLESPIE, T.D.; PATERSON W.D.O.; AUTRET, P.; REICHERT, J. (1984). *Índice Internacional de Irregularidade para Calibração e Correlação de Sistemas de Medição: Resultados de Uma Pesquisa Internacional*. In International Road Federation, World Meeting, 10, Rio de Janeiro, 1984. *Anais*. p.339-352.

QUEIROZ, C.A.V.; HUDSON, R.W.; HAAS, R. (1984). *Método para Medir Irregularidade de Pavimentos de Uso Universal*. In International Road Federation, World Meeting, 10, Rio de Janeiro, 1984. *Anais*. p.303-317.

QUEIROZ, C.A.V.; HUDSON, W.R.; VISSER, A.T.; BUTLER, B.C.(1984). *A Stable, Consistent, and Transferable Roughness Scale for Worldwide Standardization*. TRB, TRR no 997

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (1987). *Techniques for Pavement Rehabilitation, A Training Course*. ERES Consultants, INC., Federal Highway Administration, National Highway Institute (Publication, FHWA-HI-90-O22).

VISSER, A.T.; QUEIROZ, C.A.V. (1979). *Paved and Unpaved Road Performance Parameters*. GEIPOT, Brasília. (Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Maintenance and Utilization - Working Documents, 15).

VISSER, A.T.; QUEIROZ, C.A.V. (1979). *Traffic Flow Information*. Brasília, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Maintenance and Utilization - Working Documents, 13).

APÊNDICE 1

HDM MANAGER, EXEMPLO - TRECHO DE CABACEIRAS
COM 10% DE CIMENTO NA BASE

ANALYSIS CONTROL

Description Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Run Date	Day 21	Month 09	Year 77
Discount Rate (%)	12.0		
Analysis Period (years)	25		
Calendar Year of Initial Year	1977		
Input Currency Name	Dollars		
Output Currency Name	Dollars		
Output Currency Conversion Multiplier	1.0000000		

ROAD CHARACTERISTICS

Description Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Road Class (Paved/Unpaved) P

GEOMETRY

Road Length (km)	1.0	Road Width (m)	7.0
One Shoulder Width (m)	2.5	Effective Number of Lanes	2.0
Rise & Fall (m/km)	0.3	Curvature (deg/km)	0.0
Superelevation (%)	0.0		

ENVIRONMENT

Altitude (m)	500	Rainfall (m/month)	0.1135
--------------	-----	--------------------	--------

SURFACE

Surface Type 2
Thickness: New Surfacing Layers (mm) 130 Old Surfacing Layers (mm) 0

BASE/SUBGRADE

Base Type	2	Subgrade CBR(%)	20
If Cement Stabilized Base:	Thickness of Base Layers (mm)		150
	Resilient Modulus of Soil Cement (GPa)		26

STRENGTH Structural Number 3.72 Benkelman Beam Deflection (mm) .

CONDITION

Roughness (IRI)	2.9	Construction Fault Code	0
Area All Cracks (%)	1.2	Wide Cracks (%)	0.0
		Potholes (%)	0.000
Ravelled (%)	0.0	Rut Depth (mm)	2
		Rut Depth St. Deviation (mm)	1

HISTORY

Surfacing Age (y) 7 Construction Age (y) 15
For Old Surfacing Layers, Previous Area of Wide Cracks (%) 0

DETERIORATION FACTORS

Cracking Initiation	1.00	Roughness-age Term	1.00
Ravelling Initiation	1.00	Cracking Progression	1.00
Pothole Progression	1.00	Rut Depth Progression	1.00
		Roughness Progression	1.00

TRAFFIC

	Car Pickup	Bus	Light Truck	Medium Truck	Heavy Truck	Articulated Truck
Average Daily Traffic	1499	0	30	0	315	257
Traffic Growth (%)	0.7	0.0	6.6	0.0	1.6	4.6
						16.3

Change Traffic Growth in Year

New Traffic Growth (%)

CONGESTION

Include Congestion Effects (Y/N) N

Road Type

Road Use

Roadside Friction 1.00

REQUIRED VEHICLE CHARACTERISTICS

Description Cabaceiras trecho 10% cimento

BASIC CHARACTERISTICS	Car Pickup		Bus	Light Truck	Medium Truck	Heavy Truck	Artic. Truck
Gross Vehicle Weight (t)	1.200	0.000	10.900	0.000	11.300	20.800	27.000
ESAL Factor per Veh.(E4)	0.000	0.000	0.500	0.000	0.565	1.132	3.493
Number of Axles	2	0	2	0	2	3	5
Number of Tires	4	0	6	0	6	10	18
Number of Passengers	3.00	0.00	40.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VEHICLE UTILIZATION DATA

Service Life (yr)	10.0	0.0	8.0	0.0	10.0	10.0	10.0
Hours Driven per Year	450	0	2000	0	2100	2000	1900
Km Driven per Year	18000	0	80000	0	65000	67500	80000
Depreciation Code	2	2	2	2	2	2	2
Utilization Code	1	3	3	3	3	3	3
Annual Interest Rate (%)	12.00	0.00	12.00	0.00	12.00	12.00	12.00

ECONOMIC UNIT COSTS

New Vehicle Price (C)	10000	0	55000	0	30000	60000	80000
New Tire Price (C)	30.0	0.0	275.0	0.0	275.0	275.0	375.0
Maintenance Labor (C/hr)	2.20	0.00	2.20	0.00	2.20	2.20	2.20
Crew Cost (C/crew-hr)	0.00	0.00	3.00	0.00	3.00	3.00	3.00
Passenger Time (C/pa-hr)	1.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cargo Time (C/veh-hr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.20
Gas/Petrol Price (C/lt)					0.49		
Diesel Price (C/lt)					0.31		
Lubricants Price (C/lt)					0.23		

Note: C is the input currency defined in the Analysis Control Data

DEFINITION OF STRATEGIES =====

Description Cabaceiras

STRATEGY 1: manutencao de rotina 90%
 Start in Year: 1977 Policy: remendo em 90 % da área de pane (Pav:PA_90)
 ()
 ()

STRATEGY 2: Lama asfáltica 100%,8anos,rem90
 Start in Year: 1977 Policy: remendo em 90 % da área de pane (Pav:PA_90)
 1985 Lama asfáltica, 100%; remndo 90% (Pav:ST100)
 ()
 ()

STRATEGY 3: lama Asfáltica 100%,R; rem 90%
 Start in Year: 1977 Policy: remendo em 90 % da área de pane (Pav:PA_90)
 1978 Lama asfáltica, 100%; remndo 90% (Pav:ST100)
 ()
 ()

STRATEGY 4: lama asfáltica 100%,S; rem 90%
 Start in Year: 1977 Policy: remendo 100% da área de panelas (Pav:REM100)
 1978 Lama asfáltica 100%; remendo 90% (Pav:SST100)
 ()
 ()

STRATEGY 5: lama asfáltica 100%,8anos, rem90
 Start in Year: 1977 Policy: remendo em 90 % da área de pane (Pav:PA_90)
 1985 Lama asfáltica 100%; remendo 90% (Pav:SST100)
 ()
 ()

PAVED MAINTENANCE POLICY

Description remendo em 90 % da área de pane

Yes/No

Y ROUTINE MAINTENANCE

Features: Cost factor 1.00

Y PATCHING (Scheduled or Responsive) R

Scheduled: Area to be patched (m2/km/y) 0.0

Responsive: Percent of pothole area to be patched 90.0

Maximum applicable area (m2/km/y)

Features: Cost factor 1.00

Last applicable year

Maximum applicable roughness (IRI)

N RESEALING (Scheduled or Responsive) R

Scheduled: Resealing interval (y) 0

Responsive: Maximum allowable total damaged area (%) 0.0

Minimum applicable resealing interval (y)

Maximum applicable resealing interval (y)

Features: Cost factor 1.00

Resealing type 0

Resealing strength coefficient 0.00

Resealing thickness (mm) 0.0

Last applicable year

Maximum applicable roughness (IRI)

N OVERLAY (Scheduled or Responsive) R

Scheduled: Overlay interval (y) 0

Responsive: Maximum allowable roughness (IRI) 0.0

Minimum applicable overlay interval (y)

Maximum applicable overlay interval (y)

Features: Cost factor 1.00

Overlay type 0

Overlay strength coefficient 0.00

Overlay thickness (mm) 0.0

Last applicable year

Roughness after overlay (IRI)

N RECONSTRUCTION (Scheduled or Responsive) R

Scheduled: Reconstruction Interval (IRI) 0

Responsive: Maximum allowable roughness (IRI) 0.0

Minimum applicable reconst. interval (y)

Maximum applicable reconst. interval (y)

Features: Cost factor 1.00

New structural number 0.00

Surface type 0

Total new surfacing layer thickness (mm) 0.0

Base type 0

If cement stabilized base:

Base layer thickness (mm) 0.0

Resilient modulus of soil cement (GPA) 0

Construction fault code 0

Last applicable year

Roughness after reconstruction (IRI)

PAVED MAINTENANCE POLICY

Description Lama asfáltica, 100%; remendo 90%

Yes/No

Y	ROUTINE MAINTENANCE		
	Features:	Cost factor	1.00
Y	PATCHING	(Scheduled or Responsive) R	
	Scheduled:	Area to be patched (m2/km/y)	0.0
	Responsive:	Percent of pothole area to be patched	90.0
		Maximum applicable area (m2/km/y)	
	Features:	Cost factor	1.00
		Last applicable year	
		Maximum applicable roughness (IRI)	.
Y	RESEALING	(Scheduled or Responsive) R	
	Scheduled:	Resealing interval (y)	0
	Responsive:	Maximum allowable total damaged area (%)	99.0
		Minimum applicable resealing interval (y)	8
		Maximum applicable resealing interval (y)	
	Features:	Cost factor	1.00
		Resealing type	2
		Resealing strength coefficient	0.10
		Resealing thickness (mm)	6.0
		Last applicable year	
		Maximum applicable roughness (IRI)	.
N	OVERLAY	(Scheduled or Responsive) R	
	Scheduled:	Overlay interval (y)	0
	Responsive:	Maximum allowable roughness (IRI)	0.0
		Minimum applicable overlay interval (y)	
		Maximum applicable overlay interval (y)	
	Features:	Cost factor	1.00
		Overlay type	0
		Overlay strength coefficient	0.00
		Overlay thickness (mm)	0.0
		Last applicable year	
		Roughness after overlay (IRI)	.
N	RECONSTRUCTION	(Scheduled or Responsive) R	
	Scheduled:	Reconstruction Interval (IRI)	0
	Responsive:	Maximum allowable roughness (IRI)	0.0
		Minimum applicable reconst. interval (y)	
		Maximum applicable reconst. interval (y)	
	Features:	Cost factor	1.00
		New structural number	0.00
		Surface type	0
		Total new surfacing layer thickness (mm)	0.0
		Base type	0
		If cement stabilized base:	
		Base layer thickness (mm)	0.0
		Resilient modulus of soil cement (GPA)	0
		Construction fault code	0
		Last applicable year	
		Roughness after reconstruction (IRI)	.

HDM Manager - Deterioration

Run Name : Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Run Date : 21/09/77

Road Name: Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

First Strategy: manutencao de rotina 90%

Yr	Calendar Year	Operation Applied	Roughness (IRI) m/km	All Crack Area %	Wide Crack Area %	Raveled Area %	Pothole Area %	Rut Depth mm	Modified Structure No	Surface Code	Gravel Thickness mm	2-Way ADT (vpd)	Annual 2-Way ESA (000)
1	1977		3.0	5.5	0.0	0.0	0.0	2.0	5.4	AC	0.0	2144	230.6
2	1978		3.1	14.6	0.0	0.0	0.0	2.1	5.4	AC	0.0	2180	245.8
3	1979		3.2	30.4	0.0	0.0	0.0	2.2	5.4	AC	0.0	2218	262.7
4	1980		3.4	54.1	0.0	0.0	0.0	2.3	5.4	AC	0.0	2259	281.6
5	1981		3.6	75.3	0.0	0.0	0.0	2.4	5.4	AC	0.0	2302	302.8
6	1982		3.7	88.9	0.0	0.0	0.0	2.5	5.4	AC	0.0	2347	326.5
7	1983		3.9	96.3	0.0	0.0	0.0	2.6	5.4	AC	0.0	2396	353.2
8	1984		4.0	99.4	0.0	0.0	0.0	2.6	5.4	AC	0.0	2448	383.4
9	1985		4.1	100.0	0.0	0.0	0.0	2.6	5.4	AC	0.0	2504	417.5
10	1986		4.2	100.0	0.0	0.0	0.0	2.7	5.4	AC	0.0	2565	456.1
11	1987		4.3	100.0	0.0	0.0	0.0	2.7	5.4	AC	0.0	2630	500.0
12	1988		4.4	100.0	0.0	0.0	0.0	2.7	5.4	AC	0.0	2702	549.9
13	1989		4.5	100.0	0.0	0.0	0.0	2.7	5.4	AC	0.0	2779	606.9
14	1990		4.6	100.0	0.0	0.0	0.0	2.8	5.4	AC	0.0	2864	672.0
15	1991		4.8	100.0	0.0	0.0	0.0	2.8	5.4	AC	0.0	2958	746.4
16	1992		4.9	100.0	0.0	0.0	0.0	2.8	5.4	AC	0.0	3060	831.7
17	1993		5.0	100.0	0.0	0.0	0.0	2.9	5.4	AC	0.0	3174	929.5
18	1994		5.2	100.0	0.0	0.0	0.0	2.9	5.4	AC	0.0	3301	1041.8
19	1995		5.3	100.0	0.0	0.0	0.0	2.9	5.4	AC	0.0	3442	1171.0
20	1996		5.5	100.0	0.0	0.0	0.0	2.9	5.4	AC	0.0	3600	1319.8
21	1997		5.6	100.0	0.0	0.0	0.0	2.9	5.4	AC	0.0	3776	1491.2
22	1998		5.8	100.0	0.0	0.0	0.0	3.0	5.4	AC	0.0	3975	1688.8
23	1999		6.0	100.0	0.0	0.0	0.0	3.0	5.4	AC	0.0	4199	1917.0
24	2000		6.2	100.0	0.0	0.0	0.0	3.0	5.4	AC	0.0	4453	2180.5
25	2001		6.4	100.0	0.0	0.0	0.0	3.0	5.4	AC	0.0	4740	2485.1

HDM Manager - Deterioration

Run Name : Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Run Date : 21/09/77

Road Name: Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Second Strategy: Lama asfáltica 100%,8anos,rem90

Yr	Calendar Year	Operation Applied	Roughness (IRI) m/km	All Crack Area %	Wide Crack Area %	Raveled Area %	Pothole Area %	Rut Depth mm	Modified Structure No	Surface Code	Gravel Thickness mm	2-Way ADT (vpd)	Annual 2-Way ESA (000)
1	1977		3.0	5.5	0.0	0.0	0.0	2.0	5.4	AC	0.0	2144	230.6
2	1978		3.1	14.6	0.0	0.0	0.0	2.1	5.4	AC	0.0	2180	245.8
3	1979		3.2	30.4	0.0	0.0	0.0	2.2	5.4	AC	0.0	2218	262.7
4	1980		3.4	54.1	0.0	0.0	0.0	2.3	5.4	AC	0.0	2259	281.6
5	1981		3.6	75.3	0.0	0.0	0.0	2.4	5.4	AC	0.0	2302	302.8
6	1982		3.7	88.9	0.0	0.0	0.0	2.5	5.4	AC	0.0	2347	326.5
7	1983		3.9	96.3	0.0	0.0	0.0	2.6	5.4	AC	0.0	2396	353.2
8	1984		4.0	99.4	0.0	0.0	0.0	2.6	5.4	AC	0.0	2448	383.4
9	1985	RESE	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	4.8	OVSA	0.0	2504	417.5
10	1986		3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	4.8	OVSA	0.0	2565	456.1
11	1987		3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	4.8	OVSA	0.0	2630	500.0
12	1988		4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	4.8	OVSA	0.0	2702	549.9
13	1989		4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	4.8	OVSA	0.0	2779	606.9
14	1990		4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	4.8	OVSA	0.0	2864	672.0
15	1991		4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	4.8	OVSA	0.0	2958	746.4
16	1992		4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	4.8	OVSA	0.0	3060	831.7
17	1993		4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	4.8	OVSA	0.0	3174	929.5
18	1994		4.7	0.3	0.0	0.0	0.0	2.9	4.8	OVSA	0.0	3301	1041.8
19	1995		4.8	3.2	0.0	0.0	0.0	2.9	4.8	OVSA	0.0	3442	1171.0
20	1996		5.0	10.1	0.0	0.0	0.0	3.1	4.8	OVSA	0.0	3600	1319.8
21	1997		5.2	22.9	0.0	0.0	0.0	3.3	4.8	OVSA	0.0	3776	1491.2
22	1998		5.5	43.3	0.0	0.0	0.0	3.7	4.8	OVSA	0.0	3975	1688.8
23	1999		5.8	67.5	0.0	0.0	0.0	4.2	4.8	OVSA	0.0	4199	1917.0
24	2000		6.0	84.1	0.0	0.0	0.0	4.6	4.8	OVSA	0.0	4453	2180.5
25	2001		6.3	93.8	9.1	0.0	0.0	5.1	4.8	OVSA	0.0	4740	2485.1

HDM Manager - Deterioration

Run Name : Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Run Date : 21/09/77

Road Name: Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

		First Strategy	Second Strategy	Third Strategy	Fourth Strategy	Fifth Strategy
Yr	Calendar Year	Rough ness (IRI) m/km	Rough ness (IRI) m/km	Rough ness (IRI) m/km	Rough ness (IRI) m/km	Rough ness (IRI) m/km
1	1977	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
2	1978	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
3	1979	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
4	1980	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
5	1981	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
6	1982	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
7	1983	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
8	1984	4.0	4.0	3.6	3.6	4.0
9	1985	4.1	3.7	3.7	3.7	3.7
10	1986	4.2	3.8	3.8	3.8	3.8
11	1987	4.3	3.9	3.9	3.9	3.9
12	1988	4.4	4.0	4.0	4.0	4.0
13	1989	4.5	4.1	4.1	4.1	4.1
14	1990	4.6	4.2	4.2	4.2	4.2
15	1991	4.8	4.3	4.3	4.3	4.3
16	1992	4.9	4.4	4.4	4.4	4.4
17	1993	5.0	4.5	4.5	4.5	4.5
18	1994	5.2	4.7	4.7	4.7	4.7
19	1995	5.3	4.8	4.8	4.8	4.8
20	1996	5.5	5.0	5.0	5.0	5.0
21	1997	5.6	5.2	5.3	5.3	5.2
22	1998	5.8	5.5	5.6	5.6	5.5
23	1999	6.0	5.8	5.8	5.1	5.8
24	2000	6.2	6.0	6.1	5.3	5.3
25	2001	6.4	6.3	6.4	5.5	5.5

First Strategy: manutencao de rotina 90%

Second Strategy: Lama asfáltica 100%,8anos,rem90

Third Strategy: lama Asfáltica 100%,R; rem 90%

Fourth Strategy: lama asfáltica 100%,S; rem 90%

Fifth Strategy: lama asfáltica 100%,8anos, rem90

HDM Manager - Economic Analysis

Run Name : Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Run Date : 21/09/77

Road Name: Cabaceiras trecho 10% cim. Arar.

Present Values and Internal Rate of Return

	First Strategy	Second Strategy	Third Strategy	Fourth Strategy	Fifth Strategy
=====					
-Present Values at 12.0% Discount Rate (million Dollars)					
Society	2.63	2.61	2.61	2.61	2.61
Agency	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Capital	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Recurrent	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Road Users	2.62	2.59	2.59	2.59	2.59
Vehicle Operation	2.25	2.23	2.23	2.22	2.23
Travel Time	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36
Exogenous Cst-Bnf	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Net Present Value (Net Benefits)	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
-Rate of Return (%)	NA	43.2	39.2 (MANY)	41.3	43.3

First Strategy: manutencao de rotina 90%

Second Strategy: Lama asfáltica 100%,8anos,rem90

Third Strategy: lama Asfáltica 100%,R; rem 90%

Fourth Strategy: lama asfáltica 100%,S; rem 90%

Fifth Strategy: lama asfáltica 100%,8anos, rem90

APÊNDICE 2

ANÁLISE DE REGRESSÃO

Análise de regressão

O método adotado para a calibração do modelo HDM III é o de análise de regressão.

A análise de correlação pode ser genericamente definida como o estudo da existência de relações e do grau de relacionamento entre variáveis.

A análise de regressão estuda a função que exprime o relacionamento entre as variáveis. Seu produto final é a equação de regressão, ou seja, uma função que justifica, em média, a variação da variável dependente, com as variáveis independentes.

O procedimento geral usado na determinação de modelos de regressão linear múltipla, adotando o método dos mínimos quadrados, segue o seguinte modelo estatístico:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (1)$$

onde:

Y é a resposta calculada ou variável dependente;

$X_1, X_2, \dots, X_n$ são as variáveis independentes ou explicativas;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ são os coeficientes de regressão ou parâmetros a serem estimados.

Em geral o conjunto de variáveis independentes pode ser constituído das variáveis independentes originais e variáveis independentes “transgeradas”, isto é, variáveis independentes obtidas por transformação ou combinação de outras variáveis independentes (QUEIROZ, 1981).

O método dos mínimos quadrados consiste em minimizar a variação residual ($\sum_{i=1}^n d_i^2$) em torno da linha estimativa, dado por:

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{iest})^2$$

Pode ser demonstrado que os coeficientes de regressão que minimizam $\sum_{i=1}^n d_i^2$ são dados pela resolução de um sistema de equações, chamadas equações normais.

Nesta dissertação a análise de regressão e os testes de hipótese foram feitos através do programa Microsoft Excel.

1 - Coeficiente de determinação da reta (R^2)

O coeficiente de determinação da reta (R^2) indica a precisão com que a equação resultante da análise de regressão descreve a relação entre as variáveis. Ou seja, o R^2 indica quanto da variação total de y, em %/100, é explicada pela linha de regressão. Seu valor varia entre 0 e 1. Se for igual a 1, existirá uma correlação perfeita na amostra, ou seja, não haverá diferença entre os valores de y estimados e os valores reais. Por outro lado, se o coeficiente de determinação for igual a 0, a equação de regressão não terá utilidade para prever um valor de y. A expressão de R^2 é:

$$R^2 = \frac{\sum (Y_{est} - Y_{medio})^2}{\sum (Y - Y_{medio})^2}$$

onde:

Y_{estimado} é o valor de y estimado pela equação de regressão;

$Y_{\text{médio}}$ é a média dos valores de y.

2 - Análise de variância - teste F

O teste F é um teste de hipótese realizado para determinar se a relação observada entre as variáveis dependente e independentes ocorre por acaso. Quanto maior o valor de F, mais relacionadas são as variáveis.

A estatística F é definida como:

$$F = \frac{QMR}{QMRs}$$

onde:

$$QMR = \frac{\sum (Y - Y_{\text{est}})^2}{k - 1}$$

$$QMRs = \frac{\sum (Y_{\text{est}} - Y_{\text{médio}})^2}{(n - k)}$$

QMR = Quadrado médio da regressão;

QMRs = Quadrado médio dos resíduos;

Y_{est} = valor de y estimado pela equação de regressão;

$Y_{\text{médio}}$ = média dos valores de y.

k = número de variáveis;

n = número de observações.

Os valores críticos de F, isto é, valores de F associados à probabilidade de que duas variáveis estejam relacionadas, são encontrados em livros de estatística, relacionados aos graus de liberdade da regressão e dos resíduos.

A comparação da estatística F com os valores encontrados na tabela estatística determina um nível de significância (α) para o modelo.

O nível de confiança ($1-\alpha$) é estabelecido como 1 menos a probabilidade relacionada à estatística F do modelo ou nível de significância (α).

3 - Teste de hipóteses para os parâmetros de regressão

Outro teste de hipótese pode determinar se um coeficiente de regressão é útil para prever o valor estimado. Trata-se do teste t de student aplicado aos parâmetros estimados $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, da eq. 1. Por exemplo, para testar o coeficiente a_1 para significância estatística, divide-se o valor estimado de a_1 pelo erro padrão deste coeficiente. A equação a seguir representa o valor de t observado:

$$t = \frac{a_1}{S_1}$$

onde S_1 = erro padrão do coeficiente a_1 .

O valor crítico de t, encontrado em livros de estatística em função do grau de liberdade e do nível de significância (α), comparado ao valor da estatística t observado, dá uma medida da significância do parâmetro. Se o valor absoluto de t é maior que $t_{\text{crítico}}$, o parâmetro será uma variável importante para prever o valor estimado da variável dependente. Cada uma das outras variáveis independentes pode ser testada para significância estatística de maneira semelhante.