

**PREVISÃO DE IRREGULARIDADE PÓS-RECAPE EM RODOVIAS DO RS:**

AJUSTE DO MODELO HDM-4

***RAFAEL LUCCA LERCH***

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia**.

**Porto Alegre**

**Março de 2002**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Curso de Pós Graduação

---

Prof. Washington Peres Núñez  
Orientador

---

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

- Prof. José Tadeu Balbo

Doutor em Engenharia pela Universidade de São Paulo

- Prof. Antônio Fortunato Marcon

Doutor em Engenharia pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica

- Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti

D.Sc. pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Dedico esta**  
**dissertação aos meus pais**  
*e à minha amada Clarissa*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, que sempre lutaram para proporcionar-me tudo de melhor que uma pessoa pode desejar, pelo apoio técnico, econômico e psicológico dispensados a mim;

A minha amada (e futura esposa e mãe de meus filhos) Clarissa, pela paciência, amor, dedicação, compreensão dos momentos em que estive ausente, e por sempre acreditar e confiar nos meus sonhos, dando-me coragem de seguir em frente;

A minha irmã e ao meu cunhado, por terem me dado, ao longo deste mestrado, a felicidade de ser o padrinho da linda Manuela – “*o didi num tá....*”;

A família Italo Marcon, por ter, também, me apoiado e me auxiliado na escrita desta dissertação, bem como pelos anos de convívio em família;

Ao meu orientador Washington Peres Núñez, por ensinamentos, pela amizade e pelas inúmeras oportunidades a mim oferecidas, bem como pela confiança em mim depositada;

Ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, por ter acreditado e apostado muito no sucesso da minha caminhada ao longo de vários anos;

Ao professor João Fortini Albano, pois foi a sua indicação do meu nome para uma bolsa de iniciação científica, em meados de 1995, que tornou-se a primeira porta que me foi aberta no mundo da pesquisa;

À professora Wai Gehling, pelos ensinamentos fundamentais e pela orientação acadêmica que me conduziu a esta área da geotecnia;

Ao meu coorientador internacional M.Pierre Joubert, por ensinamentos fundamentais e pela acolhida em seu país – “*Merci Beaucoup*”;

Os amigos do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées em Nantes, na França, pela acolhida maravilhosa à minha estada e por inigualáveis ensinamentos, em especial aos engenheiros

Paul Autret, François Brillet e Claude Massonpiere. Bem como aos amigos Thierry Gouy e Daniel Danic com suas famílias;

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por ensinamentos e prestação de serviços essenciais a este trabalho;

Ao Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul, pelo fornecimento dos dados utilizados neste trabalho, em especial aos engenheiros Ricardo, Ana Paula, e Marlova, pelo tempo a mim dispensado;

Ao amigo Renato Brito e sua família, pelo estímulo e confiança em mim depositados;

E, finalmente, ao LAPAV e à CAPES, por terem me fornecido bolsa auxílio para me ajudar na caminhada deste mestrado.

## SUMÁRIO

Lista de figuras.....	ix
Lista de Quadros.....	xii
Lista de Símbolos e Abreviações.....	xiii
Resumo.....	xiv
Abstract.....	xv
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Considerações gerais.....	1
1.2 – O problema da pesquisa.....	3
1.3 – Objetivos.....	4
1.4 – Estrutura da dissertação.....	5
2 – A IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	6
2.1 – Conceitos fundamentais de avaliação de pavimentos.....	6
2.1.1 – Avaliação Estrutural e Avaliação Funcional.....	6
2.1.2 – Serventia.....	7
2.2 – O parâmetro Irregularidade Longitudinal.....	8
2.3 – Equipamentos de medição de irregularidade longitudinal.....	10
2.3.1 – Sistemas de medidas diretas do perfil.....	10
2.3.2 – Sistemas de medidas indiretas do perfil.....	10
2.3.3 – Sistemas baseados na reação do veículo.....	11
2.3.4 – Sistemas de medida com equipamentos sem contato.....	13

2.4 – Escalas de medição da Irregularidade Longitudinal.....	13
2.5 – Correlação entre a irregularidade longitudinal antes e após recape.....	17
2.6 – Normas brasileiras relativas ao parâmetro irregularidade longitudinal.....	17
2.7 – Padronização internacional das medidas de irregularidade longitudinal.....	18
3 – O PROGRAMA HDM-4.....	20
3.1 – Histórico.....	20
3.1.1 – Os primeiros trabalhos.....	20
3.1.2 – Objetivos do desenvolvimento do HDM-4.....	22
3.2 – O papel do HDM-4 na gerência de pavimentos.....	23
3.3 – A estrutura do programa HDM-4.....	24
3.4 – Ciclos no interior das funções de gerência de pavimentos.....	26
3.5 – Módulos do programa HDM-4.....	27
3.6 – Os modelos de previsão de desempenho do programa.....	28
3.7 – Modelos de previsão de desempenho após a execução de recapes.....	29
4 – ESTUDOS PRELIMINARES DE SENSIBILIDADE DO PROGRAMA HDM-4.....	31
4.1 – Primeiro estudo – Efeito da redução pós recape na evolução da irregularidade longitudinal considerando os modelos linear e bilinear.....	31
4.2 – Segundo estudo – Sensibilidade da evolução do IRI a parâmetros de entrada....	34
4.3 – Comentários sobre os estes estudos.....	36
5 – METODOLOGIA DO ESTUDO.....	37
5.1 – Coleta de dados.....	37
5.2 – Ajuste de equações de previsão de desempenho.....	41
5.3 – Entrada de dados no programa HDM-4.....	41
5.4 – O ajuste dos modelos contidos no programa HDM-4.....	43
6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	45
6.1 – Redes que não precisaram de ajuste das equações de previsão.....	45

6.2 – Redes nas quais foram necessários ajustes das equações de previsão de redução de irregularidade longitudinal pós recape.....	49
6.3 – Proposta de ajuste dos parâmetros das equações de previsão da irregularidade longitudinal após recape contidas no programa HDM-4.....	55
6.4 – Comentários sobre os agrupamentos de seções e sobre os ajustes propostos.....	55
6.5 – Valores encontrados para os parâmetros ajustáveis do modelo contido no programa HDM-4.....	58
6.6 – Relação entre as espessuras de recape executadas com os modelos de previsão encontrados.....	59
6.7 – Relação entre os valores encontrados de $a_1$ com as espessuras de recape executadas.....	60
6.8 – Relação entre os valores encontrados de $a_1$ com a irregularidade longitudinal antes da execução do recape.....	61
6.9 – Proposta de Modelo de previsão da redução da irregularidade longitudinal para pavimentos com características semelhantes aos analisados.....	61
6.9.1 – Análise de regressão múltipla.....	62
7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	65
7.1 – Conclusões.....	65
7.2 – Sugestões.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
SUGESTÃO DE LEITURAS.....	73
ANEXO A – EQUAÇÕES DOS MODELOS DE PREVISÃO DO IRI DO PROGRAMA HDM-4.....	75
ANEXO B – DADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO PROGRAMA HDM-4	
AOS	
PARÂMETROS	
DE	
ENTRADA.....	80
ANEXO C – DADOS COMPARATIVOS DAS REDES.....	86



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Analisador de Perfil Longitudinal (APL – LCPC).....	11
Figura 2.2 – Esquema de um medidor tipo MERLIN.....	12
Figura 2.3 – Maysmeter [Souza e outros (2001)].....	13
Figura 2.4 – Esquema de um Perfilômetro Dinâmico de Superfície.....	14
Figura 2.5 – Esquema do simulados de quarto-de-carro.....	15
Figura 3.1 – Arquitetura do programa HDM-4 [Kerali (1995)].....	27
Figura 3.2 – Esquema dos modelos Bilinear e Linear do HDM-4 [Lerch e outros (2001)]...30	
Figura 4.1 – Seção 1.....	33
Figura 4.2 – Seção 6.....	33
Figura 4.3 – Seção 11.....	33
Figura 5.1 – Lotes de Restaurações e Supervisões BIRD (DAER).....	39
Figura 5.2 – Ampliação do Lote 1.....	40
Figura 5.3 – Ampliação dos Lotes 2 e 3.....	40
Figura 5.4 – Janela de ajuste do modelo no programa HDM-4.....	44
Figura 6.1 – Rede com base granular, tratamento superficial duplo, recape de 5,0 cm de concreto asfáltico.....	46
Figura 6.2 – Rede com base granular, concreto betuminoso usinado a quente, recape de 3,0 cm de concreto asfáltico.....	46
Figura 6.3 – Rede com base granular, concreto betuminoso usinado a quente, recape	

de 6,0 cm de concreto asfáltico.....	47
Figura 6.4 – Rede com base granular, pré misturado a frio, recape de 6,0 cm de concreto asfáltico.....	48
Figura 6.5 – Rede com base granular, pré misturado a frio, reperfilagem de 2,0 cm e recape de 5,0 cm de concreto asfáltico.....	48
Figura 6.6 – Rede com base granular, tratamento superficial duplo, recape de 3,0 cm de concreto asfáltico.....	49
Figura 6.7 – Rede com base granular, tratamento superficial duplo, recape de 4,0 cm de concreto asfáltico.....	50
Figura 6.8 – Rede com base granular, pré misturado a frio, recape de 4,0 cm de concreto asfáltico.....	50
Figura 6.9 – Rede com base estabilizada, tratamento superficial duplo, recape de 4,0 cm de concreto asfáltico.....	51
Figura 6.10 – Redes com base granular, concreto betuminoso usinado a quente, recape de 4,0 cm de concreto asfáltico.....	51
Figura 6.11 – Redes com base granular, tratamento superficial duplo, recape de 6,0 cm de concreto asfáltico.....	52
Figura 6.12 – Redes com base granular, tratamento superficial duplo, reperfilagem de 2,0 cm e recape de 4,0 cm de concreto asfáltico.....	53
Figura 6.13 – Redes com base granular, pré misturado a frio, reperfilagem de 2,0 cm e recape de 6,0 cm de concreto asfáltico.....	53
Figura 6.14 – Redes com base granular, tratamento superficial duplo, recape de 8,0 cm de concreto asfáltico.....	54
Figura 6.15 – Comparação entre valores medidos e previstos para redes sem ajuste.....	57
Figura 6.16 – Comparação entre valores medidos e previstos para redes com ajuste segundo um modelo linear.....	57

Figura 6.17 – Comparação entre valores medidos e previstos para redes com ajuste segundo um modelos bilinear.....	58
Figura 6.18 – Relação entre valores de $a_1$ e espessura de recape executada.....	60
Figura 6.19 – Relação entre $a_1$ e a irregularidade longitudinal antes do recape.....	61
Figura 6.20 – Distribuição normal dos dados coletados.....	62
Figura 6.21 – Comparação entre valores observados e previstos pela análise determinística.....	63
Figura 6.22 – Histograma dos resíduos (média 0).....	64
Figura 6.23 – Gráfico de superfície do modelo de previsão encontrado.....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação de rodovias pavimentadas em função da irregularidade longitudinal [DAER (1998)].....	16
Quadro 2.2 – Correlação entre IRI e outros índices [Balbo (1997)].....	16
Quadro 2.3 – Correlação entre VSA e QI através da função $VSA=a.e^{b.QI}$ [Balbo (1997)].....	16
Quadro 3.1 – Alterações durante o processo de gerência de pavimentos [Paterson e Scullion (1990)].....	24
Quadro 3.2 – Estrutura do HDM-4 [Srsen e Krsic (2001)].....	25
Quadro 3.3 – Funções de gerência e aplicações do HDM-4 [Kerali e outros (1998)].....	26
Quadro 4.1 – Seções criadas com valores padrão do HDM-4.....	32
Quadro 4.2 – Diferenças entre reduções previstas de irregularidade devido à variabilidade da espessura executada ( <i>as built</i> ) em relação à projetada.....	35
Quadro 5.1 – Características dos trechos analisados.....	38
Quadro 5.2 – Características das Redes.....	42
Quadro 6.1 – Agrupamento das redes quanto ao modelo de ajuste encontrado.....	56
Quadro 6.2 – Valores encontrados para os parâmetros de ajuste dos modelos contidos no programa HDM-4.....	59

## **LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES**

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

HCM: Highway Cost Model

HDM: Highway Design and Maintenance System

HDM-4: Highway Development and Management System

IRI: International Roughness Index

ISOHDM: International Study on Highway Development and Management

LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

MIT: Massachusetts Institute of Technology

PMF: Pré Misturado a Frio

PSI: Present Serviceability Index

PSR: Present Serviceability Rating

QI: Quociente de Irregularidade

RTIM: Road Transport Investment Model

SGP: Sistema de Gerência de Pavimentos

SV: Slope Variance

TSD: Tratamento Superficial Duplo

VSA: Valor de Serventia Atual

## RESUMO

Esta dissertação analisa a evolução da irregularidade longitudinal de pavimentos, devida à execução de recapes em concreto asfáltico. Consideraram-se nove trechos de rodovias, totalizando aproximadamente 265 km, com estruturas representativas da malha viária do Estado do Rio Grande do Sul. Registraram-se irregularidades antes e após o recape, e as reduções medidas foram comparadas com valores previstos pelos modelos linear e bilinear propostos pelo programa HDM-4 do Banco Mundial. As diferenças entre reduções previstas e medidas alertaram para a necessidade de ajuste dos modelos em alguns casos, levando em conta as estruturas dos pavimentos e as espessuras de recape analisadas. Propõe-se nesta dissertação valores para os parâmetros ajustáveis dos modelos, com cuja aplicação foram minimizadas as diferenças entre as reduções medidas e previstas. De forma complementar, desenvolveu-se um estudo de sensibilidade para determinar o efeito que as diferenças, por ventura existentes, entre espessuras projetadas e executadas de recape poderiam ter na redução da irregularidade. Também, por meio de uma análise estatística, obteve-se um modelo para previsão da redução da irregularidade em função da espessura do recape e da irregularidade anterior à execução do mesmo.

## **ABSTRACT**

This thesis analyses the changes of pavement roughness due to concrete asphalt overlays. Nine road sections, totalizing 265 km, were considered. Those sections present pavement structures representative of the roadway net of Rio Grande do Sul State (Brazil). Roughness values before and after overlay construction were considered; and observed roughness reductions were compared with values estimated by linear and bilinear prevision models proposed as default in World Bank HDM-4 software. The differences between measured and estimated values made it clear that in some cases it is necessary to adjust the models, taking into account pavement structure and overlay thickness. In fact, by using adjusted model parameters proposed in this thesis, the differences were minimized. Complementary, a sensitivity analysis was carried out in order to establish the effect of differences between designed overlay thickness and as built values on roughness reduction. A statistical model for roughness reduction prediction, as function of overlay thickness and roughness values previous overlay execution, is also presented.

## **1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações gerais**

A manutenção das rodovias é um importante fator a ser considerado tanto nos países industrializados como nos países em desenvolvimento. O problema toma, sem dúvidas, diferentes formas, variando as dificuldades encontradas para cada caso analisado. Nos países tidos por não industrializados, ou “em desenvolvimento”, como o caso do Brasil, há, quase

sempre, a necessidade dos investimentos serem financiados por instituições de auxílio internacionais, como, por exemplo, o Banco Mundial.

O fato de nos países em desenvolvimento a malha rodoviária não estar, geralmente, bem desenvolvida, pode criar um conflito entre duas idéias distintas: manutenção de rodovias existentes ou construção de novas rodovias?

Para analisar e ajudar na decisão entre questões como estas, entre outros fatores, desenvolvem-se Sistemas de Gerência de Pavimentos – SGP's – onde os responsáveis utilizam ferramentas capazes de ajudar na busca de alternativas mais coerentes para cada caso, bem como para explicar a necessidade de investimentos.

Para o contexto específico dos países em desenvolvimento, o Banco Mundial elaborou, promoveu e colocou no mercado seu próprio produto de otimização de estratégias de construção e de manutenção de rodovias, o programa HDM - *Highway Design and Maintenance System* (Brillet, 2000).

Este programa é enfocado no capítulo 3 desta dissertação. Não se trata de um programa de dimensionamento de pavimentos. O HDM é, sim, um programa que possui modelos de previsão de desempenho de pavimentos que permitem visualizar, de forma bastante clara, a melhor relação custo/benefício entre várias soluções propostas para um mesmo problema.

Modelos de previsão de desempenho são equações, ou sistemas de equações, desenvolvidas após análises e estudos realizados de forma sistemática. Estimam a evolução dos parâmetros relacionados à degradação dos pavimentos de uma rodovia com base na análise dos dados observados nesta, tais como evoluções de trincas, afundamentos de trilha de roda e irregularidade longitudinal. Estas equações devem ser ajustadas para uma melhor adaptação dos modelos a cada região.

Diversos fatores afetam o desempenho de um pavimento. Segundo Haas (2001), esses fatores relacionam-se a:

- **Meio ambiente:** umidade, temperatura, radiação, congelamento-degelo, etc.
- **Estrutura:** espessuras, propriedades dos materiais empregados, variabilidade de espessuras e materiais empregados, condição do subleito, etc.
- **Tráfego:** carga por eixo, pressão dos pneus, velocidade, volume de tráfego
- **Construção:** métodos de cálculo, qualidades construtivas, mão-de-obra



- **Manutenção:** qualidade da rodovia, momento certo de agir, material empregado, etc.

Tendo em vista esta grande gama de variantes, é recomendável que em um Sistema de Gerência de Pavimentos exista uma metodologia que qualifique a malha através de um indicador, tal como a irregularidade longitudinal.

A irregularidade longitudinal pode ser definida como sendo o somatório das irregularidades, no perfil longitudinal de um pavimento, que causam desconforto, insegurança e aumentam os custos de viagem. Tal parâmetro é analisado de forma detalhada no capítulo 2.

No Brasil, um dos serviços mais freqüentemente realizados para a manutenção das rodovias é o recapeamento. Trata-se da execução de uma nova camada de rolamento aplicada sobre um pavimento existente, apresentando função estrutural, capaz de suportar determinado volume de tráfego (Balbo, 1997). Embora, geralmente, os recapes se destinem a aumentar a capacidade estrutural do pavimento, sua execução reduz, concomitantemente, a irregularidade longitudinal deste.

## 1.2 O problema da pesquisa

No programa HDM-4 (atual versão do programa HDM) do Banco Mundial, estão contidos modelos de previsão de desempenho para todos os importantes parâmetros que devem ser considerados a fim de qualificar o pavimento de uma rodovia (evolução de trincas, aparecimento de panelas, afundamento de trilha de roda e irregularidade longitudinal).

As vantagens dos modelos de previsão de desempenho contidos no programa HDM-4 é que derivam de bases empíricas, são versáteis e podem ser adaptados às condições locais da região em que se está trabalhando [Rohde e outros (1997)].

A irregularidade longitudinal é, muitas vezes, decisória na estimativa da vida útil do pavimento. No programa HDM-4, o usuário pode escolher entre mais de um modelo de previsão de redução da irregularidade após recapes: o desenvolvido para o HDM-III, que trata-se de um modelo bilinear, e o modelo linear desenvolvido para o HDM-4 (buscou-se a simplificação do modelo). No entanto, na versão 1.20 do HDM-4, foi também implementado o modelo dito “bilinear generalizado”, onde o usuário pode variar parâmetros de tal forma a trabalhar tanto com um sistema linear ajustado, quanto com um sistema bilinear ajustado.

Como afirmam Marcon e outros (1996), a escolha de qual o modelo de previsão de desempenho é de fundamental importância, e deve ser cuidadosa. Tecnicamente, um equívoco nas previsões de um programa pode acarretar erros de projeto, subestimando ou superestimando a vida útil dos pavimentos.

Conclui-se, então, que é muito importante estimar a redução da irregularidade longitudinal com a execução do recape; seja através dos modelos linear ou bilinear propostos pelo HDM-4 como *default*; seja através de modelos dessa natureza, porém com parâmetros ajustáveis às características regionais.

Para tanto, esta dissertação visa contribuir para o conhecimento e caracterização do comportamento funcional das rodovias no Estado do Rio Grande do Sul.

### 1.3 Objetivos

A presente dissertação tem três objetivos, sendo um principal e dois secundários:

O **Objetivo principal** é verificar qual dos modelos (linear ou bilinear) contido no HDM-4 conduz a previsões da redução de irregularidade pós recapes mais próximas das medidas nos nove trechos analisados; propondo valores aos parâmetros ajustáveis do modelo (diferentes dos propostos por *default*), quando necessário.

#### **Objetivos secundários:**

- apresentar dois estudos preliminares, realizados com o intuito de avaliar a sensibilidade do programa HDM-4, tanto a parâmetros de entrada (tráfego, estrutura existente, nível de irregularidade inicial e magnitude da deflexão medida), quanto à escolha do modelo de previsão (linear e bilinear) adotado; e

- apresentar um modelo de previsão da redução da irregularidade como função da espessura do recape e da irregularidade medida antes deste recape, considerando dados colhidos nos 9 trechos estudados nesta dissertação.

A importância dos ajustes propostos neste estudo reside no fato de que, ao buscar-se financiamentos junto ao Banco Mundial, uma empresa ou órgão, deve apresentar seus projetos justificados economicamente com o uso do programa HDM-4. Logo, quanto mais próxima da realidade regional forem as previsões deste programa, melhor aplicados podem ser os recursos provenientes desta instituição.

Os estudos preliminares foram desenvolvidos para determinar se as variabilidades de alguns parâmetros de entrada afetavam as previsões de redução de irregularidade do programa HDM-4; por exemplo: as eventuais diferenças entre espessuras de recape projetadas e construídas (*as built*) afetam significativamente a redução de irregularidade prevista?

Por fim, dispondo-se de um conjunto de dados estatisticamente significativo, era interessante investigar a existência de correlação entre as reduções de irregularidade medidas e as espessuras de recapes e valores de irregularidade prévias à execução dos mesmos. Um modelo empírico dessa natureza poderá ser empregado para estimar a redução da irregularidade longitudinal, em futuros projetos de restauração de pavimentos de rodovias com características semelhantes às dos 9 trechos analisados.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos e 3 anexos.

No capítulo 2, faz-se uma revisão bibliográfica do parâmetro Irregularidade Longitudinal, apresentando-se sua definição, sua importância, os equipamentos e as escalas de medidas, e um breve comentário sobre o histórico das medições deste parâmetro, chegando à atualidade em relação a equipamentos e padronização de medidas.

O capítulo 3 versa sobre o programa HDM. Apresentam-se o histórico do programa, os objetivos do seu desenvolvimento, seu papel na gerência de pavimentos, a estrutura do sistema do programa como um todo e a forma como se aplica em um sistema de gerência de pavimentos. São apresentados também os módulos que constituem o programa, bem como os modelos de previsão de desempenho de irregularidade longitudinal contidos no HDM-4.

No capítulo 4 são apresentados e comentados os resultados de dois estudos preliminares. Um apresentando e analisando as diferenças encontradas na evolução da irregularidade longitudinal conforme o modelo (linear ou bilinear) adotado para a previsão da redução deste parâmetro após a execução de recape. E outro verificando a influência, sobre os valores previstos pelos dois modelos (linear e bilinear), de variações nos dados de entrada do programa (estrutura do pavimento existente, nível de deflexão medida, magnitude da irregularidade longitudinal antes do recape e volume de tráfego).

O capítulo 5 apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento desta pesquisa.

No capítulo 6 faz-se a apresentação e a análise dos resultados encontrados para os objetivos propostos desta dissertação.

Por fim, no capítulo 7 apresentam-se as conclusões desta pesquisa, bem como sugerem-se estudos que dêem continuidade a este trabalho.

## **2 – A IRREGULARIDADE LONGITUDINAL**

### **2.1 Conceitos fundamentais de avaliação de pavimentos**

Na avaliação de pavimentos distinguem-se dois aspectos: o estrutural e o funcional.

#### **2.1.1 Avaliação Estrutural e Avaliação Funcional**

De acordo com Yoder e Witczak (*apud* Núñez, 1997), a condição funcional descreve a qualidade da rodovia em termos de conforto, custos e segurança, enquanto a condição estrutural está relacionada à capacidade de suporte. O termo capacidade de suporte é definido por Ullidtz (1987) como “o número de passagens de rodas de um tipo específico que um pavimento pode suportar antes de alcançar um nível inaceitável de dano funcional e estrutural”.

Para um engenheiro rodoviário a condição estrutural do pavimento indica por quanto tempo este manterá um nível adequado de condição funcional ou serventia

Um projeto de reforço de um pavimento é sempre precedido de sua avaliação estrutural no estado de deterioração atual (Medina, 1997). São avaliadas a deformabilidade e a resistência à ruptura por cisalhamento.

A deformabilidade, ou deformação elástica, ou deflexão, tem uma importância fundamental na avaliação estrutural de um pavimento. Através deste parâmetro tem-se uma noção do comportamento elástico das diversas camadas do pavimento. As deflexões recuperáveis provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e a sua repetição é a responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas (Pinto e Preussler, 2001).

Para o usuário da rodovia o importante é a condição funcional desta. Trata-se do conforto e da segurança ao rolamento, seja da condição da superfície do pavimento, não diretamente da estrutura (Medina, 1997). As condições superficiais de um pavimento são avaliadas de forma subjetiva, através de índices de serventia, ou objetiva, como, por exemplo, através da irregularidade longitudinal.

Um pavimento bem projetado e construído apresenta ao usuário, logo após a sua conclusão, um alto grau de serventia, traduzido pelo binômio: segurança e conforto (Pinto e Preussler, 2001).

### 2.1.2 Serventia

Em agosto de 1956, iniciou-se as instalações experimentais para a realização do *AASHO Road Test*, em Ottawa, Estado de Illinois, cujo objetivo principal era determinar uma relação significativa entre o número de repetições de carga de eixos, com cargas diferentes em magnitude e arranjos, e o desempenho de pavimentos constituídos por camadas de naturezas e espessuras variadas (Huang, 1993).

Uma importante contribuição do *AASHO Road Test* foi a introdução do conceito de serventia para qualificar a condição transiente dos pavimentos; bem como o desenvolvimento de equações que relacionam serventia, carregamentos aplicados e espessura do pavimento.

O conceito de serventia fundamenta-se no princípio de que o motorista preocupa-se principalmente com a capacidade do pavimento proporcionar tráfego confortável e seguro, a qual não está necessariamente ligada à sua condição estrutural.

Avaliações subjetivas de serventia não poderiam ser feitas nas seções relativamente curtas do *AASHO Road Test*, portanto, antes do início do experimento avaliações subjetivas foram feitas em 99 trechos selecionados nos estados de Illinois, Minnesota e Indiana. Os trechos escolhidos apresentavam pavimentos flexíveis e rígidos em proporções quase idênticas. Um grupo de motoristas era solicitado a pronunciar-se sobre a aceitabilidade do trecho e a julgar a serventia dos pavimentos, usando uma escala de 0 a 5. A nota média dada pelo grupo e a opinião média sobre a aceitabilidade foram usadas para definir o valor de serventia atual (*present serviceability rating* – PSR) de cada seção.

Desse estudo, concluiu-se que um valor de PSR igual a 2,5 representava a necessidade próxima de execução de uma camada de reforço e que o valor de 1,5 representava a completa incapacidade do pavimento para suportar tráfego.

Observações foram feitas nas diversas seções, incluindo medições de irregularidade longitudinal, grau de trincamento, extensão de remendos e profundidade da flecha nas trilhas de rodas. Essas observações foram combinadas estatisticamente de modo a obter-se um índice de serventia atual (*present serviceability index* – PSI), que varia em uma escala de 0 a 5, intimamente ligado ao PSR, este de caráter subjetivo.

A equação finalmente usada para calcular o PSI dos pavimentos flexíveis do *AASHO Road Test* era:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 1,38 RD^2 - 0,01 \sqrt{C + P} \quad (2.1)$$

na qual RD representava afundamento de trilha de roda, medida em polegadas; SV era a variância da declividade multiplicada por  $10^6$  (média das duas trilhas); C representava a área de pavimento com trincamento (ft<sup>2</sup>), por 1000ft<sup>2</sup>; e P era a área de remendos, por milhares de ft<sup>2</sup> (1 ft<sup>2</sup> = 0,0929 m<sup>2</sup>).

Entre os parâmetros que afetam a serventia de um pavimento, a irregularidade longitudinal é o que contribui mais significativamente (Haas e Hudson, 1978 e Saleh e outros, 2000).

Na equação 2.1 o valor de SV (ligado a irregularidade longitudinal) é muito mais importante do que os outros na determinação do PSI. Por exemplo: o acréscimo da flecha de 0 para 0,5 polegada representa uma redução do PSI em apenas 0,4; enquanto que um aumento de SV de 5 para 15, representa uma redução do PSI de 0,8.

## 2.2 O parâmetro Irregularidade Longitudinal

Saleh e outros (2000), definem a irregularidade longitudinal como o somatório das irregularidades, no perfil longitudinal de um pavimento, que causam desconforto, insegurança e aumentam os custos de viagem.

A irregularidade longitudinal é um importante elemento na análise das características superficiais dos pavimentos, tendo uma grande influência sobre aspectos funcionais, tais como: consumo de combustível, pneus e tempo de viagem. Afeta, também, a comodidade do usuário, provocando fadiga durante a viagem (Anchuelo e Viada, 2001 e Heyn e outros, 1988). A determinação da irregularidade longitudinal de um pavimento pode ser considerada, com boa aproximação, como uma medida indireta de sua serventia (DNER, 1998)

Haas e Hudson (1978), colocam que a irregularidade longitudinal não só é uma função do perfil do pavimento, como também das características do veículo, incluindo pneus, suspensão, carroceria, estofamento e também da sensibilidade dos motoristas e passageiros quanto às variações de velocidade e aceleração.

A irregularidade longitudinal pode ter origem congênita, ou seja, decorrer de imperfeições no processo executivo, assim como pode resultar de problemas ocorridos após a construção, resultantes da atuação do tráfego, clima e outros fatores.

Hassan e outros (1999), afirmaram que a irregularidade longitudinal é o resultado de uma série de mecanismos de deterioração, combinando o efeito de vários processos.

A irregularidade influi na interação da superfície da via com os veículos, gerando efeitos sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e motoristas, e sobre as cargas transportadas. Afeta a ação das cargas dinâmicas sobre o pavimento, bem como causa prejuízos à condução dos veículos, aumento no custo operacional, diminuindo a segurança, o conforto e a velocidade das viagens (DNER, 1998; Hassan e outros, 1999; Smith e outros, 1997).

O aumento da ação dinâmica das cargas sobre os pavimentos acelera a deterioração da sua estrutura, afetando negativamente a segurança e o desempenho das rodovias.

As medições de irregularidade longitudinal são realizadas há muitos anos (DNER, 1998). Os avanços mais recentes neste campo estão direcionados para a melhor compreensão do fenômeno e suas conseqüências, melhor definição desta grandeza e melhor padronização dos processos de medições.

As medições periódicas de irregularidade fornecem informações que permitem aperfeiçoar as metodologias de projeto de construção e de reabilitação dos pavimentos.

Em última análise, a importância do conhecimento da irregularidade de uma rodovia reside na sua correlação com a qualidade de rolamento e com vários componentes dos custos



operacionais dos veículos. Os movimentos e esforços indesejáveis produzidos pela irregularidade longitudinal levam a uma condição de rolamento desconfortável, insegura e antieconômica.

### **2.3 Equipamentos de medição de Irregularidade Longitudinal**

A irregularidade da superfície de um pavimento é de natureza aleatória e, portanto, pode apresentar diversas frequências e variados comprimentos de onda (Hassan e outros, 1999). Os equipamentos desenvolvidos com a finalidade de medir essa irregularidade quantificam as distorções envolvidas, apesar da extrema dificuldade de se apresentar uma combinação de variações longitudinais e transversais em um só número.

De acordo com Marcon (1996), os primeiros equipamentos de medição de irregularidade longitudinal tiveram seu desenvolvimento iniciado em 1920, embora algumas tentativas tenham sido feitas ainda antes de 1900.

Um equipamento de medição de irregularidade longitudinal deve ser capaz de efetuar uma grande quantidade de medidas em um curto período de tempo; de medir variações abruptas e distorções de grande comprimento de onda e ser robusto.

Diversos equipamentos para a medição da irregularidade de pavimentos foram concebidos. O DNER (1998) divide os equipamentos em quatro grupos: sistemas de medidas diretas do perfil; sistemas de medidas indiretas do perfil; sistemas baseados na reação do veículo; e sistemas de medida com equipamentos sem contato.

**2.3.1 Sistemas de medidas diretas do perfil:** envolvem medidas diretas ou manuais da geometria vertical do pavimento, mediante o emprego de equipamentos de topografia ou instrumentos adequados, como por exemplo:

- **Nivelamento geométrico (Método de nível e mira)**

**2.3.2 Sistemas de medidas indiretas do perfil:** executam medidas mecanizadas do perfil da rodovia. Como exemplo de equipamentos têm-se:

- **Perfilômetro Dinâmico de Superfície (GMR):** ou simulador de quarto-de-carro. É um equipamento que simula os movimentos de uma roda em relação a uma massa suspensa a partir dos impulsos gerados pelo perfilômetro. A resposta do simulador é o somatório dos

movimentos relativos da roda. O quociente entre este somatório e a distância percorrida é o QI, que será abordado com mais ênfase adiante neste capítulo.

- **Analisador de Perfil Longitudinal (APL – LCPC):** caracteriza os defeitos de nivelamento longitudinal pelo comprimento e amplitude das ondas do pavimento (Figura 2.1).

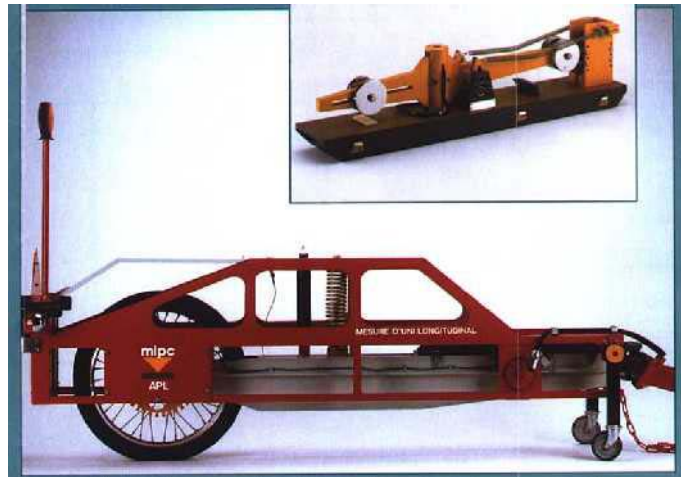


Figura 2.1: Analisador de Perfil Longitudinal (APL-LCPC)

- **MERLIN (Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumental):** é formado por duas pernas, distando 1,80 m entre si, cujos pés apoiam-se sobre a superfície do pavimento, e uma ponta de prova que fica localizada no ponto médio entre os dois pés (Figura 2.2). Mede a distorção vertical da superfície do pavimento sob a ponta de prova em relação à linha imaginária que une os pontos dos pés do aparelho com o pavimento.

Para efetuar-se a leitura, apoia-se o pé traseiro sobre o pavimento, mantendo-se o equipamento na vertical; pela força da gravidade a ponta de prova toca o pavimento, indicando a distorção da superfície pela movimentação do ponteiro.

- 2.3.3 Sistemas baseados na reação do veículo:** também conhecidos como sistemas tipo-resposta, baseiam-se em instrumentos que determinam acumulativamente os movimentos relativos entre o eixo traseiro do veículo e sua carroceria, a partir do que, estatisticamente, pode-se caracterizar a irregularidade. Dentre os equipamentos de medição têm-se:

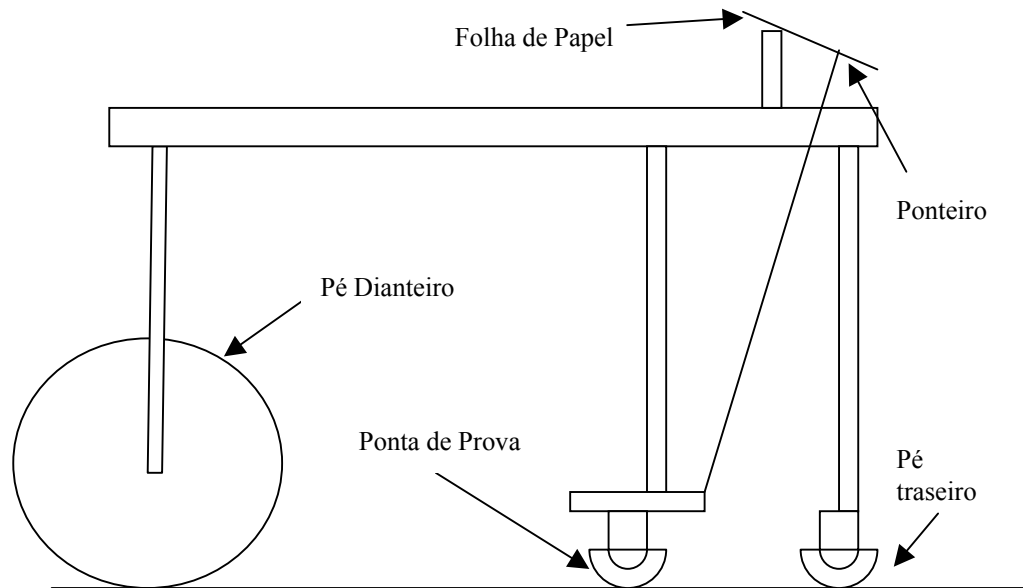


Figura 2.2: Esquema de um medidor tipo MERLIN

- **Rugosímetro BPR:** Consiste de um reboque com uma única roda teste de um pneu liso, sem frisos, para captar qualquer irregularidade do pavimento. As deflexões entre o eixo da roda e a armação são medidas por meio de um fio ligado ao eixo por um contato especial e em volta de uma mola em tambor. Quando o eixo da roda sofre deflexão, o comprimento do fio encurta ou alonga, dependendo da direção do movimento.
- **Maysmeter:** Consiste de uma haste anexada ao eixo e a um transmissor, ambos instalados em um veículo de passeio (Figura 2.3). Os deslocamentos relativos entre o eixo traseiro do veículo são medidos pelo transmissor e o sinal é enviado a um registrador. Os movimentos relativos verticais são acumulados, em valor absoluto, ao longo de uma distância pré-fixada.
- **Sistema integrador IPR/USP:** Funciona, basicamente, igual ao sistema do Maysmeter. É um sistema composto por dois conjuntos: o sensor de deslocamentos verticais e o quantificador de irregularidade em pavimentos.

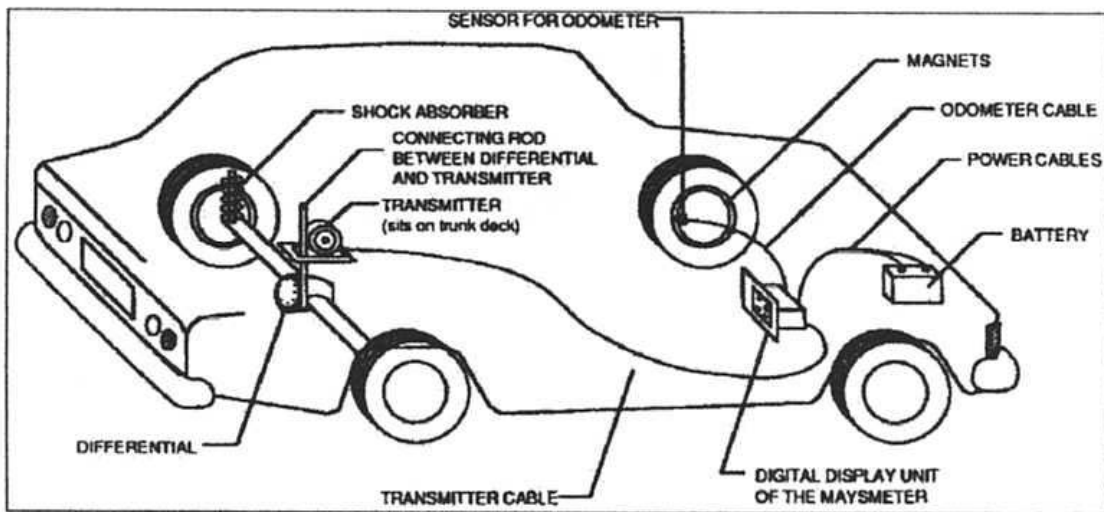


Figura 2.3: Maysmeter (Fonte: Souza e outros, 2001)

**2.3.4 Sistema de medida com equipamentos sem contato:** baseiam-se na reflexão de uma onda sonora ou raio laser emitido por um dispositivo situado sob o veículo. Toma-se por exemplo destes equipamentos:

- **Perfilômetro laser do TRRL**
- **Perfilômetro acústico da Universidade DELFT**

Atualmente, o sistema mais difundido internacionalmente e também em nosso país é o dos integradores do tipo-resposta, que se baseiam na reação da suspensão dos veículos às irregularidades existentes (DNER, 1998).

## 2.4 Escalas de medição da irregularidade

A irregularidade pode ser medida em diversas escalas padronizadas, dependendo do equipamento de medição. Como resultado de uma pesquisa internacional de medição de irregularidade, realizada em Brasília no ano de 1982 (GEIPOT, *apud* Queiroz, 1984), foi estabelecida a escala “International Roughness Index” – IRI, que é uma escala de referência transferível para todos os sistemas de medição.

O IRI é definido por Hassan e outros (1999) como sendo o somatório estatístico das variações do perfil longitudinal do pavimento nas trilhas de roda. É determinado processando-se as medidas de um modelo algorítmico (por exemplo, o modelo de quarto-de-carro), que simulam a forma com que os veículos respondem às irregularidades dos pavimentos.

O IRI pode ser determinado a partir de um perfil levantado por nível e mira nas trilhas de roda, ou com emprego de equipamentos mais complexos, tal como um perfilômetro dinâmico de superfície, esquematizado na Figura 2.4. O índice é expresso pela relação entre os movimentos acumulados da suspensão do veículo e a distância percorrida por ele; geralmente, a unidade de medida do IRI é m/km (ou mm/m).

De acordo com Brilllet e Lepert (1999), o IRI é uma escala na qual é possível calcular a irregularidade longitudinal através de uma grande variedade de equipamentos. Esta escala é, antes de mais nada, conhecida como um indicador de conforto e de custo operacional. O IRI é, talvez, o mais utilizado índice para exprimir a qualidade funcional de uma rodovia (McGhee, 2000 e Sun e outros, 2001).

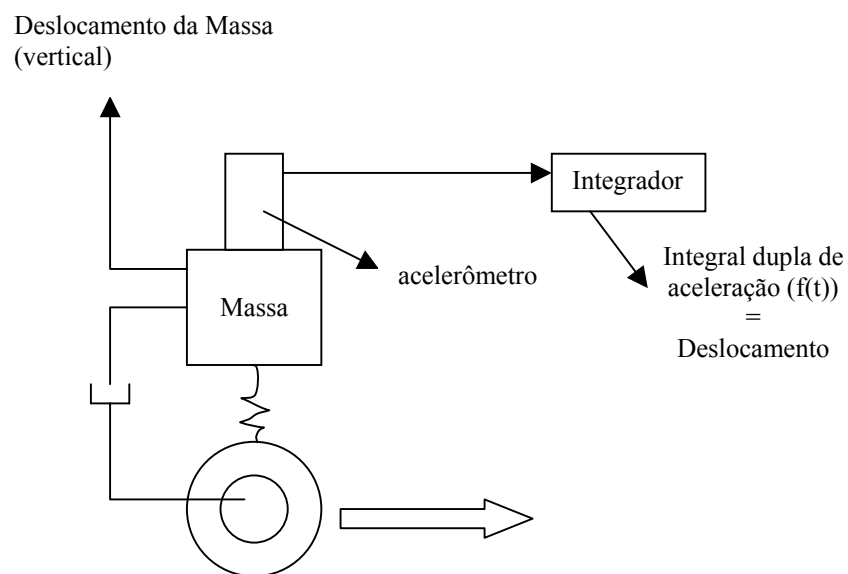


Figura 2.4 – Esquema de um Perfilômetro Dinâmico de Superfície

No Brasil, a escala padrão de medição adotada é o Quociente de Irregularidade – QI, ou Índice de Quarto de Carro, reconhecido internacionalmente a partir do uso do perfilômetro dinâmico de superfície – GMR. O modelo de quarto de carro consiste em um sistema formado por uma massa, uma roda, um amortecedor e uma mola (Figura 2.5). A resposta à irregularidade, obtida pela simulação de movimentos no quarto de carro, é aceita como uma

medida padrão de irregularidade e é expressa em contagens por quilômetro – cont./km (DNER, 1998).

Os dados de QI utilizados na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários – PICR - (Queiroz, 1982), foram obtidos por um equipamento do tipo-resposta (Maysmeter – Figura 2.3), que baseia-se na reação do veículo às condições de superfície da rodovia. Esse equipamento foi calibrado em bases que foram niveladas por meio de um perfilômetro dinâmico, cujo esquema está representado na Figura 2.4.

Na prática, os valores de QI e IRI são altamente correlacionados. Uma relação aproximada entre QI e IRI é dada por :  $QI = 13 IRI$  (Balbo, 1997 e Pinto e Preussler, 2001).

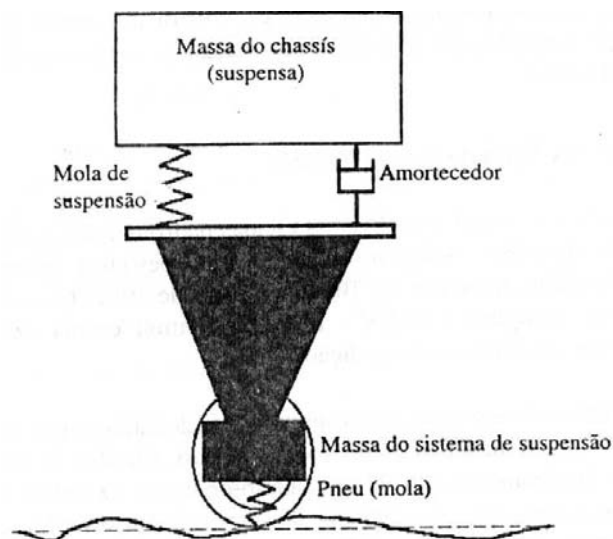


Figura 2.5 – Esquema do simulador de quarto-de-carro [Fonte: DNER (1998)]

A condição de uma rodovia em função da irregularidade é apresentada no Quadro 2.1. No que se refere às rodovias pavimentadas, os valores de IRI variam desde 1,0 m/km, para pavimentos excelentes, até valores superiores a 6,0 m/km para pavimentos muito ondulados. As rodovias não pavimentadas têm esses valores compreendidos entre 3,0 m/km, para condições muito boas, até valores acima de 15,0 m/km em condições ruins.

Quadro 2.1: Classificação de rodovias pavimentadas em função da irregularidade longitudinal

(Fonte: DNER, 1998)

Condição	IRI (m/km)	QI (cont/km)
Boa	1,0 – 3,5	13 – 45
Regular	3,5 – 4,5	45 – 59
Ruim	> 4,5	> 60

O IRI também é correlacionado com índices obtidos em outros equipamentos (Quadro 2.2) utilizados ao redor do mundo. Toma-se, por exemplo, os seguintes casos apresentados por Watanatada e outros, citado por Balbo (1997)

Quadro 2.2: Correlação entre IRI e outros índices [Watanatada e outros, *apud* Balbo (1997)]

Equipamento	Índice Típico	País	Correlação
Bump Integrator	BI	Inglaterra	$IRI = BI^{0,89}$ (IRI<17)
APL72	$W_{sw}$	França	$IRI = 0,78(W_{sw})^{0,63}$ (IRI<9)
Perfilômetro AASHO	SI (ISA)	EUA	$IRI = 5,5\ln(5,0/SI)$ (IRI<12)

A publicação do *The World Bank*, citada por Balbo (1997), apresenta a correlação (Quadro 2.3) entre a irregularidade longitudinal (aqui apresentada na escala Quociente de Irregularidade – QI) e o Valor de Serventia Atual (VSA) - ou PSR.

Quadro 2.3: Correlação entre VSA e QI através da função  $VSA = a \cdot e^{b \cdot QI}$  [*The World Bank*, *apud* Balbo(1997)]

Via	A	b	r <sup>2</sup>
Pavimentadas	4,14	-0,003096	0,41
Não Pavimentadas	4,59	-0,005416	0,81
Todas	4,66	-0,005336	0,83

Os estudos da Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários – PICR (Queiroz, 1982), dentre outros objetivos, procuraram determinar a correlação entre o PSR (ou VSA) e o quociente de irregularidade e os limites toleráveis da qualidade ao rolamento de rodovias pavimentadas e não-pavimentadas.

De acordo com estes estudos, os limites de aceitabilidade de conforto ao rolamento são 60 cont/km e 200 cont/km para rodovias pavimentadas e não-pavimentadas, respectivamente.

O parâmetro Irregularidade Longitudinal será utilizado em capítulos posteriores desta dissertação com duas finalidades: apresentar a relação que mostra como a irregularidade longitudinal é reduzida após a execução de recapes em rodovias do Estado do Rio Grande do Sul e ajustar os modelos de previsão de irregularidade longitudinal pós recapes incluídos no programa HDM-4.

## **2.5 Correlação entre a Irregularidade Longitudinal antes e após recape**

Smith e outros (1997), analisando mais de 200 seções de pavimentos nos Estados Unidos, com uma imensa gama de variações estruturais, idade, volumes de tráfego e projetos de reabilitação, chegaram a conclusão de que os valores da irregularidade longitudinal pós recape são altamente correlacionados com os seus valores anteriores à obra ser executada.

No entanto, Perera e Kohn (1999), correlacionaram valores de irregularidade longitudinal antes e após recapes em 12 rodovias, também norte americanas, concluindo que espessuras de recape na ordem de 50 mm resultaram em valores de irregularidade longitudinal semelhantes a espessuras na ordem de 125 mm (executadas em duas camadas). Chama-se atenção que antes das obras os valores de irregularidade eram bastante variados. Tal fato lhes permitiu concluir que não há correlação entre a irregularidade longitudinal antes e após recape.

## **2.6 Normas brasileiras relativas ao parâmetro Irregularidade Longitudinal**

No Brasil, a irregularidade longitudinal tem seus equipamentos, métodos de medição e calibração normalizados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) nas seguintes normas rodoviárias:



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

Esta norma objetiva estabelecer as condições para a execução de nivelamento detalhado de rodovias, visando obter a irregularidade das suas superfícies para calibração de sistemas medidores do tipo resposta.

- DNER-PRO-164/85: Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade tipo-resposta.

Esta norma visa estabelecer as condições para a calibração dos equipamentos medidores de irregularidade, dos pavimentos, do tipo resposta.

- DNER-PRO-182/87: Medição da irregularidade de superfície de rodovias com medidores tipo-resposta.

Esta norma fixa as condições exigíveis na realização de medições de irregularidade de rodovias com medidores tipo resposta.

## **2.7 Padronização internacional das medidas de irregularidade longitudinal**

Os equipamentos de medida de irregularidade longitudinal sofreram um considerável avanço tecnológico com o passar dos anos. Existem desde equipamentos de medições geométricas (Método de Nível e Mira), que hoje são usados para calibrar os demais instrumentos, até perfilógrafos a laser de alta velocidade de aquisição de dados, passando pelos equipamentos do Tipo-Resposta (Anchuelo e Viada, 2001). Consequentemente, os equipamentos utilizados em diferentes países para determinar a irregularidade são muito distintos. E ainda, apesar de existir o IRI (*International Roughness Index*), os indicadores utilizados internacionalmente variam muito (como os exemplos na Quadro 2.2).

Tendo em vista tal fato, em 1998 o Comitê C1 de Características Superficiais da Organização Mundial de Rodovias (AIPCR) organizou um experimento internacional para correlacionar as medidas de perfil e os indicadores de irregularidade longitudinal. Esta pesquisa foi realizada em quatro regiões distintas: no Estado do Arizona (EUA), em Hokkaido (Japão), na Holanda e na Alemanha. O objetivo era estabelecer possíveis diferenças entre os métodos de medição da irregularidade longitudinal nestas regiões. Cada região organizou,

financiou e executou o seu experimento, sempre levando em conta as diretrizes apresentadas pelo Comitê C1 (AIPCR).

Nos três experimentos tomaram-se medidas de referência com os mesmos equipamentos e a mesma mão-de-obra (fator que também contribui na variabilidade dos resultados) para poder comparar-se os resultados obtidos nas diferentes regiões.

Os resultados finais deste experimento não foram publicados até a presente data, portanto ainda não são conhecidas as relações existentes entre os processos e equipamentos de medida de irregularidade longitudinal de pavimentos correntes ao redor do mundo (Anchuelo e Viada, 2001).

### **3 - O PROGRAMA HDM-4**

#### **3.1 Histórico**

##### **3.1.1 Os primeiros trabalhos**

Os primeiros estudos para a produção de um modelo de avaliação de projetos rodoviários foram iniciados em 1968 pelo Banco Mundial (Kerali, 1995b). O primeiro modelo foi desenvolvido a partir de um estudo de concepção de rodovias, realizado pelo Banco Mundial juntamente com o "*Transport and Road Research Laboratory*" (TRRL) do Reino Unido e o "*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*" (LCPC) da França. A seguir, o Banco Mundial delegou ao "*Massachusetts Institute of Technology*" (MIT) dos Estados Unidos a execução de uma pesquisa bibliográfica e o desenvolvimento de um modelo fundamentado nos conhecimentos disponíveis. O "Modelo de custos rodoviários" (*Highway Cost Model* - HCM) produzido pelo MIT constituiu-se num avanço considerável em relação a outros utilizados para examinar as interações entre:

- os custos das atividades de construção e manutenção de rodovias e
- os custos de manutenção e utilização dos veículos.

O HCM colocou em evidência a necessidade de novas pesquisas para substituir os métodos de concepção de manutenção de pavimentos que estavam pouco apropriados às condições dominantes nos países em desenvolvimento, bem como para fornecer relações suplementares específicas sobre o meio ambiente destes.

Em seqüência, o TRRL, em colaboração com o Banco Mundial, realizou no Quênia um estudo de grande envergadura, focado na degradação de rodovias revestidas e não revestidas, bem como nos fatores que influem no custo operacional dos veículos em um país em desenvolvimento. Os resultados deste estudo foram utilizados pelo TRRL para produzir a

primeira versão do "Modelo de Investimentos no Transporte Rodoviário" (*Road Transport Investment Model* - RTIM) para os países em desenvolvimento. Em 1976, o Banco Mundial financiou o desenvolvimento da complementação do HCM ao MIT, que produziu a primeira versão do "Modelo para Padrões de Projeto e Manutenção de Rodovias" (*Highway Design and Maintenance Standards Model* - HDM).

Trabalhos complementares foram realizados em diferentes países para expandir a validade dos modelos RTIM e HDM. Citam-se:

- O Estudo Caribe (desenvolvido pelo TRRL), no qual foram analisados os efeitos da geometria de rodovias sobre o custo operacional dos veículos (Morosiuk e Abaynayaka, 1982; Hide, 1982).
- O Estudo Índia (realizado pelo *Central Road Research Institute* - CRRI), no qual analisaram-se problemas particulares de exploração das rodovias indianas em função da geometria estreita dos pavimentos e da importante proporção de transporte não motorizado (CRRI, 1982).
- O Estudo Brasil (PICR), visando a extensão da validade de todas as relações do programa HDM [GEIPOT (1982), *apud* Kerali, 1995].

Os resultados dos estudos do TRRL foram usados para desenvolver o modelo RTIM2. A partir de então, o Banco Mundial desenvolveu um modelo mais completo utilizando os resultados de todos os estudos anteriores, chegando ao HDM-III. Estes dois modelos foram de início concebidos para rodar em computadores de grande porte. Com o avanço da tecnologia, a Universidade de Birmingham produziu, a pedido do TRRL, uma versão do RTIM2 para microcomputadores. Mais tarde, o Banco Mundial produziu o HDM-PC, uma versão do HDM-III para microcomputadores de escritórios.

Seguiu-se então, nesta linha, o desenvolvimento do:

- HDM-Q: integração dos efeitos de saturação do tráfego no programa HDM; e do
- HDM *Manager*: versão do HDM-III versão adaptada para sistemas operacionais tipo "MS Windows®".

O modelo para a concepção e manutenção de rodovias (HDM-III), desenvolvido pelo Banco Mundial, vinha sendo utilizado desde os anos 70 para avaliar, sob bases técnicas e econômicas, os projetos rodoviários, preparar a programação dos investimentos e analisar as estratégias de manutenção sobre as malhas rodoviárias (Kerali, 1995b). O estudo ISOHDM

(*International Study on Highway Development and Management*) foi realizado para expandir o raio de ação do modelo HDM-III e fornecer uma nova abordagem para os problemas de gestão de rodovias, apresentando-se como um conjunto de sistemas coerentes e com programas adaptáveis. Iniciou pelo programa denominado "Desenvolvimento e gestão de rodovias" (HDM-4).

As funções do programa HDM-4 vão além das tradicionais análises dos projetos, passando a fornecer um sistema potente para análises comparativas das diferentes políticas de gestão e de investimentos rodoviários.

### **3.1.2 Objetivos do desenvolvimento do HDM-4**

As diferentes versões dos modelos citados foram largamente utilizadas em vários países e contribuíram efetivamente para justificar aumentos nos orçamentos de reabilitação e de manutenção de rodovias. Também foram responsáveis por vantagens econômicas aos usuários das rodovias (Kerali, 1995b). Desde seu desenvolvimento, estes modelos forneceram um programa moderno de análise de investimentos rodoviários, aplicável em diversos climas e meio ambientes. No entanto foi reconhecida a necessidade de um melhoramento do mesmo, visando também sua adaptação às modernas ferramentas da informática.

De acordo com Kerali (1995b), os modelos de previsão de desempenho contidos nos programas RTIM3 e HDM-III datavam de mais de dez anos, em 1995. Mesmo que muitos desses modelos fossem ainda válidos, se fazia necessário integrar os resultados das numerosas pesquisas que foram realizadas neste período no mundo todo. No caso do custo operacional de veículos, a tecnologia veicular foi consideravelmente melhorada após 1980, ocasionando custos significativamente inferiores aos previstos nos modelos do RTIM3 e do HDM-III. Havia, portanto, a necessidade de incorporar essas alterações e atualizar os modelos para refletir o estado da arte atual.

A maior parte das aplicações destes modelos foram realizadas em países em desenvolvimento. Nos últimos anos, entretanto, muitos países industrializados também começaram a fazer uso dos mesmos. Houve, então, a necessidade de serem incluídas novas funções, como também a necessidade de modelar:

- os efeitos da saturação do tráfego;

- os efeitos dos climas frios;
- uma gama mais larga de tipos de estruturas de pavimentos;
- os efeitos sobre o meio ambiente (consumo de energia e emissão de poluentes dos veículos).

Neste contexto o modelo HDM-4 foi desenvolvido.

### **3.2 O papel do HDM-4 na gerência de pavimentos**

Ao considerar-se as aplicações do programa HDM-4 em um sistema de gerência de pavimentos, quatro funções específicas devem estar bem compreendidas: planejamento, programação, projeto e realização (Kerali, 1995b). Cada uma destas funções compreende uma seqüência de atividades.

O planejamento implica em analisar a malha rodoviária como um todo, estudando, por exemplo, as evoluções dos custos gerados por diferentes planos de ação. O retorno a médio e longo prazo é analisado visando a melhor opção a adotar-se. As previsões do estado do pavimento são expressas por indicadores, tais como a irregularidade longitudinal, com a finalidade de comparar, também, as estratégias adotadas em nível estrutural e funcional dos pavimentos.

A programação implica na preparação de programas plurianuais de trabalhos de pavimentação, bem como a especificação das despesas a eles associadas. Trata-se de um planejamento tático dos recursos. Nesta função são realizadas análises custo/benefício dos trabalhos a serem executados. A programação produz as evoluções das despesas anuais para os diferentes tipos de trabalhos para cada trecho de uma rodovia. Os orçamentos são, geralmente, limitados, e um fator importante na programação é o de fixar as prioridades que assegurem a melhor forma de utilizar os recursos disponíveis. Na programação preparam-se os balanços econômicos para cada trabalho a ser executado.

O projeto é a etapa de planejamento a curto prazo onde os projetos são finalizados para serem executados. Nesta etapa os dimensionamentos são detalhados, os custos e o planejamento de execução são apresentados. Tais especificações são passíveis de serem reestudadas. As atividades típicas nesta função são o dimensionamento detalhado de recapes e de trabalhos de manutenção rotineira, bem como de melhoramentos nas rodovias.

A realização consiste na execução propriamente dita dos trabalhos especificados. Nesta função as atividades são focalizadas nas seções individualizadas, com uma boa disponibilidade de dados detalhados.

O Quadro 3.1, apresentado por Paterson e Scullion (1990), resume o processo de alteração de uma função para outra num sistema de gerência de rodovias.

Quadro 3.1 – Alterações durante o processo de gerência de pavimentos

[Paterson e Scullion (1990)]

<b>Atividade</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Pessoal responsável</b>	<b>Cobertura atingida</b>	<b>Detalhe de dados</b>	<b>Tipo de tratamento informatizado</b>
Planejamento	Muito distante	Superiores, nível político	Malha inteira	Grosseiro / sintético	Automático
Programação	Distante	Nível operacional	Rodovia	↓	↓
Projeto	Ano orçamentário	Engenheiros (júnior)	Seção	↓	↓
Realização	Imediato	Técnicos, operários	Canteiro de obra	Fino / detalhado	Interativo

### 3.3 A estrutura do programa HDM-4

No sistema HDM-4, o usuário deve criar normas de trabalho que serão utilizadas pelo programa durante o andamento de cada ano de análise. As normas de trabalho são divididas em dois grupos: Normas de Manutenção e Normas de Melhoramentos.

As do primeiro grupo definem trabalhos de manutenção da rodovia (recape, selagem de trincas, etc), sem alterar as características iniciais.

As normas de modificações definem trabalhos que visam alterar características do pavimento, da superfície ou da rede como um todo (ex.: alargamento, reconstrução, etc).

O programa HDM-4 é formado por vários submodelos que têm funções específicas em cada fase de um processo de gerência de pavimentos. O Quadro 3.2, apresentado por Srsen e Krsic (2001), resume a estrutura do programa.

Quadro 3.2 – Estrutura do HDM-4 [Srsen e Krsic (2001)]

<b>Dados de Entrada</b>	<b>Submodelo</b>	<b>Dados de saída</b>
Tipo de veículos, volume de tráfego, geometria do pavimento, clima, custos, etc	Início do ciclo de análise	
Tipos de pavimentos, parâmetros de resistência e deformabilidade do pavimento, idade e condições atuais, eixo padrão, etc	Modelos de deterioração dos pavimentos	Dados sobre trincas, geometria, painéis, perda de material, afundamentos, espessura do revestimento
Geometria do pavimento e planimetria, velocidade dos veículos, parâmetros de congestionamento do tráfego, custos, etc	Modelos dos efeitos no usuários	Consumo de pneu, combustível e peças. Custos de manutenção dos veículos, tempo de viagem, velocidade média, etc
Estratégias de trabalhos de manutenção e reabilitação dos pavimentos	Modelos dos efeitos do trabalhos realizados	Reparação de trincas, painéis, etc. Espessura do revestimento, custos de administração.
Geometria do pavimento, condições de superfície, características dos veículos	Modelos dos efeitos sócio/econômicos e sobre o meio ambiente	Nível de emissão de poluentes, energia consumida, número de acidentes - tráfego
Custos e benefícios em termos de desenvolvimento da malha, acidentes, meio ambiente, etc	Ferramentas de análises econômicas	Custos e benefícios totais
	Volta ao início do ciclo de análise	Custo total por componente. Valor Presente Líquido <sup>(1)</sup> e parcelas de retorno por seção.

(1) Valor Presente Líquido (VPL): diferença entre benefícios e custos, descontados durante o período de análise. Um valor positivo do VPL indica que o projeto é justificado, para a taxa de desconto considerada (Fernandes Jr., 2001).

As análises realizadas pelo programa podem ser: análise de projetos, de programas ou de estratégias.

Na de projetos, analisam-se as alternativas de normas de trabalhos escolhidas, comparando-as quanto ao resultado final de cada tipo de intervenção (por exemplo: estudo do interesse de revestir ou não um determinado trecho).



Quando se realiza uma análise de programas, faz-se uma comparação entre programas de gerência selecionados, buscando-se a melhor alternativa do ponto de vista econômico (por exemplo: definição de um programa plurianual – para um determinado número de anos).

Na análise de estratégias, o programa compara duas ou mais estratégias financeiras a serem adotadas, como, por exemplo, quando investir em um recapeamento: agora (custos de um recape mais delgado, porém imediatos), ou em alguns anos (recape mais espesso, porém com custos no médio ou longo prazo)?

### 3.4 Ciclos no interior das funções de gerência de pavimentos

Os processos de gerência de pavimentos, num conjunto, podem ser considerados como um ciclo de atividades que são realizadas em cada uma das funções anteriormente descritas. O Quadro 3.3 apresenta estes processos e orienta como o programa HDM-4 é utilizado.

Quadro 3.3 – Funções de Gerência e aplicações do HDM-4 [Kerali e outros, *apud* Kerali (1995)]

<b>Função de Gerência</b>	<b>Descrições correntes</b>	<b>Aplicações do HDM-4</b>
Planejamento	Sistema de análise de estratégias Sistema de planificação da malha Sistema de gerência de pavimentos	Análise de estratégias
Programação	Sistema de análise do programa Sistema monetário	Análise de programas
Projeto	Sistema de análise do projeto Sistema de dimensionamento de pavimentos novos / reforços	Análise de projetos
Operações	Sistema de gerência de material Sistema de gerência do orçamento	Não é levado em conta no HDM-4

### 3.5 Módulos do programa HDM-4

De acordo com Kerali (1995b), a estrutura geral do programa HDM-4 pode ser ilustrada de acordo com a Figura 3.1. Os três sistemas de análise (estratégia, programa e projeto) trabalham sobre dados de entrada dos quatro gestores, quais sejam:

- Rede rodoviária: definem-se as características físicas dos trechos em cada rede;
- Frota: definem-se as características dos veículos que trafegam na rede;
- Trabalhos rodoviários: definem-se as normas (manutenção e modificação) que serão aplicadas às diferentes seções a analisar, assim como os custos a elas agregados;
- Configuração HDM: definem-se os dados padrão (por default) a utilizar-se nas aplicações do programa. Um conjunto de dados padrão é fornecido na instalação do programa.

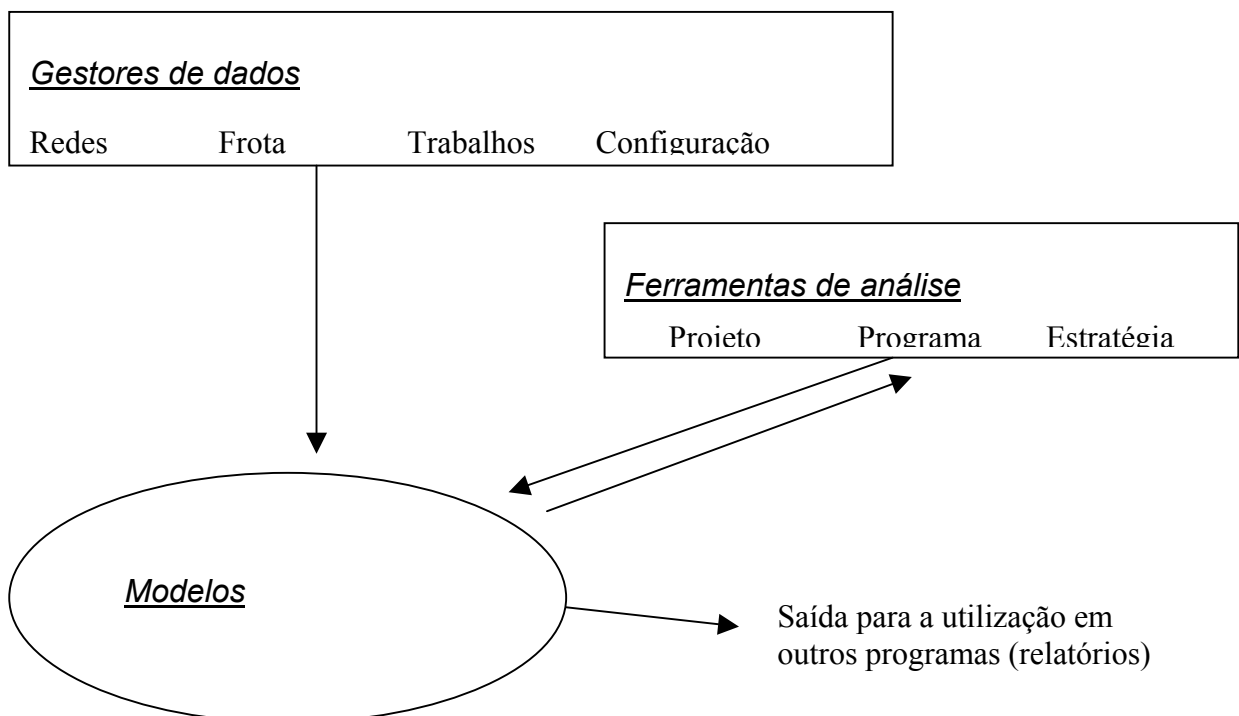


Figura 3.1: Arquitetura do Programa HDM-4 [ Kerali (1995)]

Já a análise técnica do programa é executada sob quatro conjuntos de modelos:

- DR (degradação das rodovias): prevê a deterioração dos pavimentos;

- ET (efeito das intervenções dos trabalhos): simula os efeitos dos trabalhos rodoviários sobre o estado dos pavimentos e determina os custos correspondentes;
- EU (efeitos sobre os usuários): determina os custos operacionais dos veículos, dos acidentes e dos tempos de viagem;
- ESA (efeitos sociais e ambientais): determina os efeitos das emissões dos veículos e do consumo de energia.

### **3.6 Os modelos de previsão de desempenho do programa**

No programa HDM-4 são incluídos modelos de previsão de desempenho para todos os parâmetros, analisados em um sistema de gerência de pavimentos, para avaliar as condições de um pavimento.

De acordo com Marcon e outros (1996), os modelos de previsão de desempenho são expressões do comportamento funcional e estrutural dos pavimentos ao longo do tempo. Portanto, a utilização de modelos de previsão de desempenho adequados e, principalmente, confiáveis, é imprescindível num projeto de sistema de gerência de pavimentos. As previsões dos modelos servem para a definição do trabalho a ser executado, e sobretudo, do orçamento destinado.

No programa HDM-4, de acordo com Kerali (1995b), as características do pavimento no início de um ano de análise são função tanto dos dados de entrada, para o caso do primeiro ano de análise, como das conseqüências oriundas dos trabalhos executados no período anterior.

O programa HDM-4 inclui modelos de previsão de desempenho da irregularidade longitudinal em função de diversas componentes: estrutural, relacionada à deformação no pavimento causada pela tensão cisalhante conseqüente da aplicação de carga do tráfego; trincamento; afundamento de trilha de roda; painelas e fatores ambientais. No Anexo A apresentam-se as equações para previsão da irregularidade longitudinal contidas no programa.

### 3.7 Modelos de previsão de desempenho após a execução de recapes

Após a execução de um determinado trabalho de manutenção em uma rodovia, quer pavimentada ou não, ter-se-á uma melhora de suas condições, quer sejam estruturais ou funcionais. O nível de melhoria atingido depende diretamente do tipo de trabalho executado, bem como da qualidade de sua execução.

No programa HDM-4 os modelos de previsão de desempenho são, logo, funções dos trabalhos executados. A previsão das condições de um pavimento depende do grau de manutenção atingido no período anterior.

Como já citado no capítulo 02 desta dissertação, um dos parâmetros mais relevantes na avaliação da serventia de um pavimento é a irregularidade longitudinal.

Por ser do escopo desta dissertação, serão apresentados a seguir os modelos de previsão de desempenho, após trabalhos de recapeamento em concreto asfáltico, para irregularidade longitudinal.

No programa HDM-4 tem-se a possibilidade de ajustar os parâmetros das equações que prevêem o comportamento do pavimento, no que diz respeito a sua irregularidade longitudinal, bem como de optar por qual modelo que melhor condiz com a prática regional: o bilinear ou o linear (Lerch e outros, 2001). A Figura 3.2 apresenta o esquema gráfico que compreende estes modelos. Salienta-se que o modelo linear é obtido fazendo-se  $a_0=a_2$  e  $a_1=0$ .

A diferença fundamental entre estes dois modelos vem do fato que, no bilinear prevê-se uma maior diminuição da irregularidade longitudinal no intervalo entre  $a_0$  e  $a_2$ , seguida por uma redução na taxa de variação do IRI após  $a_2$ . Já no modelo linear, esta redução é constante ao longo de todo o intervalo.

A equação que rege estes modelos é a seguir apresentada (Odoki, 2001):

$$\Delta RI = \text{MAX}\{0; a_1[\text{MIN}(a_2; RI_{bw}) - a_0] + a_3 \text{MAX}[0; (RI_{bw} - a_2)]\} \quad (3.1)$$

e

$$RI_{bw} = \text{MAX}(1, 0; RI_{ap}) \quad (3.2)$$

$$RI_{aw} = RI_{bw} - \Delta RI \quad (3.3)$$

Onde:

$\Delta IRI$  redução na irregularidade longitudinal após recape (IRI m/km)

$RI_{bw}$  irregularidade longitudinal antes da recape (IRI m/km)

$RI_{aw}$  irregularidade longitudinal após recape (IRI m/km)

$RI_{ap}$  irregularidade longitudinal após trabalhos preparatórios para recape (IRI m/km)

$a_0$  ao  $a_3$  parâmetros definidos pelo usuário

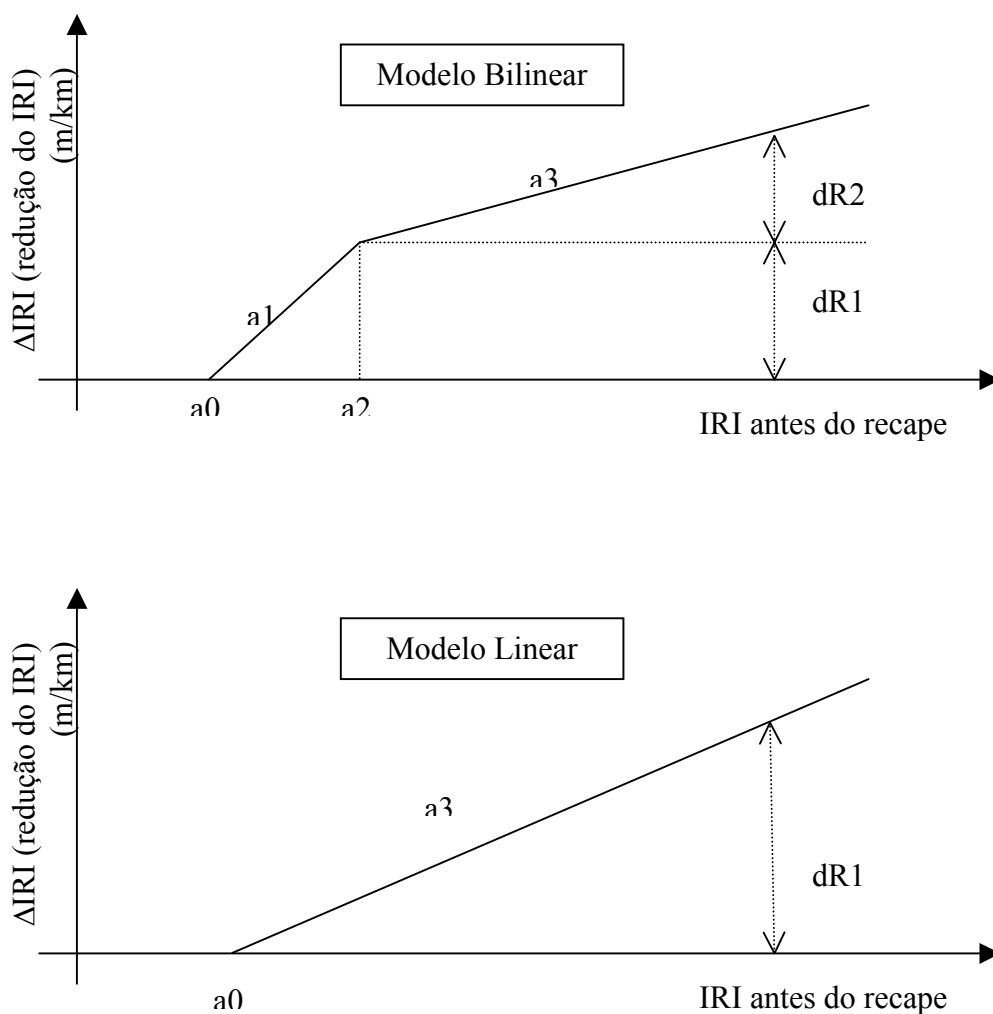


Figura 3.2: Esquema dos modelos Bilinear e Linear do HDM-4 [Lerch e outros (2001)]

A obtenção dos parâmetros e ajuste  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  é apresentada no Capítulo 06 desta dissertação, junto com uma análise da redução da irregularidade longitudinal devido a recapes executados em rodovias do Estado do Rio Grande do Sul.

## **4 - ESTUDOS PRELIMINARES DE SENSIBILIDADE DO PROGRAMA HDM-4**

Com a finalidade de conhecer o grau de sensibilidade dos modelos de previsão de irregularidade longitudinal pós-recape contidos no programa HDM-4, foram executados dois estudos. Estes estudos foram desenvolvidos, pelo autor desta dissertação, no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) em Nantes, França, possibilitado pelo Acordo de Cooperação Científica e Técnica UFRGS / LCPC, firmado em 07 de fevereiro do ano de 2001.

### **4.1 Primeiro estudo – Efeito da redução pós recape na evolução da irregularidade longitudinal considerando os modelos linear e bilinear**

Com a finalidade de conhecer a variação na progressão da irregularidade longitudinal, prevista pelos modelos contidos no programa HDM-4, partindo da redução inicial deste parâmetro apresentada, tanto pelo modelo linear, quanto pelo modelo bilinear, um estudo foi realizado com seções criadas baseando-se em valores padrão do HDM-4.

Para as 12 seções criadas (Quadro 4.1), foi executado um recape de 4 cm de concreto asfáltico, comparando-se os resultados dos dois modelos já citados.

Após executar o programa HDM-4 com estas 12 seções, submetidas às duas normas de manutenção (recape de 4 cm em concreto asfáltico: modelo linear e bilinear), foram graficados os resultados, dos quais três deles estão apresentados a seguir (Figuras 4.1 a 4.3). As demais seções tiveram comportamento semelhante a estas três.

Nota-se o paralelismo entre as curvas, indicando que, descontadas as diferenças imediatas após o recape (as quais são notáveis), a evolução do IRI se processa de forma semelhante para os dois modelos. Porém, como as curvas partem de alturas distintas, pode-se

visualizar uma diferença de alguns anos para, por exemplo, um certa seção atingir um determinado valor de irregularidade.

Quadro 4.1: Seções criadas com valores padrão do HDM-4

<b>Tipo de tráfego</b>	<b>Condição estrutural</b>	<b>Condição de conservação</b>	<b>Seção</b>
Tráfego Forte	Estrutura	Bom estado	S1
	Boa	Estado ruim	S2
	Estrutura	Bom estado	S3
	Fraca	Estado ruim	S4
Tráfego Médio	Estrutura	Bom estado	S5
	Boa	Estado ruim	S6
	Estrutura	Bom estado	S7
	Fraca	Estado ruim	S8
Tráfego Fraco	Estrutura	Bom estado	S9
	Boa	Estado ruim	S10
	Estrutura	Bom estado	S11
	Fraca	Estado ruim	S12

Neste estudo ficam evidenciados dois pontos: a diferença existente entre os dois modelos (linear e bilinear) de previsão de irregularidade longitudinal pós recape contidos no HDM-4; e a necessidade de buscar-se os valores dos parâmetros ajustáveis contidos nestes modelos, uma vez que pode-se visualizar diferenças da ordem de alguns anos entre as previsões.

Figura 4.1 - Seção 1

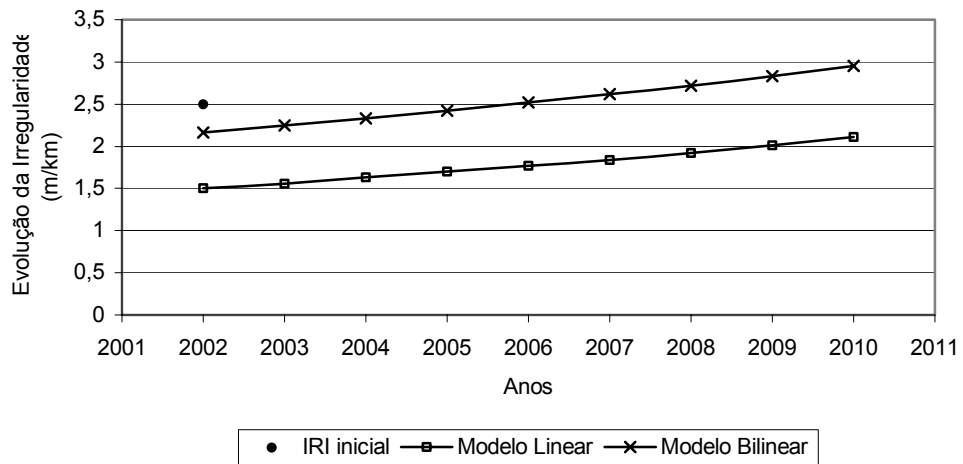


Figura 4.2 - Seção 6

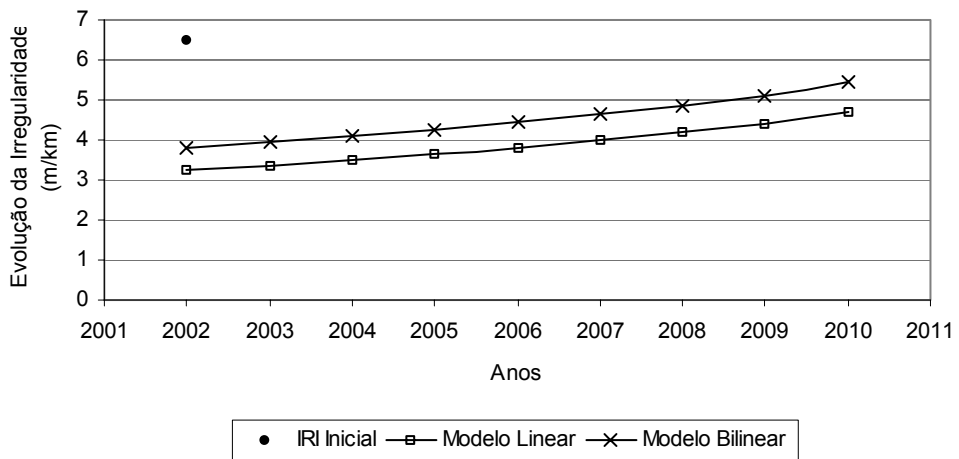
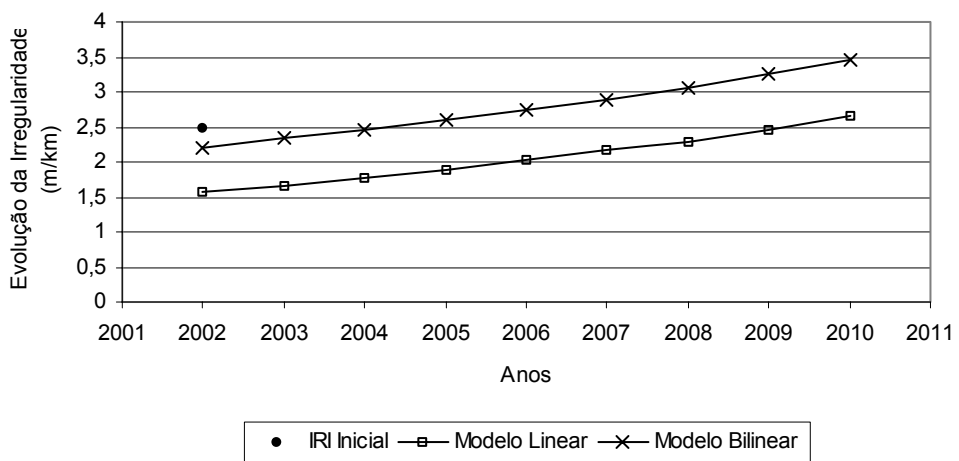


Figura 4.3 - Seção 11





## 4.2 Segundo estudo - Sensibilidade da evolução do IRI a parâmetros de entrada

Para o desenvolvimento do estudo que visa ajustar os parâmetros dos modelos de previsão de irregularidade após recape em concreto asfáltico, incluído no programa HDM-4, foi realizada uma análise da sensibilidade considerando quatro variáveis: volume de tráfego, nível de irregularidade longitudinal inicial, deflexão e estrutura existente do pavimento.

Tal análise é necessária para determinar o nível de influência das possíveis diferenças entre as espessuras de projeto dos recapes com as encontradas nos furos de sondagem. É notório que, por problemas construtivos diversos, um recape, por exemplo de 5,0 cm, pode ser executado tanto com 4,5 cm como com 5,5 cm, variando ao longo da extensão restaurada.

Foram criadas 14 seções variando-se em 3 somente o volume de tráfego, em 4 somente a irregularidade longitudinal, em 2 somente a deflexão e em 5 somente a estrutura do pavimento.

Foram criadas 22 normas de trabalho, incluindo 11 espessuras de recape (de 2,5 cm até 7,5 cm) e a influência das mesmas na evolução da irregularidade longitudinal foi analisada considerando os modelos linear e bilinear do HDM-4.

As seções estão apresentadas, juntamente com os valores estimados do IRI (m/km) no Anexo B desta dissertação.

### **Análise sob o ponto de vista da variação do nível de irregularidade longitudinal**

Os resultados encontrados são apresentados no Quadro 4.2. São apresentados os valores máximos atingidos ao compararem-se as diferenças previstas pelos modelos para a redução da irregularidade quando a espessura do recape projetada difere em até 1 cm ( $\pm 0,5$  cm) da espessura de recape executada.

**Conclusão:** pequenas variações nas espessuras de recape afetam significativamente a evolução da irregularidade longitudinal apenas quando o IRI inicial for muito elevado (IRI > 6,0m/km)

Quadro 4.2: Diferenças entre reduções previstas de irregularidade devido à variabilidade da espessura executada (*as built*) em relação à projetada

IRI inicial (m/km)	Variação máxima estimada de redução do IRI para diferenças de espessuras de recape de até 1 cm ( Projeto / Execução)	
	Modelo Linear	Modelo Bilinear
$9 \leq \text{IRI} \leq 10$	1,0 m/km	1,0 m/km
$7 \leq \text{IRI} < 9$	0,6 m/km	1,0 m/km
$5 \leq \text{IRI} < 7$	0,4 m/km	entre 0,2 e 0,7 m/km
$3 \leq \text{IRI} < 5$	0,2 m/km	0,2 m/km

#### **Análise sob o ponto de vista do Volume Diário Médio (VDM):**

Para uma mesma seção inicial, com degradação acentuada e IRI elevado, as diferenças de VDM não ocasionaram variações significativas nas previsões do IRI após recape para as espessuras indicadas.

#### **Análise sob o ponto de vista da deflexão antes do recape:**

Para uma mesma seção inicial, com degradação acentuada e IRI inicial médio, a diferença na deflexão não apresentou influência significativa no valor previsto do IRI após recape, para as espessuras indicadas.

#### **Análise sob o ponto de vista da estrutura existente:**

As 6 variações da estrutura analisadas, para seções com características semelhantes de conservação e estado, não apresentaram influência na variação da previsão do IRI após recape. Muito provavelmente, as evoluções posteriores do IRI diferirão de forma significativa conforme a estrutura do pavimento.

## Conclusões

Para as 14 seções analisadas neste estudo, verificou-se que apenas o nível inicial da irregularidade e a espessura do recape ocasionam variações significativas nas previsões do modelos do programa HDM-4.

Para valores de IRI iniciais altos, da ordem de 9,0 m/km, é maior o efeito das espessuras de recape no IRI final (redução da ordem de 0,5 m/km para cada 0,5 cm de recape), já para IRI iniciais baixos e médio, da ordem de 3,0 a 5,0 m/km, essa significância é bem menor (da ordem de 0,1 m/km para cada 0,5 cm).

Pode-se concluir que o nível de confiabilidade dos valores encontrados para os parâmetros de ajuste das equações de previsão de irregularidade após recape do programa HDM-4 não é afetado significativamente por possíveis diferenças dos valores das espessuras do recape *in situ* (furos de sondagem), tendo em vista os valores de IRI iniciais dos trechos estarem, na sua grande maioria, entre 3,0 e 6,0m/km.

### 4.3 Comentários sobre estes estudos

A descoberta de que os modelos linear e bilinear podem conduzir a valores muito diferentes de irregularidade longitudinal pós recape (resultado do primeiro estudo preliminar), motivou a pesquisa relatada nesta dissertação, com a finalidade de:

- a) verificar qual o modelo ajusta melhor a redução inicial da irregularidade longitudinal pós recape para as rodovias analisadas
- b) propor parâmetros de ajuste para as equações de previsão de irregularidade longitudinal pós recape do programa HDM-4.

Já, o segundo estudo, procurando conhecer a sensibilidade do programa aos dados de entrada, foi motivado pela certeza de que, por diversas razões, nem sempre as espessuras de recape projetadas são executadas na prática, podendo haver variações da ordem de  $\pm 0,5$  cm.

## **5 - METODOLOGIA DO ESTUDO**

### **5.1 Coleta de dados**

Visando coletar dados pertinentes à execução desta pesquisa, foi solicitado ao Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul - DAER/RS - junto à Coordenadoria de Programas Especiais (CPROESP) e à Unidade de Normas e Pesquisas (UNP), a disponibilização dos mesmos.

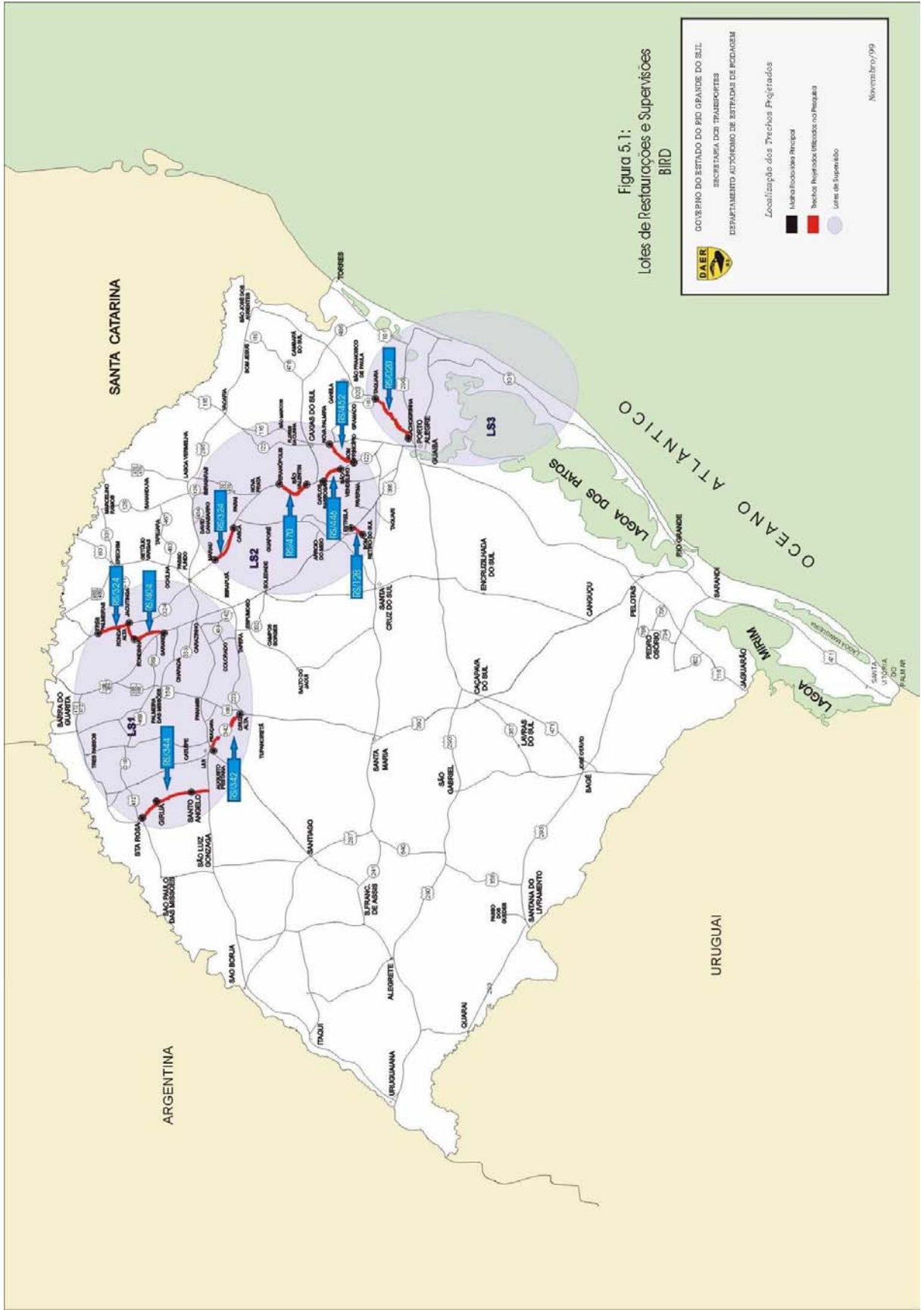
Junto ao CPROESP foram colhidos dados de nove trechos de rodovias estaduais (RS's), cujas obras de recuperação haviam sido abertas a licitação pública (Quadro 5.1). Foram levantados dados do histórico dos pavimentos, estruturais e funcionais, das condições superficiais e da classificação tanto qualitativa, como quantitativa do tráfego.

Estes 9 trechos atingem uma extensão total de 265,10 km e estão situados na metade norte do Estado do Rio Grande do Sul, conforme as Figura 5.1 a 5.3.

Junto a UNP foram coletados os dados das condições superficiais dos pavimentos, em especial quanto à irregularidade longitudinal, após a execução das obras de manutenção pelas empresas responsáveis. As medições de irregularidade longitudinal foram executadas com a utilização de um equipamento Maysmeter (Figura 2.3). A comprovação da execução dos projetos, por parte das empresas responsáveis, deu-se através de sondagens realizadas pelo órgão.

Quadro 5.1 – Características dos trechos analisados

<b>Rodovia</b>	<b>Trecho</b>	<b>Extensão (km)</b>	<b>Tipo de base</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Revesti- mento</b>	<b>Espes- sura (cm)</b>
RS 020	Vista Alegre – Taquara	48,0	Solo / Brita	30	Tratamento Superficial Duplo	2,5
RS 128	Bom Retiro do Sul – Entr BR386	8,0	Brita Graduada	15 a 25	Tratamento Superficial Duplo	3 a 5
RS 324	Marau – Casca	30,9	Brita Graduada	35	Pré Misturado a Frio	5 a 7
RS 342	Ijuí – Cruz Alta	44,6	Brita Graduada	22 a 30	Pré Misturado a Frio	4 a 8
RS 344	Giruá – Entroncam. RS 218	31,2	Brita Graduada	30 a 35	Tratamento Superficial Duplo	3 a 4
RS 404	Ronda Alta – Sarandi	27,5	Brita Graduada	25 a 35	Tratamento Superficial Duplo	2,5
RS 446	Entr.RS122 – Entr.RS470	17,0	Brita Graduada	35 a 45	CBUQ	4 a 5
RS 452	Entr.RS122 - Entr.BR116	27,5	Brita Graduada	30 a 40	CBUQ ou TSD	3 a 4
RS 470	Entr.RS359 - Entr.RS431	30,3	Brita Graduada	30 a 65	CBUQ ou PMF	5 a 8



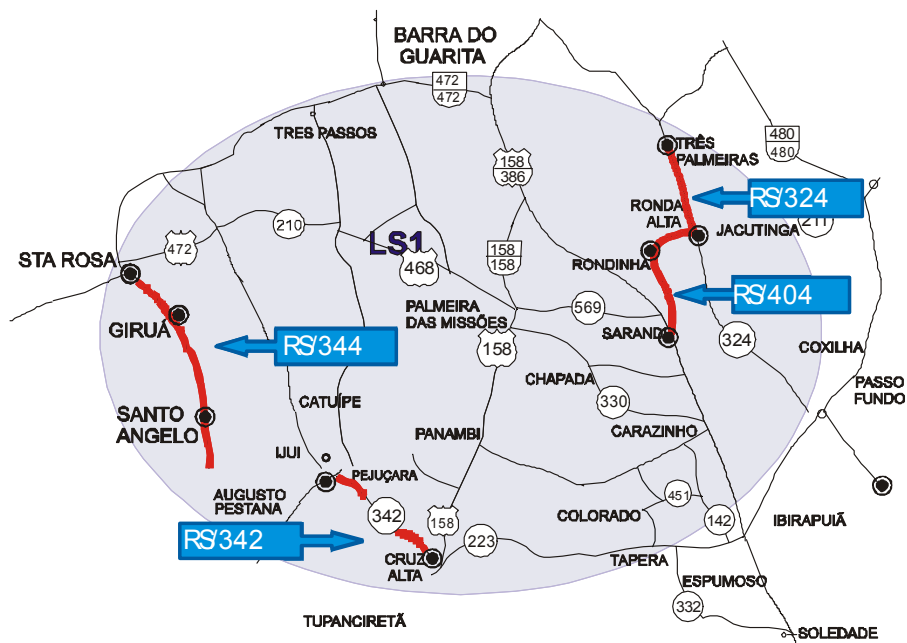


Figura 5.2: Ampliação do Lote 1

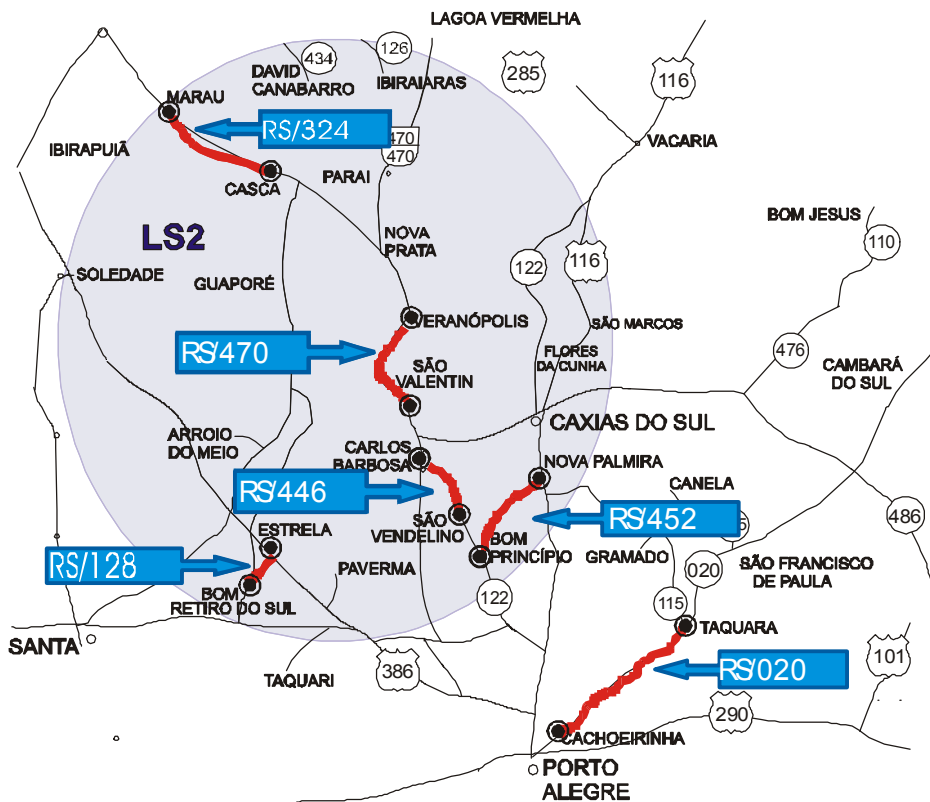


Figura 5.3: Ampliação dos Lotes 2 e 3

## 5.2 Ajuste de equações de previsão de desempenho

O ajuste de um modelo de previsão de desempenho consiste em encontrar os parâmetros que minimizem a diferença entre os valores previstos pelo modelo com os encontrados em campo (Bustos e outros, 1998).

De acordo com Bustos e outros (1998), existem três métodos para agrupar dados visando o ajuste de modelos de previsão de desempenho, quais sejam:

- **Projeto específico:** os modelos são ajustados para cada rodovia em particular, levando-se em conta suas particularidades detalhadamente. Desta forma obtém-se um ajuste com um alto grau de acurácia.
- **Método das janelas:** as seções são criadas levando-se em conta as características superficiais, estruturais e de tráfego, agrupando trechos homogêneos. Como pode-se trabalhar com mais de uma rodovia ao mesmo tempo, é indicado para gerência de redes. Apresenta, porém, uma acurácia inferior a mencionada anteriormente.
- **Análise Previsto/Observado:** as seções são criadas pela semelhança entre os dados de deterioração. O ajuste de cada parâmetro de deterioração é feito a valores globais. Para este sistema é necessário um banco de dados bastante conciso e volumoso, como, por exemplo, valores da evolução do trincamento, afundamento de trilha de roda, irregularidade longitudinal, etc.

Nesta dissertação, devido ao fato dos dados levantados não conterem a evolução dos parâmetros de deterioração, e por buscar-se um ajuste em nível de rede, o método utilizado foi o das janelas.

## 5.3 Entrada de dados no programa HDM-4

No programa HDM-4 o usuário deve entrar com dados relativos a segmentos de rodovias, ou de uma rodovia inteira, para criar uma dita “Seção”. Este programa trabalha com “Redes”, as quais são compostas por n seções.

Em um Sistema de Gerência de Pavimentos tradicional, o usuário deverá entrar com todas as seções de uma mesma malha (ou rede) a que se pretende gerenciar. Neste estudo,



tendo em vista o fato de que não se está gerenciando uma malha rodoviária, mas sim trabalhando com dados de várias rodovias já divididas em segmentos homogêneos. Estabelece-se como “Rede” um grupo de segmentos homogêneos com mesmas características estruturais, reunidas conforme o tipo de base e de revestimento original, como em Rohde e outros (1999). A maioria das Redes são formadas por segmentos homogêneos de mais de uma rodovia.

Também une-se as seções pelo serviço de reabilitação aplicado, conforme espessuras e materiais empregados. As redes ficaram divididas de acordo com o Quadro 5.2.

Cabe salientar que os trechos licitados foram divididos em segmentos homogêneos por empresas responsáveis pelas obras de recuperação.

Quadro 5.2: Características das Redes

REDE	TIPO DE BASE	MATERIAL DO REVESTIMENTO ANTERIOR	RESTAURAÇÃO EMPREGADA
1	Granular	Tratamento Superficial Duplo	Recape de 3,0 cm de CBUQ
2			Recape de 4,0 cm de CBUQ
3			Recape de 5,0 cm de CBUQ
4			Recape de 6,0 cm de CBUQ
5			Recape de 8,0 cm de CBUQ
6			Reperfilagem de 2,0 cm + Recape de 4,0 cm de CBUQ
7		Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)	Recape de 3,0 cm de CBUQ
8			Recape de 4,0 cm de CBUQ
9			Recape de 6,0 cm de CBUQ
10		Pré Misturado à Frio (PMF)	Recape de 4,0 cm de CBUQ
11			Recape de 6,0 cm de CBUQ
12			Reperfilagem de 2,0 cm + Recape de 5,0 cm de CBUQ
13			Reperfilagem de 2,0 cm + Recape de 6,0 cm de CBUQ
14		Estabilizada	Tratamento Superficial Duplo

Após o estabelecimento das redes, deu-se a entrada dos dados no programa HDM-4. Os segmentos homogêneos deram origem a 14 redes, contendo todas as seções de mesmas características iniciais (antes da manutenção) e finais (mesma espessura de recape).

Os dados de entrada para cada seção foram:

- Largura da pista e do acostamento (m)
- Comprimento da seção (km)
- Material da camada de superfície
- Estrutura do pavimento (materiais utilizados e espessuras)
- Dados climáticos
- Características do tráfego (volume, tipo de veículos, evolução)
- Número de faixas; sentidos
- Ano da construção e da última intervenção
- Deflexão ( $10^{-2}$ mm)
- Irregularidade longitudinal (m/km)
- Superfície total trincada (%)
- Afundamento de trilha de roda (mm)

Foram, então, criadas as seguintes normas de trabalho, executando os serviços de restauração realizados: recape em concreto asfáltico de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 cm de espessura. Para as seções onde foi executada uma espessura de reperfilagem antes do recape em concreto asfáltico, criou-se no programa uma norma de trabalho onde a espessura projetada do recape era equivalente ao total (reperfilagem + recape) executado em campo.

As reduções da irregularidade longitudinal após a execução do recape foram analisadas utilizando os modelos de previsão Linear e Bilinear.

#### **5.4 O ajuste dos modelos contidos no programa HDM-4**

A possibilidade de ajustar o modelo de previsão de desempenho após recapes do programa HDM-4 foi criada na versão 1.2, como já citado anteriormente no capítulo pertinente ao programa.

Tal ajuste é feito na janela apresentada na Figura 5.4. Cabe salientar que os valores dos parâmetros são da livre escolha do usuário, não sendo obrigado a seguir qualquer critério, salvo o fato de que o valor de  $a_2$  não pode ser inferior ao de  $a_0$ .

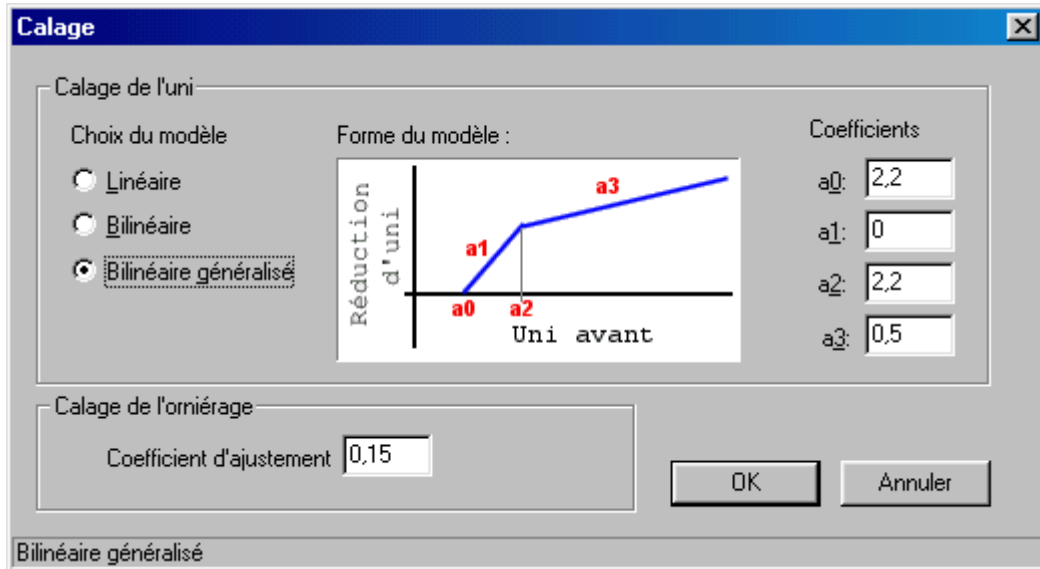


Figura 5.4: Janela de ajuste do modelo no programa HDM-4

Das 14 redes estudadas nesta dissertação, em 5 delas os modelos padrão contidos no programa (sem quaisquer ajustes) apresentaram resultados satisfatórios quando comparadas as suas previsões com os valores medidos em campo. Para os 9 restantes, houve a necessidade de buscar um ajuste que melhor traduzisse a realidade.

Dentre estes nove grupos de seções, em quatro deles o ajuste encontrado foi com um modelo linear, e nos cinco restantes, conforme um modelo bilinear.

Cabe salientar que o processo utilizado na definição dos parâmetros de ajuste destas equações foi o de tentativa e erro, ou seja, alterando-se os valores dos mesmos até encontrarem-se previsões semelhantes aos dados medidos.

No Capítulo 6 desta dissertação, apresentam-se os ajustes e faz-se uma análise dos resultados encontrados utilizando esta metodologia empregada.

## 6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o agrupamento e a entrada dos dados conforme descrito no Capítulo 5, procedeu-se a busca dos ajustes dos modelos de previsão de redução da irregularidade longitudinal pós recape contidos no programa HDM-4.

Como já colocado anteriormente, para algumas redes não foi necessário qualquer ajuste destas equações; ou seja, as equações propostas pelo programa como *default* conduziram a previsões satisfatórias. Cabe salientar que os valores apresentados aos parâmetros ajustáveis do HDM-4 por *default* para estes casos estão dentro dos intervalos encontrados às redes onde foram necessários ajustes.

### 6.1 Redes que não precisaram de ajuste das equações de previsão

Como um primeiro passo, os dados reais de irregularidade longitudinal após recape foram comparados com os previstos pelos dois modelos sem quaisquer ajustes. Desta forma constatou-se, para 5 redes, não havia necessidade de ajustar os parâmetros das equações de previsão de desempenho do programa, visto que, ou o modelo linear, ou o modelo bilinear, previa valores próximos aos medidos. Tal fato ocorreu nas redes com as seguintes características:

- 6.1.1- Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 5 cm de concreto asfáltico** (Figura 6.1). Para este grupo de seções, os valores previstos pelo Modelo Linear com os parâmetros de *default* do programa, mostram-se bastante satisfatórios, sendo aceitos sem a necessidade de qualquer ajuste. Chama-se atenção para o fato que, a cada espessura de recape, o programa

HDM-4 propõe valores diferentes como *default*. Os dados do gráfico foram tirados do Quadro C3, do Anexo C.

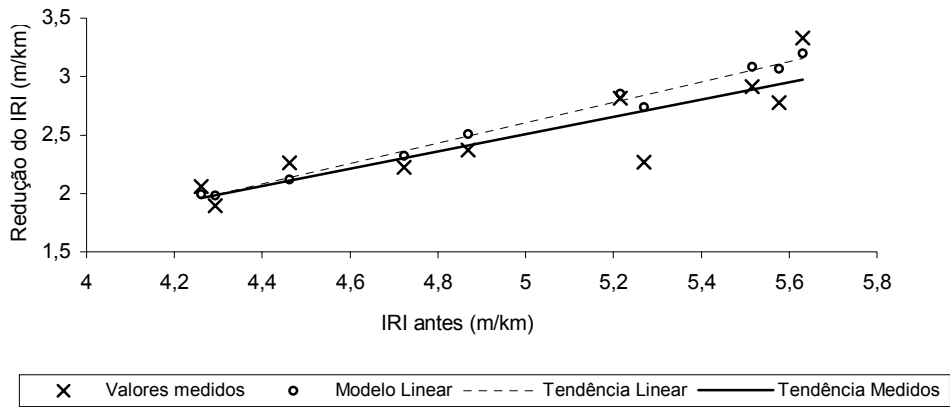


Figura 6.1: Rede com Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 5 cm de concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.1.2- Base granular; concreto betuminoso usinado a quente; recape de 3 cm de concreto asfáltico** (Figura 6.2). Também vê-se uma satisfatória gama de previsões da irregularidade pós recape com os parâmetros de default contidos no modelo linear, para esta rede. Dados retirados do Quadro C7, no Anexo C.

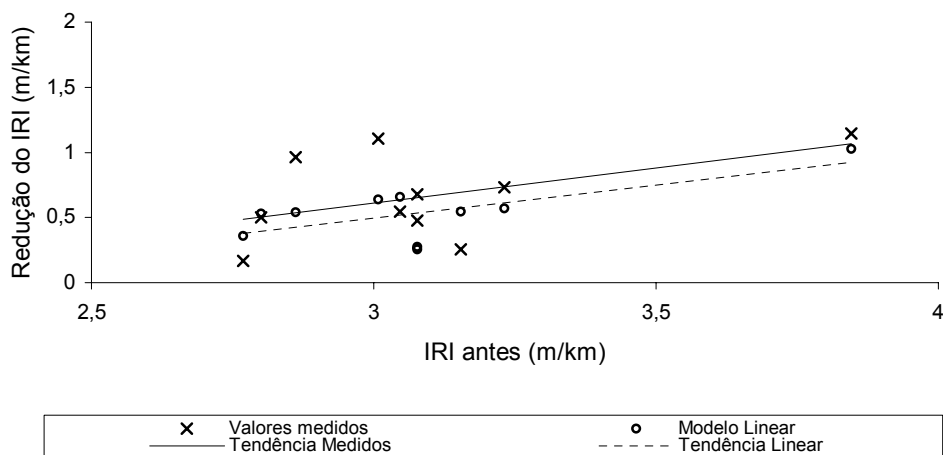


Figura 6.2: Rede com Base granular; concreto betuminoso usinado a quente recape de 3 cm de concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.1.3- Base granular; concreto betuminoso usinado a quente; recape de 6 cm de concreto asfáltico** (Figura 6.3). Mesmo com a pequena quantidade de seções desta rede, vê-se um comportamento quase idêntico entre os dados medidos com os previstos pelo modelo linear sem ajustes. Dados no Quadro C9, no Anexo C.

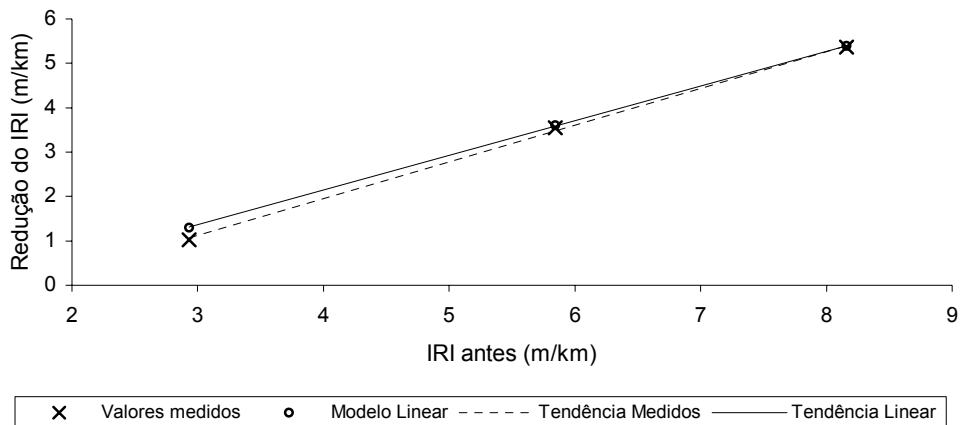


Figura 6.3: Rede com Base granular; concreto betuminoso usinado a quente; recape de 6 cm de concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.1.4- Base granular; pré misturado a frio; recape de 6 cm de concreto asfáltico** (Figura 6.4). Para esta rede, o modelo bilinear, por default, prevê valores muito próximos aos medidos. Os pontos assemelham-se para valores de redução da irregularidade da ordem de 2,0 a 4,0 m/km, e, após estas grandezas de valores, as reduções previstas são inferiores às medidas. Embora para valores de IRI inicial superiores a 6 as previsões na redução pelo modelo bilinear sejam inferiores as medidas, considera-se válido o modelo escolhido (bilinear) uma vez que na maioria dos casos o recape seria executado antes do pavimento ter alcançado um tal nível de degradação. Dados no Quadro C11, no Anexo C.

**6.1.5- Base granular; pré misturado a frio; reperfilagem em 2 cm e recape de 5 cm de concreto asfáltico** (Figura 6.5). Neste caso, nota-se uma semelhança bastante grande entre os valores medidos com os previstos pelo modelo linear (sem ajustes), indicando, também, a não necessidade de buscar valores de ajuste aos parâmetros das equações de previsão de irregularidade pós recape do programa HDM-4. Dados no Quadro C12, no Anexo C.

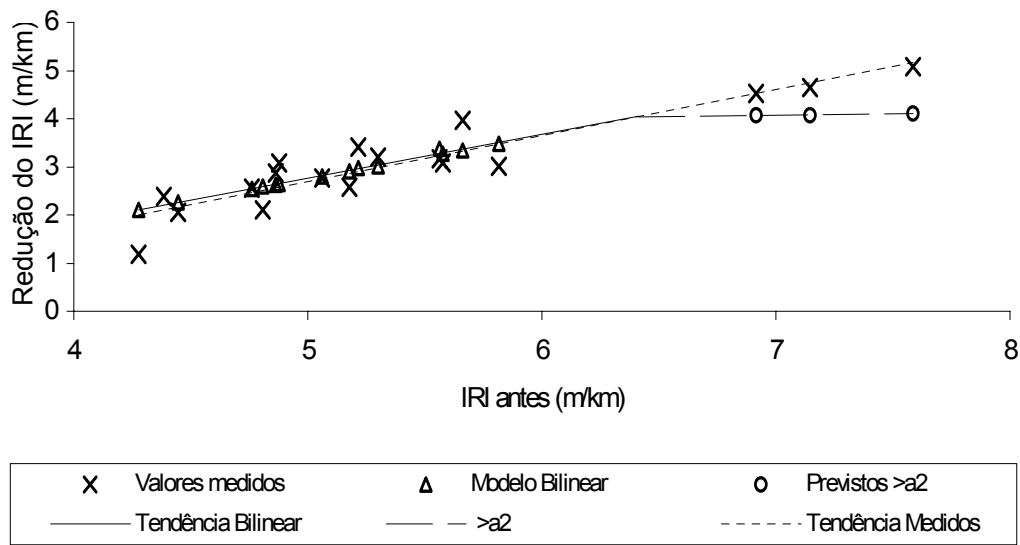


Figura 6.4: Rede com Base granular; pré misturado a frio; recape de 6 cm de concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

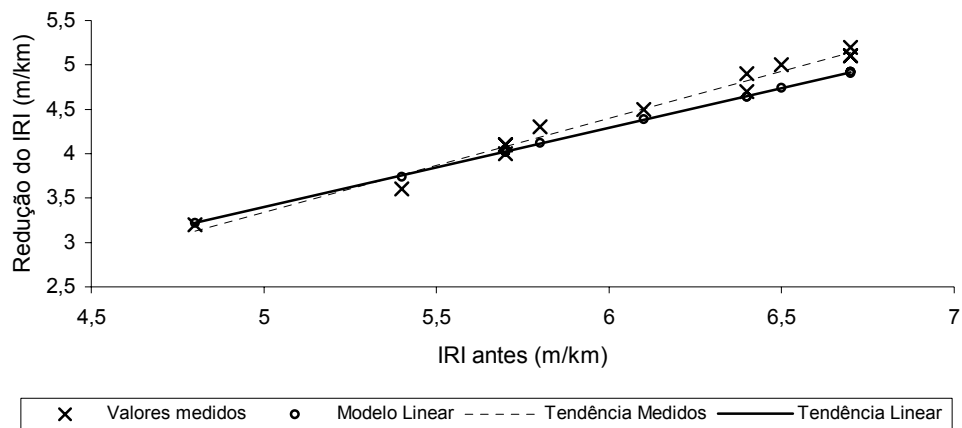


Figura 6.5: Rede com Base granular; pré misturado a frio; reperfilagem em 2 cm e recape de 5 cm de concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

## 6.2 Redes nas quais foram necessários ajustes das equações de previsão de redução de irregularidade longitudinal pós recape

Para as demais 9 redes este primeiro passo – comparar os valores medidos com os previstos pelos modelos linear e bilinear sem ajuste – apenas confirmou a necessidade de ajustar tais modelos para encontrar resultados mais de acordo com a realidade. A forma pela qual estes modelos são ajustados está apresentada no item 5.4 desta dissertação.

Dentre estas nove redes, em quatro delas o ajuste encontrado foi com um modelo linear, e nas cinco restantes, conforme um modelo bilinear.

As quatro redes em que o ajuste encontrado seguiu o padrão linear de comportamento foram:

**6.2.1- Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 3 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.6). Para este ajuste, os parâmetros encontrados foram:  $a_0 = a_2 = 2,2$ ;  $a_1=0$  e  $a_3 = 0,8$ . Os dados estão no Quadro C1, no Anexo C.

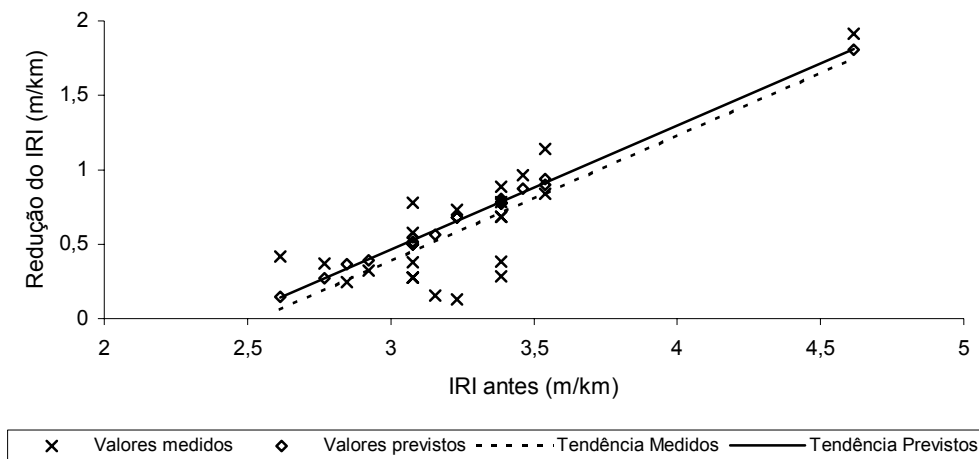


Figura 6.6: Rede com Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 3 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.2.2- Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 4 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.7). Para este ajuste, os parâmetros encontrados foram:  $a_0 = a_2 = 2,3$ ;  $a_1=0$  e  $a_3 = 0,8$ . Embora o modelo escolhido subestime a redução da irregularidade longitudinal, foi o que conduziu ao melhor ajuste entre os valores medidos e previstos. Dados no Quadro C2, no Anexo C.



**6.2.3- Base granular; pré misturado a frio; recape de 4,0 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.8). Para este ajuste, os parâmetros encontrados foram:  $a_0 = a_2 = 1,25$ ;  $a_1=0$  e  $a_3 = 0,7$ . Dados no Quadro C10, no Anexo C.

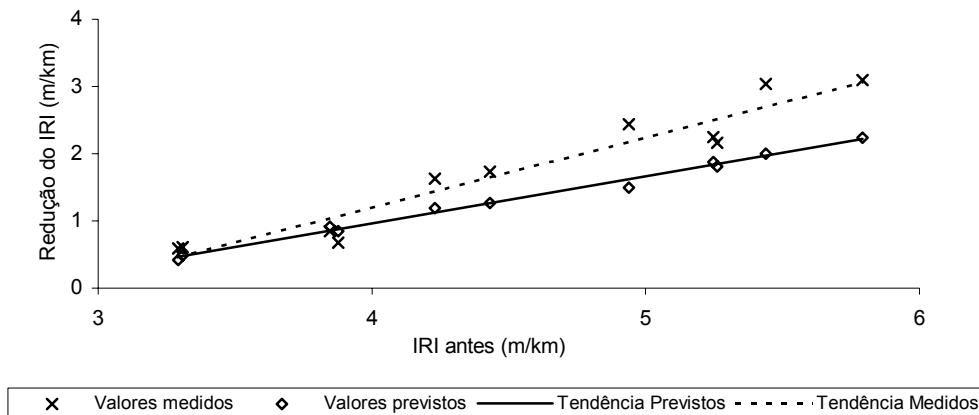


Figura 6.7: Rede com Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 4 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

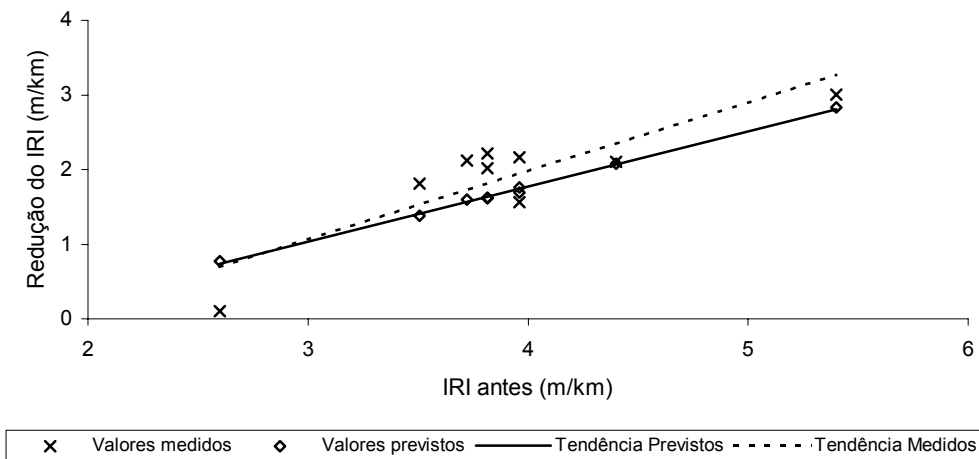


Figura 6.8: Rede com Base granular; pré misturado a frio; recape de 4 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.2.4- Base estabilizada; tratamento superficial duplo; recape de 4 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.9). Para este ajuste, os parâmetros encontrados foram:  $a_0 = a_2 = 1,0$ ;  $a_1=0$  e  $a_3 = 0,8$ . Dados no Quadro C14, no Anexo C.

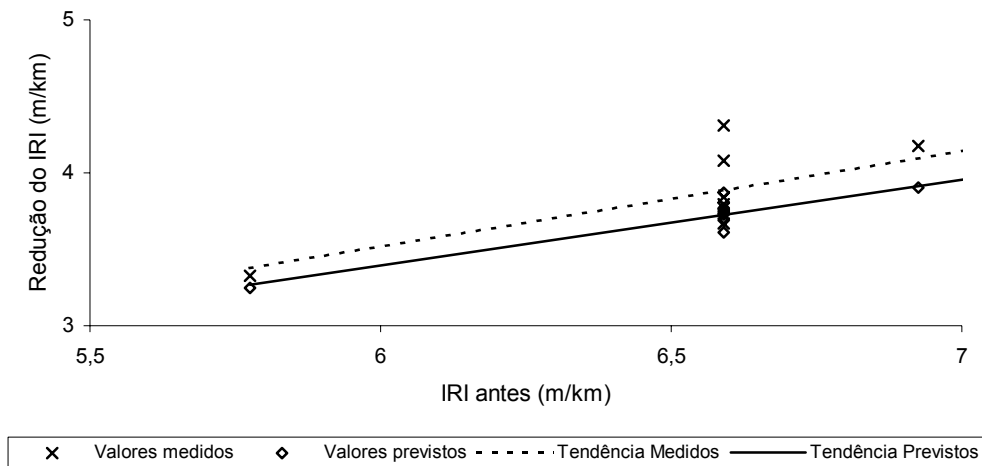


Figura 6.9: Rede com Base estabilizada; tratamento superficial duplo; recape de 4 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

Já para as cinco redes restantes, ajustes de acordo com um modelo bilinear foram feitos a fim de aproximar-se os valores previstos aos medidos. As cinco redes são:

**6.2.5- Base granular; concreto betuminoso usinado a quente; recape de 4 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.10). Os parâmetros de ajuste encontrados para este grupo de seções foram  $a_0 = 2,3$ ;  $a_1 = 1,0$ ,  $a_2 = 6,0$  e  $a_3 = 0$ . Dados estão no Quadro C8, no Anexo C.

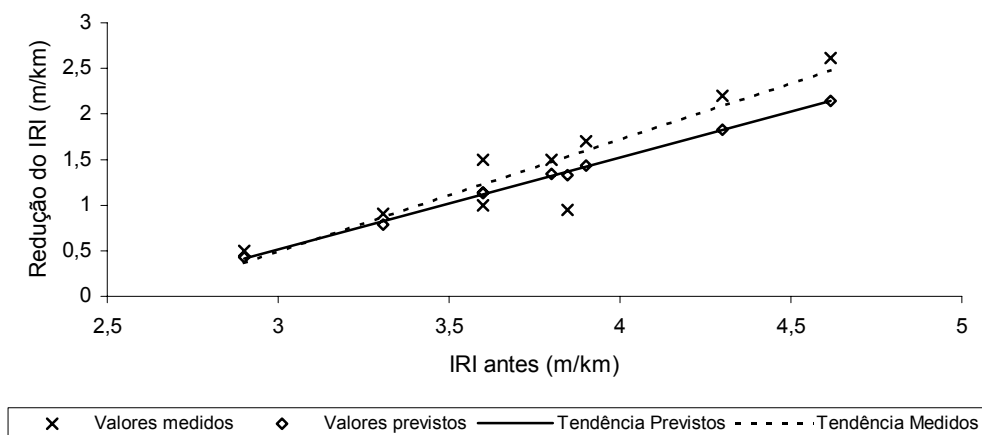


Figura 6.10: Rede com Base granular; concreto betuminoso usinado a quente; recape de 4 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.2.6- Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 6 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.11). Os parâmetros de ajuste encontrados para este grupo de seções foram  $a_0 = 2,6$ ;  $a_1 = 0,9$ ,  $a_2 = 7,0$  e  $a_3 = 0$ . Dados no Quadro C4, no Anexo C.

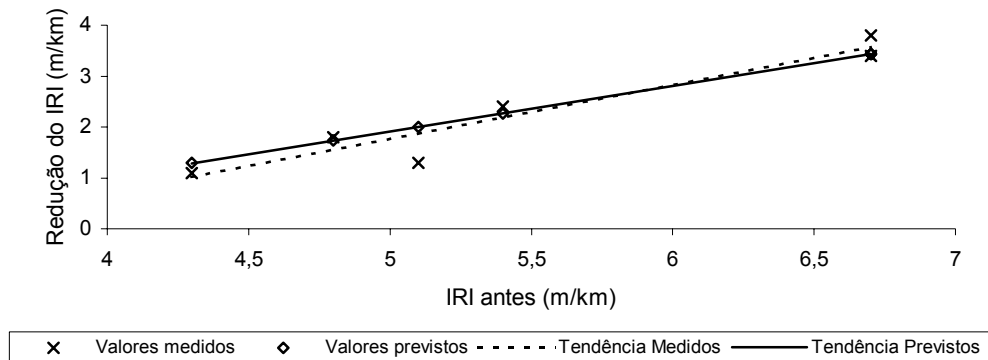


Figura 6.11: Rede com Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 6 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.2.7- Base granular; tratamento superficial duplo; reperfilagem em 2 cm e recape de 4 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.12). Os parâmetros de ajuste encontrados para este grupo de seções foram  $a_0 = 0,5$ ;  $a_1 = 0,9$ ,  $a_2 = 4,0$  e  $a_3 = 0$ . Dados no Quadro C6, no Anexo C.

Chama-se a atenção ao distinto comportamento entre os trechos analisados nas Figuras 6.11 e 6.12, que, apesar de receberem espessuras de recape finais idênticas, apresentam fortes diferenças nas reduções medidas da irregularidade. Tal diferença deve-se ao fato de que na rede representada pela Figura 6.11, o recape foi executado com uma camada apenas, já na rede da Figura 6.12, foi executada uma camada de 2 cm de reperfilagem com a finalidade de regularizar o pavimento previamente à execução da camada superior de 4 cm.

Logo, ao analisar estes dados, tem-se uma indicação de um melhor comportamento funcional ao executar-se uma obra de restauração em um pavimento da forma como foi feito nos trechos da rede representada no item 6.2.7 desta dissertação.

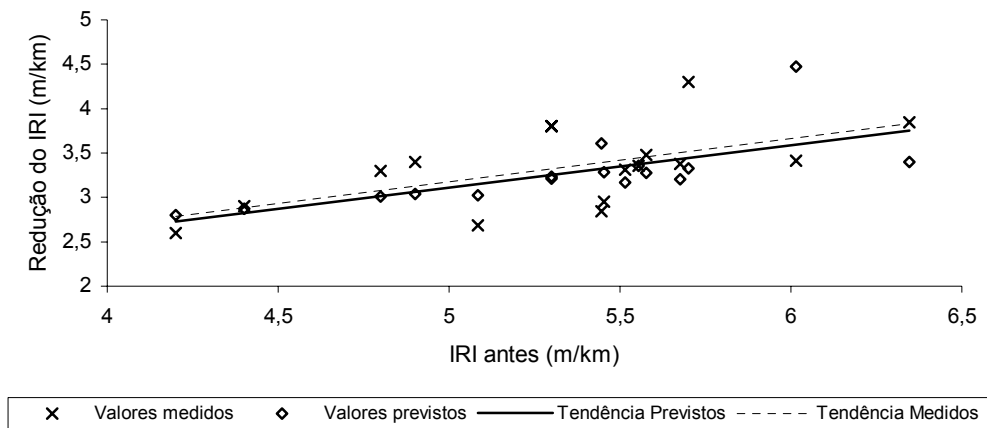


Figura 6.12: Rede com Base granular; tratamento superficial duplo; reperfilagem em 2 cm e recape de 4 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.2.8- Base granular; pré misturado a frio; reperfilagem de 2 cm e recape de 6 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.13). Os parâmetros de ajuste encontrados para este grupo de seções foram  $a_0 = 0,8$ ;  $a_1 = 0,9$ ,  $a_2 = 10,0$  e  $a_3 = 0$ . Mesmo com poucos dados colhidos para esta rede, nota-se que o modelo proposto apresenta valores quase idênticos de redução prevista, comparando-se com os valores medidos. Os dados estão no Quadro C13, no Anexo C.

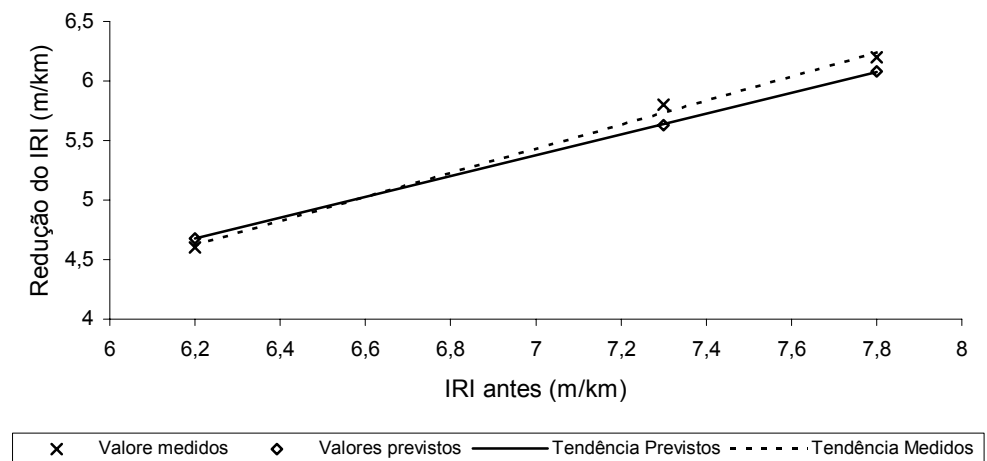


Figura 6.13: Rede com Base granular; pré misturado a frio; reperfilagem de 2 cm e recape de 6 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

**6.2.9- Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 8 cm em concreto asfáltico** (Figura 6.14). Os parâmetros de ajuste encontrados para este grupo de seções foram  $a_0 = 2,0$ ;  $a_1 = 0,9$ ,  $a_2 = 5,0$  e  $a_3 = 0$ . Dados no Quadro C5, no Anexo C.

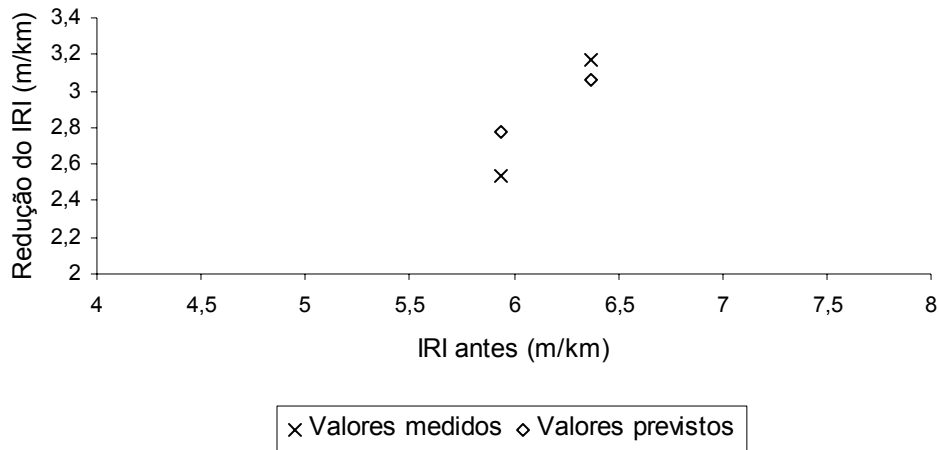


Figura 6.14: Rede com Base granular; tratamento superficial duplo; recape de 8,0 cm em concreto asfáltico – Comparação entre reduções previstas e medidas de IRI

Observa-se que para esta última rede também foram colhidos poucos dados (apenas duas seções), não podendo-se caracterizar um ajuste bilinear, porém os ajustes propostos foram os que melhor aproximaram os valores previstos dos medidos.

O fato do parâmetro ajustável  $a_3$  ser nulo indica que a redução do IRI independe do valor inicial da irregularidade longitudinal quando esta é muito elevada. Ou seja, a partir de um determinado valor inicial de irregularidade, a redução prevista é constante e não varia mais.

Em comunicação pessoal ao autor, o engenheiro Pierre Joubert (2001) do LCPC alertou da possibilidade de estar ocorrendo algum problema no programa HDM-4 versão 1.20 em relação ao parâmetro ajustável  $a_3$ . Ainda não está clara a influência deste no resultado final da magnitude da redução do IRI, podendo a redução ser realmente constante após o valor de  $a_2$ , ou mesmo sendo  $a_3$  um valor arbitrado pelo programa (sem que se tome conhecimento de qual seja).

### **6.3 Proposta de ajuste dos parâmetros das equações de previsão da irregularidade longitudinal após recape contidas no programa HDM-4.**

Para as rodovias estudadas nesta dissertação, podem-se propor valores aos parâmetros ajustáveis ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ ) da equação 3.1 que prevê, no programa HDM-4, a redução da irregularidade longitudinal após recape.

O agrupamento dos dados coletados destes nove trechos, apresentou tendências claras de seu comportamento frente aos recapes. Evidencia-se, quando se trata de recapes na ordem de 3 a 5 cm de concreto asfáltico, um comportamento linear da redução da irregularidade longitudinal. Das sete redes que receberam recapes desta magnitude, o ajuste com um modelo linear foi satisfatório em seis. Já para as outras sete redes, onde os recapes foram da ordem de 6 a 8 cm, em cinco delas o ajuste deu-se com um modelo bilinear de redução da irregularidade longitudinal. O Quadro 6.1 sintetiza os resultados das tentativas de ajuste.

### **6.4 Comentários sobre os agrupamentos de seções e sobre os ajustes propostos**

A forma na qual foram agrupados os dados neste estudo mostrou-se satisfatória, já que para cada rede, com diversos segmentos homogêneos de características semelhantes, encontraram-se bons ajustes aos parâmetros da equação que prevê, no programa HDM-4, a redução da irregularidade longitudinal pós recape.

Isto fica evidenciado ao analisar-se as Figuras 6.15 a 6.17, nas quais apresentam-se valores de redução de irregularidade medidos e previstos pelos modelos incluídos no programa HDM-4. Nestas figuras incluem-se todos os valores medidos e previstos para as diversas redes, unindo-as conforme o modelo de ajuste encontrado (sem ajuste, linear ajustado e bilinear ajustado).

Quadro 6.1: Agrupamento das Redes quanto ao modelo de ajuste encontrado

Redes				Modelo encontrado de ajuste
n°	Tipo de Base	Revestimento original	Espessura do Recape	
01	Granular	TSD	3,0 cm	Linear ajustado
02	Granular	TSD	4,0 cm	Linear ajustado
03	Granular	TSD	5,0 cm	Linear
04	Granular	CBUQ	3,0 cm	Linear
05	Granular	CBUQ	4,0 cm	Bilinear ajustado
06	Granular	PMF	4,0 cm	Linear ajustado
07	Estabilizada <sup>(1)</sup>	TSD	4,0 cm	Linear ajustado
08	Granular	TSD	6,0 cm	Bilinear ajustado
09	Granular	TSD	Reperf. de 2,0 cm + 4,0 cm de recape	Bilinear ajustado
10	Granular	CBUQ	6,0 cm	Linear <sup>(2)</sup>
11	Granular	PMF	6,0 cm	Bilinear
12	Granular	PMF	Reperf. de 2,0 cm + 5,0 cm de recape	Linear
13	Granular	PMF	Reperf. de 2,0 cm + 6,0 cm de recape	Bilinear ajustado
14	Granular	TSD	8,0 cm	Bilinear ajustado

<sup>(1)</sup> Base de saibro estabilizado granulometricamente com basalto

<sup>(2)</sup> O modelo bilinear apresentou um bom ajuste para os valores iniciais da redução

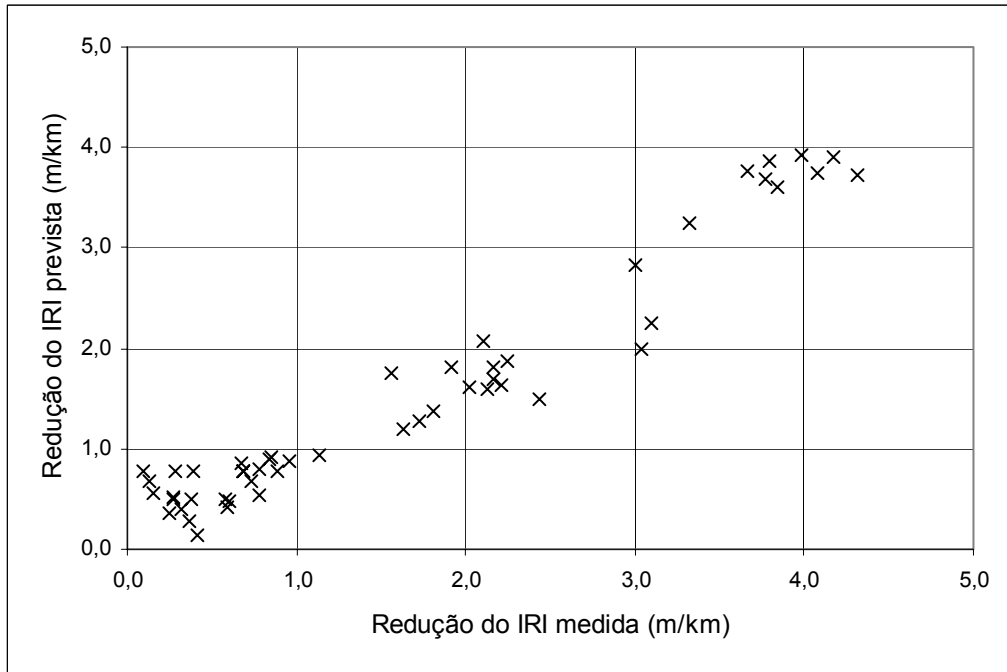


Figura 6.15: Comparação entre valores medidos e previstos para redes sem ajuste

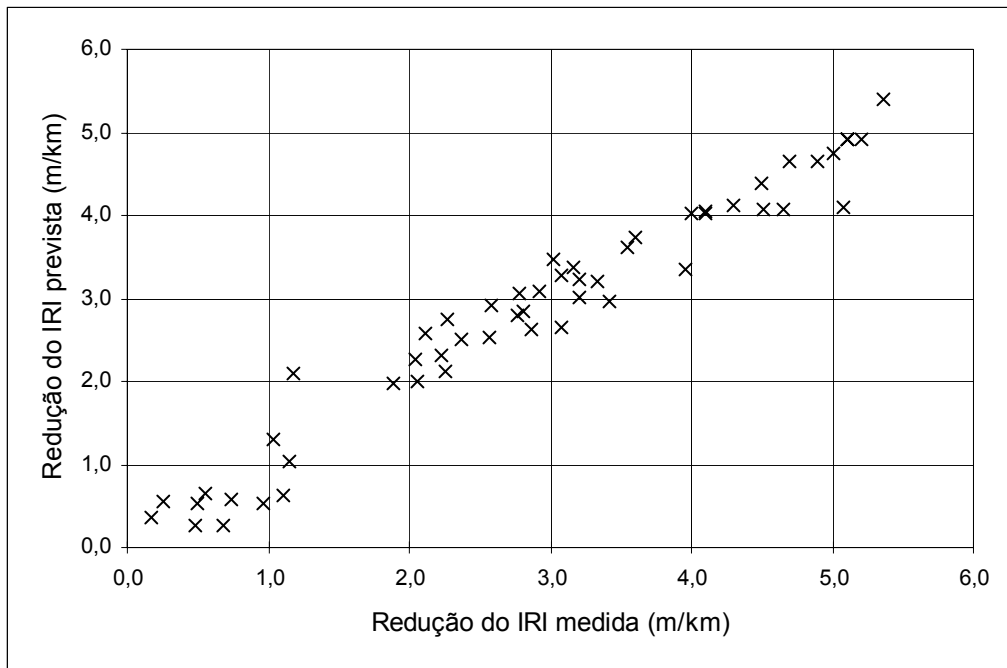


Figura 6.16: Comparação entre valores medidos e previstos para redes com ajuste segundo um modelo linear



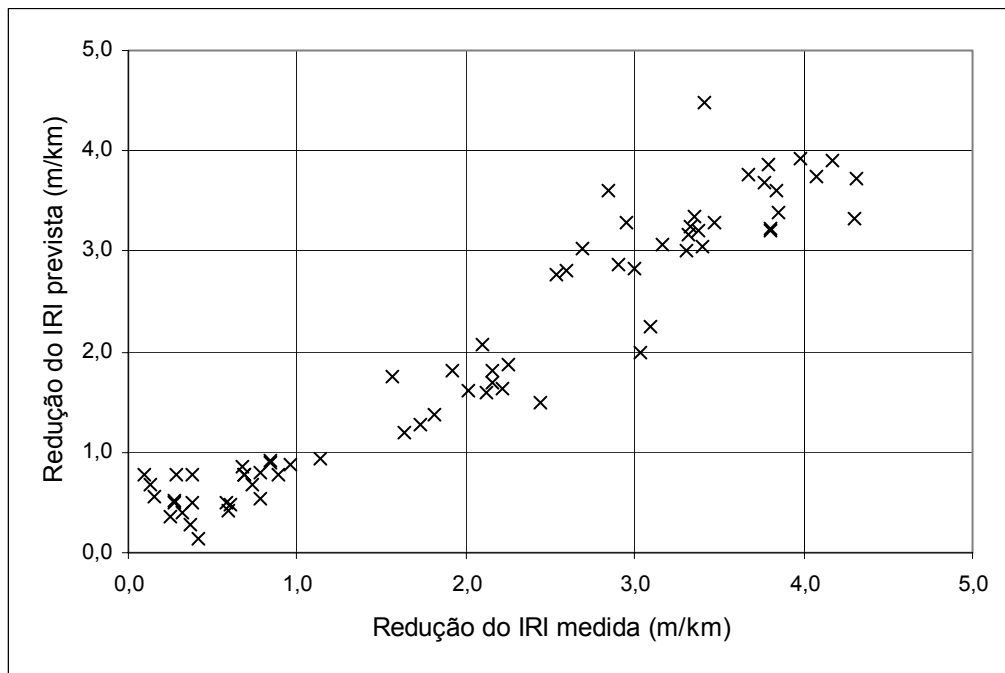


Figura 6.17: Comparação entre valores medidos e previstos para redes com ajuste segundo um modelo bilinear

### 6.5 Valores encontrados para os parâmetros ajustáveis do modelo contido no HDM-4

O Quadro 6.2 agrupa todos os valores dos parâmetros de ajuste do modelo de previsão de redução da irregularidade longitudinal pós recape, encontrados para as 9 redes onde os valores padrões do programa não apresentaram satisfatória correlação de suas previsões com as reduções medidas.

Quadro 6.2: Valores encontrados para os parâmetros de ajuste do modelo contido no HDM-4

Pavimento existente	Espessura do recape	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Base Granular e TSD	3 cm	2,2	0	2,2	0,8
Base Granular e TSD	4 cm	2,3	0	2,3	0,8
Base Granular e PMF	4 cm	1,25	0	1,25	0,7
Base Estabilizada e TSD	4 cm	1,0	0	1,0	0,8
Base Granular e CBUQ	4 cm	2,3	1,0	6,0	0,0
Base Granular e TSD	6 cm	2,6	0,9	7,0	0,0
Base Granular e TSD	8 cm <sup>(1)</sup>	0,5	0,9	4,0	0,0
Base Granular e PMF	8 cm <sup>(1)</sup>	0,8	0,9	10,0	0,0
Base Granular e TSD	8 cm	2,0	0,9	5,0	0,0

<sup>(1)</sup> Reperfilagem de 2 cm e Recape em Concreto Asfáltico de 6 cm

## 6.6 Relação entre as espessuras de recape executadas e os modelos de previsão encontrados

Para as rodovias analisadas é possível estabelecer uma relação entre a espessura de recape executada e os modelos de previsão de redução da irregularidade longitudinal do programa HDM-4:

Para espessuras de recape em concreto asfáltico com até 5 cm os melhores ajustes aconteceram segundo um modelo linear e os parâmetros ajustáveis variaram conforme o Quadro 6.2 :

$$a_0 = a_2 \text{ variam entre 1 e 2,3;}$$

$$\text{e } a_3 \text{ varia entre 0,7 e 0,8}$$

Para espessuras de recape em concreto asfáltico superiores a 5 cm, os ajustes ocorreram segundo um modelo bilinear com os valores dos parâmetros ajustáveis também apresentados no Quadro 6.2:

$a_0$  varia entre 0,5 e 2,6;

$a_1$  varia entre 0,9 e 1,0; e

$a_2$  varia entre 4,0 e 10,0

### 6.7 Relação entre os valores encontrados de $a_1$ com as espessuras de recape executadas

O valor do parâmetro ajustável  $a_1$  determina se o modelo segue um comportamento linear ou bilinear. Se este parâmetro for nulo (igual a zero), tem-se um modelo linear; no entanto, qualquer que seja o valor acima de 0,0 para este parâmetro, tem-se, então, um modelo bilinear.

Na Figura 6.18 apresenta-se a relação entre este parâmetro com as espessuras executadas de recape nas rodovias analisadas nesta dissertação. Observa-se que para espessuras de recape de até 5 cm o modelo linear prevê melhor a redução do IRI (em 6 dos 7 casos), ao passo que para espessuras de recape superiores a 5 cm, em 5 dos 7 casos a melhor previsão se deu segundo o modelo bilinear.

Chama-se atenção para o fato de que na Figura 6.18 estão representadas 14 redes, havendo superposição de pontos; ou seja, em mais de uma rede executaram-se recapes com a mesma espessura.

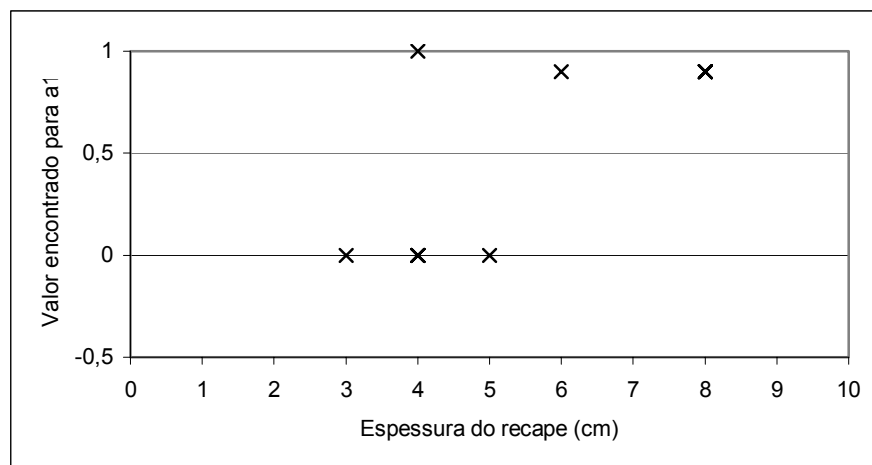


Figura 6.18: Relação entre valores de  $a_1$  e espessura de recape executada

### 6.8 Relação entre os valores encontrados de $a_1$ com a irregularidade longitudinal medida antes da execução do recape

Seguindo a mesma linha de raciocínio, é apresentada na Figura 6.19 a correlação encontrada entre os valores do parâmetro  $a_1$  ajustados para as rodovias analisadas nesta dissertação e a magnitude da irregularidade longitudinal medida antes da execução dos recapes em concreto asfáltico.

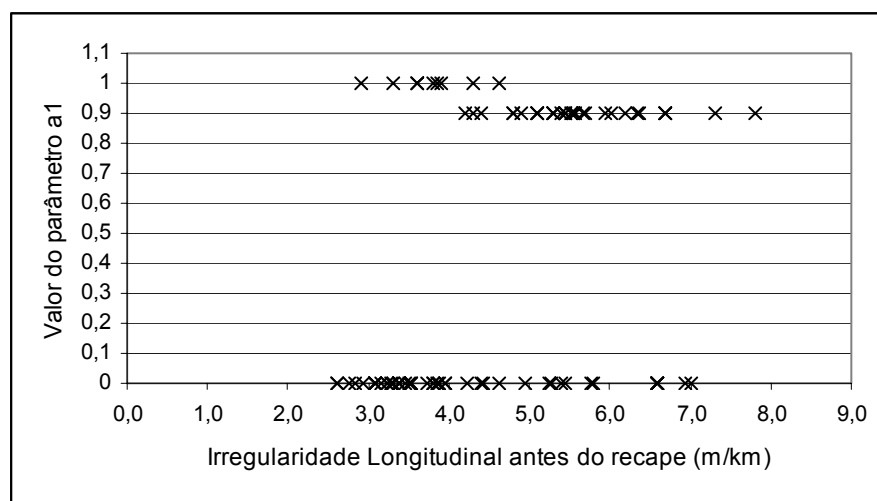


Figura 6.19: Relação entre  $a_1$  e Irregularidade longitudinal antes do recape

A Figura 6.19 mostra que não há relação entre o IRI anterior ao recape e o modelo de previsão de redução adotado.

### 6.9 Proposta de Modelo de previsão da redução da irregularidade longitudinal para pavimentos com características semelhantes aos analisados

Atendendo a um dos objetivos secundário desta dissertação, propõe-se um modelo estatístico de previsão da redução da irregularidade longitudinal em função da espessura de recape executada e da magnitude da irregularidade pré-recapada. Buscou-se, também, correlacionar a estes fatores o Número Estrutural Corrigido (SNC), porém este parâmetro não se mostrou significativo.

Como apresentado na Figura 6.20, a distribuição dos dados coletados segue, aproximadamente, uma distribuição Normal, com média de redução da irregularidade longitudinal na ordem de 2,5.

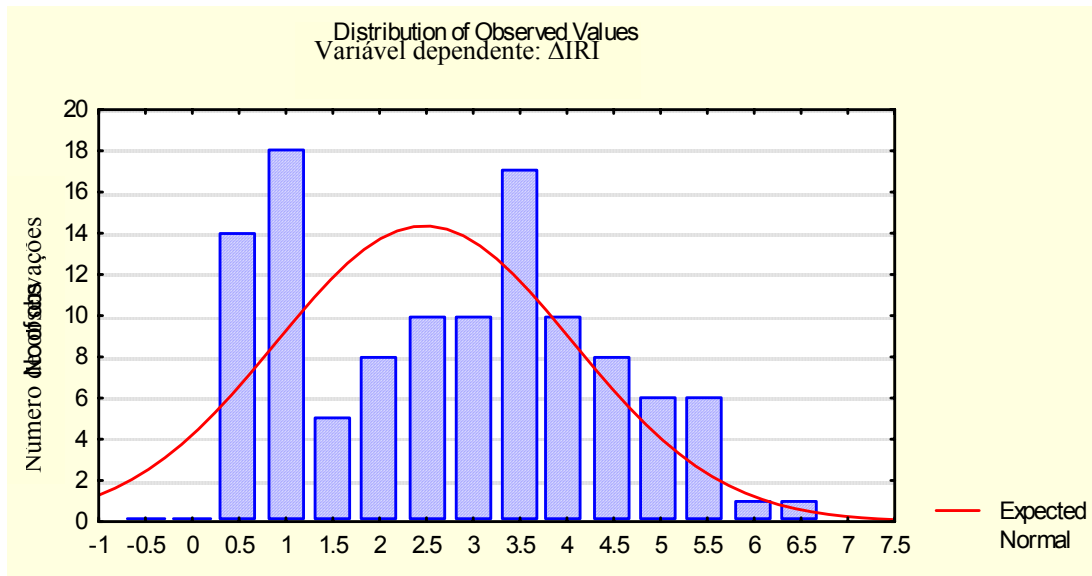


Figura 6.20 – Distribuição normal dos dados coletados

### 6.9.1 Análise de regressão múltipla

Com o auxílio do software STATISTICA, obteve-se o seguinte modelo de regressão linear múltipla:

$$\Delta IRI = 0,31.Esp + 0,87.IRI_{antes} - 3,17 \quad (6.1)$$

onde:  $\Delta IRI$  é a redução prevista da irregularidade longitudinal pós recape (em m/km);  $Esp$  é a espessura, em centímetros, do recape executado ( $3 \leq Esp \leq 8$ ); e  $IRI_{antes}$  é o a irregularidade longitudinal, em m/km, medida antes recape ( $2 \leq IRI_{antes} \leq 7$ ).

O modelo é muito significativo, com um valor coeficiente de determinação ( $r^2$ ) na ordem de 0,97, ou seja aproximadamente 97% da variabilidade total é explicada pela regressão.

A distribuição F (Nanni e Ribeiro, 1992) também é empregada para testar significância de regressões. O STATISTICA calculou  $F_{0,05}(2, 111) = 1912$  valor muito maior ao tabelado  $F_{0,05}(2, 111)_{TAB} = 3,07$ ; ou seja trata-se de um modelo muito forte.

A significância desta regressão múltipla também pode ser constatada na Figura 6.21, onde são plotados os valores previstos e observados. A reta (na escala logarítmica) é a expressão gráfica da equação de ajuste (Equação 6.1) e as hipérboles definem o intervalo de confiança de 95% para os valores previstos. Observa-se que a maioria dos pontos estão dentro desse intervalo e os restantes muito próximos.

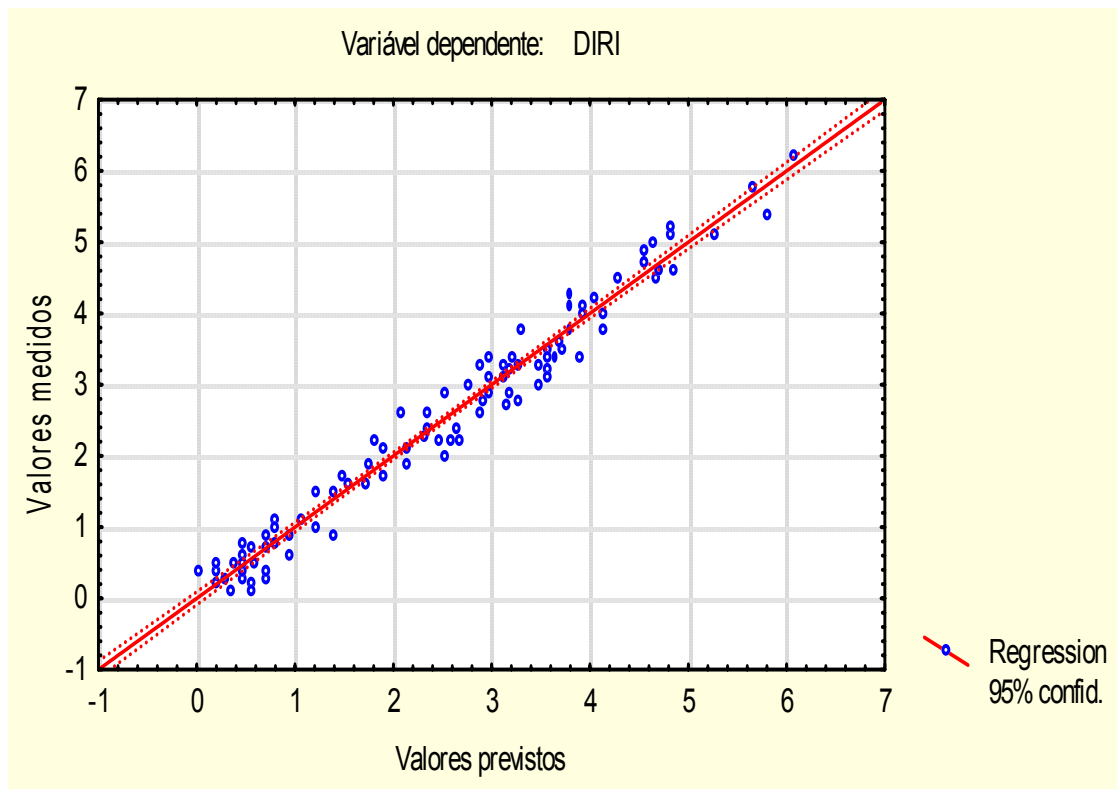


Figura 6.21 – Comparação entre valores observados e previstos pela análise determinística

Observa-se, também, que a distribuição dos resíduos (valor previsto – valor observado) segue uma função normal com média zero, como apresentado na Figura 6.22. Este é uma das hipóteses básicas nas análises estatísticas.

A Figura 6.23 apresenta um gráfico de superfície correlacionando as três variáveis estudadas nesta regressão, demonstrando como comporta-se cada parâmetro com relação ao outro. Tem-se no eixo X os valores da irregularidade antes do recape, em Y as espessuras de recape e em Z a redução da irregularidade após recape.

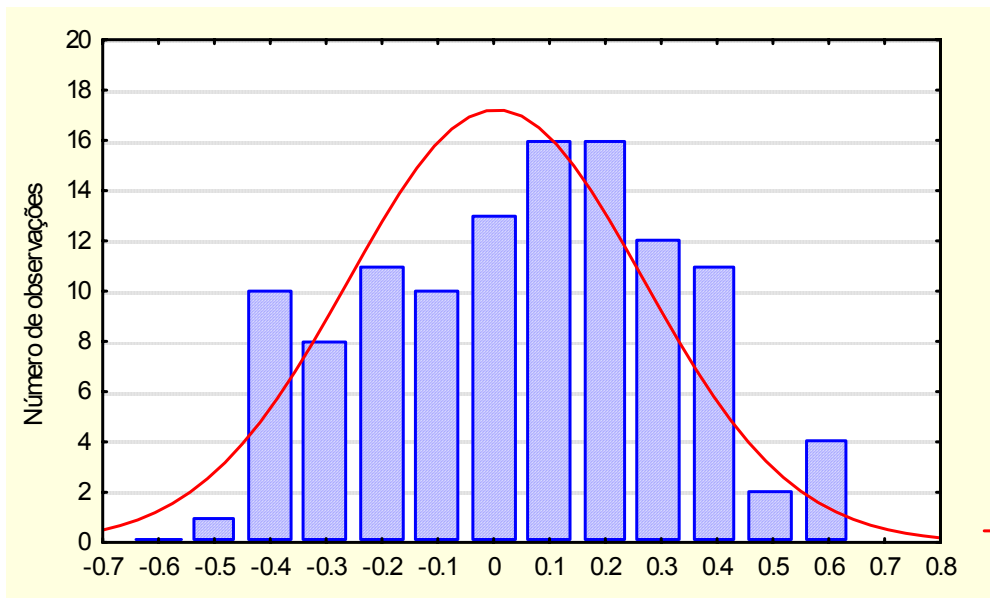


Figura 6.22 – Histograma dos resíduos (média 0)

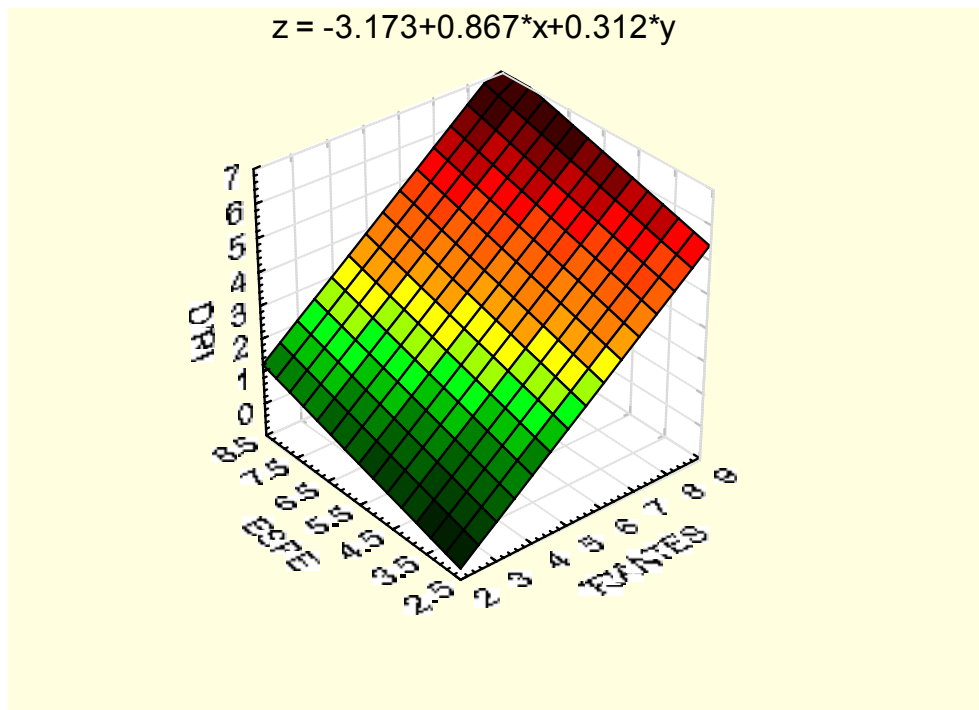


Figura 6.23 – Gráfico de superfície do modelo de previsão encontrado

A Figura 6.23 evidencia que a redução da irregularidade de um pavimento é diretamente proporcional à espessura do recape e ao IRI prévio à execução do recape.

## 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

### 7.1 Conclusões

O desenvolvimento desta dissertação conduziu às seguintes conclusões:

- a) Existem diferenças entre as previsões de redução da irregularidade longitudinal pós recape aplicando-se os modelos linear e bilinear contidos no programa HDM-4.
- b) As diferenças encontradas entre as reduções imediatas na irregularidade longitudinal pós recape previstas pelos modelos linear e bilinear, ocasionam significativas distinções na evolução deste parâmetro com o tempo; ou seja, o tempo para que o pavimento apresente determinado nível de degradação pode variar significativamente segundo o modelo escolhido para a análise.
- c) Entre os parâmetros de entrada do programa HDM-4, o único que influencia significativamente a redução da irregularidade é o valor da irregularidade prévia ao recape. Isto é mais notável para valores iniciais de IRI iguais ou maiores do que 6,0 m/km.
- d) O agrupamento dos dados coletados em função da estrutura do pavimento existente e da espessura do recape executada mostrou-se bastante adequado. Foram encontrados bons ajustes entre irregularidades previstas e medidas para as 14 redes distintas, o que comprova a correlação entre as seções que compõe cada rede.
- e) Das 14 redes criadas para este estudo (totalizando 139 seções), em 5 constatou-se boa concordância entre as reduções da irregularidade medidas com as previstas por algum dos modelos contidos no programa HDM-4 (linear ou bilinear) sem a necessidade de ajuste de parâmetros.



- f) Para 4 redes a redução do IRI com o recape foi melhor ajustada segundo um modelo linear, com parâmetros ajustáveis, e para as 5 restantes as melhores previsões foram obtidas com o emprego de um modelo bilinear, também com parâmetros ajustáveis.
- g) Para recapes em concreto asfáltico com espessura até 5 cm, o modelo linear é o que melhor prevê a redução da irregularidade longitudinal. Os valores ajustáveis ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ ) da equação 3.1

$$\Delta IRI = \max\{0; a_1 [\min(a_2; RI_{bw}) - a_0] + a_3 \max[0; (RI_{bw} - a_2)]\}$$

propostos para estes casos são:

- $a_0$  (=  $a_2$ ) variando entre 1,0 e 2,3;
  - $a_1 = 0$  ; e
  - $a_3$  variando entre 0,7 e 0,8
- h) Para recapes em concreto asfáltico executados com espessuras superiores a 5 cm (somando-se reperfilagem quando necessário), o modelo bilinear é o que melhor prevê a redução da irregularidade longitudinal. Os valores ajustáveis propostos a estes casos são:
- $a_0$  variando entre 0,5 e 2,6;
  - $a_1$  variando entre 0,9 e 1,0;
  - $a_2$  variando entre 4 e 10; e
  - $a_3 = 0$
- i) Com base nos dados colhidos para o estudo e auxílio do programa computacional STATISTICA, obteve-se o seguinte modelo de previsão da redução de irregularidade longitudinal pós recapes em concreto asfáltico.

$$\Delta IRI = 0,31.Esp + 0,87.IRI_{antes} - 3,17$$

onde:  $\Delta IRI$  é a redução prevista da irregularidade longitudinal pós recape (em m/km);  $Esp$  é a espessura, em centímetros, do recape executado ( $3 \leq Esp \leq 8$ ); e  $IRI_{antes}$  é a irregularidade longitudinal, em m/km, medida antes recape ( $2 \leq IRI_{antes} \leq 7$ ).

Este modelo apresenta um elevado coeficiente de determinação ( $r^2 \cong 97\%$ ) e poderá ser empregado para estimar a redução da irregularidade longitudinal, em futuros projetos de restauração de rodovias com características semelhantes às dos 9 trechos analisados.

## 7.2 Sugestões para futuros estudos

Com o objetivo de dar continuidade no estudo desenvolvido nesta dissertação, aumentar o conhecimento sobre a malha rodoviária do Estado do Rio Grande do Sul, e tornar as previsões dos modelos contidos no programa HDM-4 ainda mais próximas dos valores encontrados na prática, são feitas as seguintes sugestões:

- a) Medir ao longo dos anos a irregularidade longitudinal nos 9 trechos analisados para conhecer a forma pela qual evolui este parâmetro.
- b) Avaliar e medir a evolução de outros parâmetros relativos a degradação dos pavimentos, tais como o aparecimento e evolução de: trincas, panelas e dos afundamentos de trilha de roda. Com isto, não só será aumentado o conhecimento do comportamento da malha, como será possível ajustar outros modelos de previsão do programa HDM-4.
- c) Dar continuidade na aquisição de dados relativos aos recapes executados em outras rodovias, medindo a irregularidade longitudinal antes e após, a fim de aprimorar o modelo de previsão de redução proposto nesta dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCHUELO, M.A. E VIADA, F.A. (2001). Experimento internacional para la armonización de medidas de regularidad superficial. Proyetos Even y Filter. Revista Rutas, Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, Espanha, n.85-2ªÉpoca, p9-21.
- AUTRET, Paul (1989). Routes dans des régions en développement. Rapports des laboratoires, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. France. 64p.
- BALBO, J.T. (1997). Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção. José Tadeu Balbo, São Paulo, SP, Editora Plêiade, 1997, 103p.
- BRILLET, F. (2000). Le modèle HDM-III de la Banque Mondiale: Résultats de recherches menées au LCPC. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. n227. LCPC. Paris, France. p3-14.
- BRILLET, F. e LEPERT, P. (1999). Une recherche menée dans le cadre europeén: le contrat PARIS (Performance Analysis of Road InfraStructure) d'analyse du comportement des infrastructures routières. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 223, LCPC, France. p13-25.
- BUSTOS, M. e outros (1998). Calibration of performance models for jointed plain concrete pavements using long-term pavement performance database. Transportation Research Record 1629, TRB, National Research Council, Washington, DC.,1998, p108-116.
- CRRRI (1982). Road user cost study in India. Final Report, New Delhi: Central Road Research Institute.
- DNER (1985) – “Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade tipo-respostas – DNER – PRO 164/85”. 19p.

- DNER (1986) – “Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo-resposta – DNER – ES – 173/86”. 15p.
- DNER (1987) – “medição da irregularidade de superfície de rodovias com medidores tipo-resposta – DNER – PRO 182/87”. 12p.
- DNER (1998). Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Brasil. 297p.
- FERNANDES JR, J.L. (2001). Sistemas de gerência de pavimentos urbanos para cidades de médio porte. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Transportes. São Carlos, SP. 105p.
- HAAS, R. (2001). Reiventing the (pavement management) wheel. Fifth International Conference on Menaging Pavements. Seatle, Washingtonm USA. 46p.
- HAAS, R. e HUDSON, W.R. (1978). Pavement management systems. McGraw-Hill. Nova Iorque, NI, EUA. 457p.
- HASSAN, R.; McMANUS, K.; e HOLDEN, J. (1999). Predicting pavement deterioration modes using waveband analysis. Transportation Research Record 1652, TRB, National Research Council, Washington, DC.,1999, p181-187.
- HEYN, A.T., KANIAK, V.L., ARANOVICH, L.A.S. (1988). Estudo de três procedimentos para a medição de irregularidade longitudinal em pavimento. Reunião Anual de Pavimentação, 23, Florianópolis, SC. Anais...Rio de Janeiro: ABPv, 1988, V4, p1557-1575.
- HIDE, H. (1982). Vehicle operating costs in the Caribbean: results of a survey of vehicle operators. TRRL Laboratory Report 1031. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- HUANG, Y.H. (1993). Pavement analysis and design. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 805p.
- JOUBERT, P.(2001). Comunicação pessoal ao autor sobre o parâmetro ajustável  $a_3$ .
- KERALI, H.R. (1995). HDM-4 – A guide to calibration and adaptation. Version 1.0. World Road Association. Manual do programa HDM-4 (CD-ROM). Volume 4.
- KERALI, H.R. (1995b). HDM-4 – Vue d’ensemble de HDM-4. Association Mondiale de la Route. Manual do programa HDM-4 (CD-ROM). Volume 1.

- LERCH, R.L.; NÚÑEZ, W.P., CERATTI, J.A.P., JOUBERT, P. (2001). Previsão de irregularidade longitudinal de revestimentos asfálticos após recapes: comparação entre os modelos bilinear do HDM-III e linear proposto no HDM-4. Reunião Anual de Pavimentação, 33, Florianópolis, SC. Anais...Rio de Janeiro: ABPv, 2001, CD-ROM.
- MARCON, A.F.(1996). Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 391p.
- MARCON, A.F., APS, M., CARDOSO, S.H. (1996). Conseqüências do uso inadequado de modelos de previsão de desempenho em sistemas de gerência de pavimentos. Reunião Anual de Pavimentação, 30, Salvador, BA. Anais...Rio de Janeiro: ABPv, 1996, volume 4. p2028-2036.
- McGHEE, K.K.(2000). Measuring smoothness of Virginia's asphalt overlays. Transportation Research Record 1712, TRB, National Research Council, Washington, DC.,2000, p 86-92.
- MEDINA. J. (1997). Mecânica dos Pavimentos. Jacques de Medina, Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997. 380p.
- MOROSIUK, G, e ABAYNAYAKA, S.W.(1982). Vehicle operating costs in the Caribbean: na experimental study of vehicle performance. TRRL Laboratory Report 1056. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- NANNI, L.F.E RIBEIRO, J.L.D. (1992). Projeto e avaliação de experimentos. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, Caderno de Engenharia 17.
- NÚÑEZ, W.P. (1997). Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 271p.
- ODOKI, J.B. (2001). Effects of overlays on roughness. HDM-4 Working paper. The University of Birmingham, UK. 8p.
- PATERSON, W.D e SCULION, T. (1990). Information systems for road management: draft guidelines on system design and data issues. The World Bank. Policy planning and research staff. Infrastructure and urban development departament. 126p.

- PERERA, R. e KOHN, S.D. (1999). International roughness index of asphalt concrete overlays: analysis of data from long-term pavement performance program SPS-5 projects. Transportation Research Record 1655, TRB, National Research Council, Washington, DC.,1999, p100-109.
- PINTO, S., e PREUSSLER, E. (2001). Pavimentação Rodoviária. Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis, Rio de Janeiro, RJ, Copiarte, 259p.
- QUEIROZ, C.A. (1982). Modelos de desempenho de pavimentos: desenvolvimento e aplicação. Rio de Janeiro, RJ. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 66p.
- QUEIROZ, C.A. (1984). Modelos de previsão do desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil. Ministério dos Transportes, GEIPOT. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. 366p.
- ROHDE, G.T., JOOSTE, F., SADZIK, E. E HENNING, T.(1998). The calibration and use of HDM-IV performance models in a pavement management system. In Home Page: HTC Infrastructure Management Ltd (<http://www.htc.co.nz>). New Zealand. 20p.
- ROHDE, G.T., PINARD, M.I., e SADZIK, E. (1997). Long-Term network performance: function of pavement management system maintenance selection policy. Transportation Research Record 1592, TRB, National Research Council, Washington, DC. 1997, p1-7.
- SALEH, M.F., MAMLOUK, M.S. e OWUSSU-ANTWI, E.B. (2000). Mechanistic roughness model based on vehicle-pavement interaction. . Transportation Research Record 1699, TRB, National Research Council, Washington, DC.,2000, p114-120.
- SMITH, K.L., SMITH, K.D., HOERNER, T.E. e DARTER, M.I. (1997). Effect of initial pavement smoothness on future smoothness and pavement life. Transportation Research Record 1570, TRB, National Research Council, Washington, DC.,1997, p60-69.
- SOUZA, R.O., FARIAS, M.M. E SHIMOISHI, J.M. (2001). Estado da arte sobre medição da irregularidade longitudinal em pavimentos asfálticos. Reunião Anual de Pavimentação, 33, Florianópolis, SC. Anais...Rio de Janeiro: ABPv, 2001, CD-ROM.
- SRSEN, M., KRSIC, I.(2001). Maintenance and rehabilitation of county and local roads of central area in Croatia. Second international symposium on maintenance and

rehabilitation of pavements and technological control. Auburn, Alabama, EUA. CD-ROM. Paper 01-144, 15p.

SUN, L., ZHANG, Z. E RUTH, J. (2001). Modeling indirect statistics of surface roughness. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Reston, VA, USA, vol 127, n.2, p105-111.

ULLIDTZ, P. (1987). Pavement analysis. Elsevier Science Publishers. New York, USA. 372p.

VIDELA, C. E GAETE, R. (1994). Una metodología de optimización económica para la definición de políticas de conservación en pavimentos asfálticos. Revista Rutas, n42, Maio/Junho, 1994. p23-32.

## SUGESTÃO DE LEITURAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO (1993). Guide for design of pavement structures. Washington, D.C.
- CALLAO, R.A. (1999). Economic decision model for low-volume roads. Transportation Research Record 1652, TRB, National Research Council, Washington, DC.,1999, p18-30.
- JOHNSTON, M.G. (2001). Estudo de obtenção de número estrutural em pavimentos flexíveis. Trabalho de conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 168p.
- KANNEMEYER, L. e VISSER, A.T. (1995). Calibration of HDM-III performance models for use in pavement management of South African national roads. Transportation Research Record 1508, TRB, National Research Council, Washington, DC.,1997, p31-38.
- MACTUTIS, J.A., ALAVI, S.H. e OTT, W.C. (2000). Investigation of relationship between roughness and pavement surface distress based on WesTrack project. Transportation Research Record 1699, TRB, National Research Council, Washington, DC.,2000, p107-113.
- MELIS, M.J. (1992). Cálculo del IRI de una carretera a partir de su perfil longitudinal. Revista Rutas, Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, Espanha, n.30-2ªÉpoca, p26-33.
- MOK, H.T., e SMITH, R.E. (1997). Prediction of highway performance monitoring system's present serviceability rating for local agencies using San Francisco Bay area pavement management system. Transportation Research Record 1592, TRB, National Research Council, Washington, DC. 1997, p107-115.



- NÚÑES, W.P., CERATTI, J. e OLIVEIRA, J.A.. (1996). A escolha de um critério de avaliação para as pistas experimentais solicitadas pelo simulador de tráfego UFRGS/DAER. Reunião Anual de Pavimentação, 30, Salvador, BA. Anais...Rio de Janeiro: ABPv, 1996, volume 2. p894-921.
- OLIVEIRA, M.E.D. e DOMINGUES, F.A. (2001). Processo para determinação de níveis de aceitabilidade da irregularidade de pavimentos de rodovias brasileiras em função de seu padrão funcional. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. 2001. Auburn, Alabama, USA. CD-ROM, paper nº01-014. 10p.
- PINTO, S., e PREUSSLER, E. (1998). Avaliação de pavimentos rodoviários. Ministérios dos Transportes, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. 41p.
- RODRIGUES, R.M. (2000). Apostila do curso de Gerência de Pavimentos, ministrado no PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS, 2000. 154p.
- ROUILLARD, V., BRUSCELLA, B. E SEK, M. (2000). Classification of road surface profiles. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Reston, VA, USA, vol 126, n.1, p41-45.
- SENÇO, W. (1997). Manual de técnicas de pavimentação, volume I, Wlastermiler de Senço, São Paulo, SP, Editora Pini, 1997, 746p.
- SENÇO, W. (2001). Manual de técnicas de pavimentação, volume II, Wlastermiler de Senço, São Paulo, SP, Editora Pini, 2001, 671p.
- TILLOTSON, H.T., KERALI, R. e ODOKI, J.B. Road maintenance management. In Home Page: Indian Institute of Science (<http://www.iisc.ernet.in>). Current issue, volume 75 nº8. Article 26. 7p.
- ULLIDTZ, P. (1998). Modeling flexible pavement response and performance. Technical University of Denmark, Polyteknisk Forlag. Lyngby, Dinamarca. 205p.

## ANEXO A: EQUAÇÕES DOS MODELOS DE PREVISÃO DO IRI DO PROGRAMA HDM-4

Os modelos de previsão de desempenho da irregularidade longitudinal desenvolvidos para o programa HDM-4 estão a seguir resumidos. Estas equações estão apresentadas no Manual do Usuário do programa HDM-4 contido no CD-ROM de instalação.

- Componente estrutural na irregularidade longitudinal (relacionado à deformação no pavimento causada pela tensão cisalhante consequente da aplicação de carga de tráfego):

$$\Delta RI_s = a_0 e^{(mK_{gm} AGE^3)(1+SNPK_b)^{-5}} YE4, \quad (A1)$$

$$SNPK_b = MAX[(SNP_a - dSNPK); 1,5] \quad e \quad (A2)$$

$$dSNPK = K_{snpk} a_0 \{MIN(a_1; ACX_a) HSNEW + MAX[MIN(ACX_a - PACX; a_2); 0] HSOLD\} \quad (A3)$$

onde:

$\Delta RI_s$	acréscimo na irregularidade longitudinal devido à deterioração estrutural durante os anos de análise (IRI m/km)
dSNPK	redução no número estrutural ajustado do pavimento devido ao trincamento
SNPK <sub>b</sub>	número estrutural ajustado do pavimento devido ao trincamento no final de um ano de análise

SNP <sub>a</sub>	número estrutural ajustado do pavimento no início de um ano de análise
ACX <sub>a</sub>	área da superfície trincada no início do ano de análise (% da área total da pista)
PACX	área da superfície trincada na camada de superfície anterior (% da área total da pista)
HSNEW	espessura da recapagem mais recente (mm)
HSOLD	espessura total das camadas superficiais antigas (mm)
AGE3	idade do pavimento desde a última recapagem (reabilitação), reconstrução ou nova construção (anos)
YE4	número anual de eixos padrão equivalentes (milhões/faixa)
m	coeficiente ambiental
K <sub>gm</sub>	fator de ajuste do coeficiente ambiental
K <sub>snpk</sub>	fator de ajuste para SNPK

- Componente da irregularidade longitudinal devido ao trincamento:

$$\Delta RI_c = a_0 \Delta ACRA \quad (A4)$$

onde:

$\Delta RI_c$	acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao trincamento durante o ano de análise (IRI m/km)
$\Delta ACRA$	acréscimo na superfície total trincada durante o ano de análise (% total trincada da pista)

- Componente da irregularidade longitudinal devido afundamento de trilha de roda:

$$\Delta RI_r = a_0 \Delta RDS \quad (A5)$$

onde:

$\Delta RI_r$            acrécimo da irregularidade longitudinal devido ao afundamento de trilha de roda durante o ano de análise (IRI m/km)

$\Delta RDS$            acrécimo no desvio padrão do afundamento de trilha de roda durante o ano de análise (mm)

- Componente da irregularidade longitudinal devido às painelas:

O efeito do aparecimento de painelas depende do tráfego, o qual depende da liberdade de manobra dos veículos. Uma variável de liberdade de manobra pode ser predita pela seguinte equação:

$$FM = (MAX\{MIN[0,25(CW - 3);1];0\}) \left\{ MAX \left[ \left( 1 - \frac{AADT}{5000} \right); 0 \right] \right\} \quad (A6)$$

A alteração na irregularidade longitudinal é calculada então:

$$\Delta RI = a_0 (a_1 - FM) \left[ \left( NPT_a.TLF + \frac{\Delta NPT.TLF}{2} \right)^{a_2} - NPT_a^{a_2} \right] \quad (A7)$$

ou

$$\Delta RI_t = a_0 (a_1 - FM) \Delta NPT \left( NPT_a + \frac{\Delta NPT}{2} \right)^{a_2} \quad (A8)$$

Onde:

FM           liberdade para manobrar

CW           comprimento da pista (m)

AADT       tráfego diário médio anual (veículos/dia)

$\Delta RI_t$	acrécimo na irregularidade longitudinal devido ao aparecimento de painelas durante o ano de análise (IRI m/km)
$\Delta NPT$	acrécimo no número de painelas por quilômetro durante o ano de análise
$NPT_a$	número de painelas por quilômetro no início do ano de análise
TLF	fator de tempo de lapso

- Componente da irregularidade longitudinal devido a fatores ambientais:

$$\Delta RI_e = m K_{gm} RI_a \quad (A9)$$

Onde:

$\Delta RI_e$	acrécimo na irregularidade longitudinal devido a fatores ambientais durante o ano de análise (IRI m/km)
$RI_a$	irregularidade longitudinal no início do ano de análise (IRI m/km)
m	coeficiente ambiental
$K_{gm}$	fator de ajuste para o componente ambiental

Portanto a alteração total na irregularidade longitudinal do pavimento ao final de cada ano de análise é conhecida através da equação A10:

$$\Delta RI = K_{gp} [\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t] + \Delta RI_e \quad (A10)$$

Onde:

$\Delta RI$	acrécimo total da irregularidade longitudinal durante o ano de análise (IRI m/km)
$K_{gp}$	fator de ajuste para a progressão da irregularidade longitudinal

Logo, a irregularidade longitudinal do pavimento ao final de um ano de análise é dada por:

$$RI_b = MIN[(RI_a + \Delta RI); a_0] \quad (A11)$$

Onde:

- $RI_b$  irregularidade longitudinal do pavimento no final do ano de análise (IRI m/km)
- $RI_a$  irregularidade longitudinal do pavimento no início do ano de análise (IRI m/km)
- $a_0$  limite superior de irregularidade longitudinal do pavimento, especificado pelo usuário (padrão = 16 IRI m/km)

## ANEXO B – DADOS DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO PROGRAMA HDM-4 AOS PARÂMETROS DE ENTRADA

As 14 seções criadas com o intuito de analisar a sensibilidade do programa HDM-4 aos parâmetros de entrada são apresentadas, juntamente com um resumo das características de cada seção.

Estas seções são integrantes do estudo preliminar citado no item 4.2 desta dissertação e foram criadas a partir dos valores por *default* do programa HDM-4. As características das seções, apresentadas abaixo de cada quadro resumo, são as que o usuário do programa tem como opção ao criar uma seção utilizando os padrões pré-estabelecidos pelo conjunto de dados do programa.

Quadro A1: Seção 011 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	8,6	5,4	6,9	0,4	0,3
3,0		5,0	6,6	0,4	0,4
3,5		4,6	6,2	0,4	0,6
4,0		4,2	5,6	0,4	0,6
4,5		3,8	5,1	0,4	0,6
5,0		3,4	4,5	0,4	0,5
5,5		3,0	4,0	0,4	0,5
6,0		2,6	3,5	0,4	0,5
6,5		2,3	3,0	0,4	0,4
7,0		1,9	2,6	0,4	0,3
7,5		1,5	2,3	-	-

Características da seção: tráfego fraco (VDA=750); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial alto; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A2: Seção 012 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	8,9	5,7	7,3	0,4	0,3
3,0		5,2	7,0	0,4	0,4
3,5		4,8	6,5	0,4	0,6
4,0		4,4	5,9	0,4	0,6
4,5		4,0	5,3	0,4	0,6
5,0		3,6	4,8	0,4	0,6
5,5		3,2	4,2	0,4	0,5
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
6,0		2,8	3,7	0,4	0,5
6,5		2,3	3,2	0,4	0,4
7,0		1,9	2,8	0,4	0,4
7,5		1,5	2,4	-	-

Características da seção: tráfego médio (VDA=3000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial alto; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A3: Seção 013 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	9,6	6,1	8,0	0,5	0,4
3,0		5,7	7,6	0,5	0,5
3,5		5,2	7,1	0,5	0,6
4,0		4,7	6,5	0,5	0,6
4,5		4,3	5,8	0,5	0,6
5,0		3,8	5,2	0,5	0,6
5,5		3,4	4,6	0,5	0,6
6,0		2,9	4,1	0,5	0,5
6,5		2,5	3,6	0,5	0,5
7,0		2,0	3,1	0,4	0,4
7,5		1,6	2,7	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial alto; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm



Quadro A4: Seção 021 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	9,5	6,1	7,9	0,5	0,4
3,0		5,6	7,5	0,5	0,4
3,5		5,2	7,1	0,5	0,7
4,0		4,7	6,4	0,5	0,6
4,5		4,3	5,8	0,5	0,6
5,0		3,8	5,2	0,5	0,6
5,5		3,4	4,6	0,5	0,6
6,0		2,9	4,1	0,4	0,5
6,5		2,5	3,5	0,5	0,5
7,0		2,0	3,1	0,4	0,4
7,5		1,6	2,7	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial muito alto; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A5: Seção 022 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	7,4	4,9	6,0	0,4	0,3
3,0		4,5	5,7	0,3	0,3
3,5		4,2	5,4	0,4	0,6
4,0		3,9	4,8	0,3	0,5
4,5		3,5	4,3	0,3	0,5
5,0		3,2	3,8	0,3	0,5
5,5		2,8	3,3	0,3	0,4
6,0		2,5	2,9	0,3	0,4
6,5		2,2	2,5	0,3	0,1
7,0		1,8	2,3	0,3	0,1
7,5		1,5	2,2	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial alto; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A6: Seção 023 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	5,3	3,7	4,0	0,2	0,2
3,0		3,5	3,8	0,2	0,2
3,5		3,2	3,6	0,2	0,4
4,0		3,0	3,2	0,2	0,4
4,5		2,8	2,8	0,2	0,3
5,0		2,5	2,5	0,2	0,1
5,5		2,3	2,4	0,2	0,1
6,0		2,1	2,3	0,2	0,1
6,5		1,8	2,2	0,2	0,1
7,0		1,6	2,1	0,2	0,1
7,5		1,4	2,0	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A7: Seção 024 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	3,3	2,5	2,8	0,1	0,1
3,0		2,4	2,7	0,1	0,1
3,5		2,3	2,6	0,1	0,1
4,0		2,1	2,5	0,1	0,1
4,5		2,0	2,4	0,1	0,1
5,0		1,9	2,3	0,1	0,1
5,5		1,8	2,2	0,1	0,1
6,0	3,3	1,6	2,1	0,1	0,1
6,5		1,5	2,0	0,1	0,1
7,0		1,4	1,9	0,1	0,1
7,5		1,3	1,8	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial baixo; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A8: Seção 031 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	5,5	3,8	4,2	0,3	0,2
3,0		3,6	4,0	0,3	0,2
3,5		3,3	3,8	0,2	0,5
4,0		3,1	3,4	0,3	0,4
4,5		2,8	2,9	0,2	0,4
5,0		2,6	2,5	0,3	0,1
5,5		2,4	2,4	0,2	0,1
6,0		2,1	2,3	0,2	0,1
6,5		1,9	2,2	0,2	0,1
7,0		1,6	2,1	0,2	0,1
7,5		1,4	2,0	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $100 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A9: Seção 032 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	4,8	3,2	3,3	0,2	0,1
3,0		3,0	3,2	0,2	0,2
3,5		2,8	3,0	0,2	0,4
4,0		2,6	2,6	0,2	0,2
4,5		2,4	2,4	0,2	0,1
5,0		2,2	2,3	0,2	0,1
5,5		2,1	2,2	0,2	0,1
6,0		1,9	2,1	0,2	0,1
6,5		1,7	2,1	0,2	0,1
7,0		1,5	2,0	0,2	0,1
7,5		1,3	1,9	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $50 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A10: Seção 041 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	5,2	3,6	3,8	0,2	0,2
3,0		3,4	3,7	0,2	0,2
3,5		3,1	3,5	0,2	0,4
4,0		2,9	3,1	0,2	0,4
4,5		2,7	2,6	0,2	0,2
5,0		2,5	2,4	0,2	0,1
5,5		2,2	2,4	0,2	0,1
6,0		2,0	2,3	0,2	0,1
6,5		1,8	2,2	0,2	0,1
7,0		1,6	2,1	0,2	0,1
7,5		1,4	2,0	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); TSD sobre base estabilizada; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $50 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A11: Seção 042 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	4,6	3,1	3,2	0,2	0,1
3,0		2,9	3,1	0,2	0,2
3,5		2,8	2,9	0,2	0,4
4,0		2,6	2,5	0,2	0,1
4,5		2,4	2,4	0,2	0,1
5,0		2,2	2,3	0,2	0,1
5,5		2,0	2,2	0,2	0,1
6,0		1,8	2,1	0,2	0,1
6,5		1,6	2,0	0,2	0,1
7,0		1,5	2,0	0,2	0,1
7,5		1,3	1,9	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); CBUQ sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $50 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A12: Seção 043 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	5,2	3,6	3,8	0,2	0,2
3,0		3,4	3,7	0,2	0,2
3,5		3,1	3,5	0,2	0,4
4,0		2,9	3,1	0,2	0,4
4,5		2,7	2,6	0,2	0,2
5,0		2,5	2,4	0,2	0,1
5,5		2,2	2,4	0,2	0,1
6,0		2,0	2,3	0,2	0,1
6,5		1,8	2,2	0,2	0,1
7,0		1,6	2,1	0,2	0,1
7,5		1,4	2,0	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); CBUQ sobre base estabilizada; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $50 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A13: Seção 044 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	4,6	3,1	3,2	0,2	0,1
3,0		2,9	3,1	0,2	0,2
3,5		2,8	2,9	0,2	0,4
4,0		2,6	2,5	0,2	0,1
4,5		2,4	2,4	0,2	0,1
5,0		2,2	2,3	0,2	0,1
5,5		2,0	2,2	0,2	0,1
6,0		1,8	2,1	0,2	0,1
6,5		1,6	2,0	0,2	0,1
7,0		1,5	2,0	0,2	0,1
7,5		1,3	1,9	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); PMF sobre base granular; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $50 \times 10^{-2}$  mm

Quadro A14: Seção 045 – Diferenças encontradas entre previsões de redução do IRI

Espessura do recape projetada (cm)	IRI inicial (m/km)	IRI pós recape previsto pelo Modelo Linear	IRI pós recape previsto pelo Modelo Bilinear	Diferença entre previsões de IRI para diferentes espessuras (m/km)	
				Modelo Linear	Modelo Bilinear
2,5	5,2	3,6	3,8	0,2	0,2
3,0		3,4	3,7	0,2	0,2
3,5		3,1	3,5	0,2	0,4
4,0		2,9	3,1	0,2	0,4
4,5		2,7	2,6	0,2	0,2
5,0		2,5	2,4	0,2	0,1
5,5		2,2	2,4	0,2	0,1
6,0		2,0	2,3	0,2	0,1
6,5		1,8	2,2	0,2	0,1
7,0		1,6	2,1	0,2	0,1
7,5		1,4	2,0	-	-

Características da seção: tráfego forte (VDA=7000); PMF sobre base estabilizada; adequação estrutural ruim; IRI inicial médio; condição de superfície muito ruim, deflexão de  $50 \times 10^{-2}$  mm

## ANEXO C - DADOS COMPARATIVOS DAS REDES

Os quadros a seguir apresentados são os resumos das redes criadas a partir dos dados levantados dos nove trechos junto ao DAER/RS. Cada quadro apresenta as características de uma rede (estrutura do pavimento, recape executado, IRI antes do recape, IRI após) e as previsões encontradas utilizando os modelos contidos no programa HDM-4, tanto por *default*, quanto ajustados (quando for o caso).

Quadro C1 : Seções em Base Granular revestidas com Tratamento Superficial Duplo e recape de 3,0 cm de CBUQ

Base Granular + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape em 3,0cm de CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS452	1	3,2	3,0	0,2	2,5	0,6	2,6	0,6	2,6	0,6
	3	3,4	3,1	0,3	2,6	0,8	2,6	0,8	2,6	0,8
	4	3,2	3,1	0,1	2,4	0,9	2,5	0,7	2,6	0,7
	5	3,4	2,7	0,7	2,5	0,8	2,6	0,8	2,6	0,8
	6	2,8	2,6	0,2	2,2	0,7	2,5	0,4	2,5	0,4
	8	3,5	2,7	0,8	2,7	0,9	2,6	0,9	2,6	0,9
	9	3,1	2,8	0,3	2,4	0,6	2,6	0,5	2,6	0,5
	10	3,2	2,5	0,7	2,4	0,9	2,5	0,7	2,6	0,7
	11	3,4	2,7	0,7	2,6	0,8	2,6	0,8	2,6	0,8
	13	3,4	3,0	0,4	2,6	0,8	2,6	0,8	2,6	0,8
	15	3,5	2,4	1,1	2,6	1,0	2,6	1,0	2,6	0,9
	17	3,4	2,5	0,9	2,6	0,8	2,6	0,8	2,6	0,8
	19	3,1	2,8	0,3	2,4	0,7	2,6	0,5	2,6	0,5
	20	3,4	2,6	0,8	2,5	0,9	2,6	0,8	2,6	0,8
	22	3,1	2,5	0,6	2,5	0,6	2,6	0,5	2,6	0,5
	24	2,6	2,2	0,4	2,1	0,5	2,5	0,1	2,5	0,1
25	3,1	2,3	0,8	2,3	0,8	2,5	0,5	2,5	0,5	
29	2,8	2,4	0,4	2,2	0,5	2,5	0,3	2,5	0,3	
RS446	11	3,5	2,5	1,0	2,5	0,9	2,6	0,9	2,6	0,9
	12	2,9	2,6	0,3	2,3	0,7	2,5	0,4	2,5	0,4
	15	3,1	2,7	0,4	2,4	0,7	2,6	0,5	2,6	0,5
	16	4,6	2,7	1,9	3,2	1,4	3,5	1,1	2,8	1,8

Quadro C2: Seções em Base Granular revestidas com Tratamento Superficial Duplo e recape de 4,0 cm de CBUQ

Base Granular + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape em 4,0cm de CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS446	10	3,8	3,0	0,8	2,5	1,4	2,5	1,4	2,9	0,9
	13	3,3	2,7	0,6	2,3	1,1	2,4	0,9	2,8	0,5
	14	4,2	2,6	1,6	2,6	1,6	2,6	1,6	3,0	1,2
RS404	3	3,3	2,7	0,6	2,3	1,0	2,5	0,8	2,9	0,4
	4	3,9	3,2	0,7	2,6	1,3	2,5	1,4	3,0	0,8
	7	4,9	2,5	2,4	3,2	1,7	3,6	1,3	3,4	1,5
	8	5,8	2,7	3,1	3,4	2,4	4,1	1,7	3,6	2,2
	9	4,4	2,7	1,7	2,8	1,6	2,9	1,5	3,2	1,3
	10	5,3	3,1	2,2	3,3	2,0	3,8	1,5	3,5	1,8
	11	5,4	2,4	3,0	3,3	2,2	3,8	1,7	3,4	2,0
	12	5,2	3,0	2,2	3,2	2,1	3,6	1,7	3,4	1,9

Quadro C3: Seções em Base Granular revestidas com Tratamento Superficial Duplo e recape de 5,0 cm de CBUQ

Base Granular + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape em 5,0cm de CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS344	1	5,6	2,8	2,8	2,5	3,1	2,5	3,1		
	5	5,3	3,0	2,3	2,5	2,7	2,5	2,8		
	10	5,5	2,6	2,9	2,4	3,1	2,4	3,1		
	14	4,9	2,5	2,4	2,4	2,5	2,4	2,5		
	15	5,2	2,4	2,8	2,4	2,9	2,4	2,8		
	16	5,6	2,3	3,3	2,4	3,2	2,4	3,2		
	17	4,7	2,5	2,2	2,4	2,3	2,4	2,3		
	21	4,3	2,4	1,9	2,3	2,0	2,4	1,9		
	22	4,3	2,2	2,1	2,3	2,0	2,3	1,9		
	23	4,5	2,2	2,3	2,3	2,1	2,4	2,1		

Quadro C4: Seções em Base Granular revestidas com Tratamento Superficial Duplo e recape de 6,0 cm de CBUQ

Base Granular + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape em 6,0cm de CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS128	1	5,4	3,0	2,4	2,1	3,3	2,3	3,1	3,1	2,3
	2	6,7	3,3	3,4	2,4	4,3	2,7	4,0	3,3	3,4
	3	6,7	2,9	3,8	2,4	4,3	2,7	4,0	3,3	3,4
	4	4,8	3,0	1,8	2,0	2,8	2,2	2,6	3,1	1,7
	5	4,3	3,2	1,1	1,9	2,4	2,2	2,1	3,0	1,3
	6	5,1	3,8	1,3	2,1	3,1	2,3	2,9	3,1	2,0

Quadro C5: Seções em Base Granular revestidas com Tratamento Superficial Duplo e recape de 8,0 cm de CBUQ

Base Granular + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape em 8,0cm de CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS404	5	6,4	3,2	3,2	1,1	5,3	2,1	4,3	3,3	3,1
	6	5,9	3,4	2,5	1,1	4,8	2,1	3,9	3,1	2,8

Quadro C6: Seções em Base Granular revestidas com Tratamento Superficial Duplo e reperfilagem de 2,0 cm + recape de 4,0 cm de CBUQ

Base Granular + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Reperfilagem de 2,0cm + Recape de 4,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS344	2	6,0	2,6	3,4	1,9	4,1	2,2	3,8	1,5	4,5
	6	5,1	2,4	2,7	2,1	3,0	2,3	2,8	2,1	3,0
	7	5,7	2,3	3,4	2,3	3,4	2,4	3,3	2,5	3,2
	9	6,3	2,5	3,8	2,5	3,9	2,9	3,5	2,9	3,4
	11	5,4	2,6	2,8	2,0	3,4	2,3	3,2	1,8	3,6
	12	5,5	2,2	3,3	2,2	3,3	2,3	3,2	2,3	3,2
	13	5,6	2,1	3,5	2,2	3,4	2,3	3,2	2,3	3,3
	18	5,5	2,5	3,0	2,2	3,3	2,3	3,1	2,2	3,3
	20	5,6	2,2	3,4	2,2	3,4	2,3	3,2	2,2	3,4
RS342	13	4,8	1,5	3,3	2,0	2,8	2,3	2,6	1,8	3,0
	14	4,4	1,5	2,9	1,9	2,5	2,2	2,2	1,5	2,9
	15	4,9	1,5	3,4	2,1	2,8	2,3	2,6	1,8	3,1
	16	5,7	1,4	4,3	2,2	3,5	2,4	3,3	2,3	3,4
	17	5,3	1,5	3,8	2,1	3,2	2,3	3,0	2,1	3,3
	18	5,3	1,5	3,8	2,1	3,2	2,3	3,0	2,1	3,2
	19	4,2	1,6	2,6	1,9	2,3	2,2	2,0	1,4	2,8

Quadro C7: Seções em Base Granular revestidas com CBUQ e recape de 3,0 cm de CBUQ

Base Granular + CBUQ					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape de 3,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS446	1	3,2	2,5	0,7	2,7	0,6	2,6	0,6	2,3	0,9
	2	3,1	2,6	0,5	2,8	0,3	2,8	0,3	2,4	0,7
	3	3,2	2,9	0,3	2,6	0,5	2,6	0,5	2,3	0,9
	4	2,8	2,6	0,2	2,4	0,4	2,6	0,2	2,2	0,5
	8	3,1	2,4	0,7	2,8	0,3	2,8	0,3	2,4	0,7
	9	3,8	2,7	1,1	2,8	1,0	2,9	1,0	2,3	1,5
RS470	30	3,0	2,5	0,5	2,4	0,7	2,6	0,5	2,2	0,8
	31	2,9	1,9	1,0	2,3	0,5	2,6	0,3	2,2	0,7
	32	3,0	1,9	1,1	2,4	0,6	2,6	0,4	2,2	0,8
	33	2,8	2,3	0,5	2,3	0,5	2,5	0,3	2,2	0,6



Quadro C8: Seções em Base Granular revestidas com CBUQ e recape de 4,0 cm de CBUQ

Base Granular + CBUQ					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape de 4,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS446	5	3,8	2,9	0,9	2,5	1,3	2,5	1,3	2,5	1,3
	6	3,3	2,4	0,9	2,3	1,0	2,5	0,9	2,5	0,8
	7	4,6	2,0	2,6	2,6	2,8	1,8	2,9	1,7	2,5
RS324	11	2,9	2,4	0,5	2,0	0,9	2,3	0,6	2,5	0,4
	12	3,6	2,6	1,0	2,4	1,3	2,4	1,2	2,5	1,1
	13	3,9	2,2	1,7	2,4	1,5	2,5	1,4	2,5	1,4
	14	4,3	2,1	2,2	2,7	1,6	2,7	1,6	2,5	1,8
	15	3,6	2,1	1,5	2,4	1,2	2,4	1,2	2,5	1,1
	16	3,8	2,3	1,5	2,5	1,3	2,5	1,3	2,5	1,3

Quadro C9: Seções em Base Granular revestidas com CBUQ e recape de 6,0 cm de CBUQ

Base Granular + CBUQ					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape de 6,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS470	27	8,2	2,8	5,4	2,8	5,4	3,7	4,4		
	28	5,8	2,3	3,5	2,2	3,6	2,4	3,5		
	29	2,9	1,9	1,0	1,6	1,3	2,1	0,9		

Quadro C10: Seções em Base Granular revestidas com Pré Misturado a Frio e recape de 4,0 cm de CBUQ

Base Granular + PMF					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape de 4,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS324	9	5,4	2,4	3,0	3,1	2,3	3,6	1,8	2,6	2,8
	10	2,6	2,5	0,1	2,0	0,7	2,3	0,3	1,8	0,8
RS470	1	4,0	1,8	2,2	2,7	1,3	2,6	1,3	2,3	1,7
	2	3,5	1,7	1,8	2,4	1,1	2,5	1,0	2,1	1,4
	3	3,8	1,6	2,2	2,5	1,3	2,5	1,3	2,2	1,6
	4	3,7	1,6	2,1	2,4	1,3	2,5	1,3	2,1	1,6
	5	3,8	1,8	2,0	2,5	1,3	2,5	1,3	2,2	1,6
	6	4,0	2,4	1,6	2,5	1,4	2,5	1,5	2,2	1,8
	7	4,4	2,3	2,1	2,7	1,7	2,8	1,6	2,3	2,1

Quadro C11: Seções em Base Granular revestidas com Pré Misturado a Frio e recape de 6,0 cm de CBUQ

Base Granular + PMF					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape de 6,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS470	8	5,6	2,4	3,2	1,9	3,7	2,2	3,4		
	10	4,8	2,2	2,6	2,0	2,8	2,2	2,5		
	11	4,8	2,7	2,1	2,0	2,8	2,2	2,6		
	12	5,1	2,3	2,8	2,1	3,0	2,3	2,8		
	13	5,6	2,5	3,1	2,2	3,4	2,3	3,3		
	14	4,9	2,0	2,9	2,0	2,8	2,2	2,6		
	15	4,9	1,8	3,1	2,0	2,9	2,2	2,6		
	17	5,3	2,1	3,2	2,1	3,2	2,3	3,0		
	18	5,2	1,8	3,4	2,1	3,2	2,3	3,0		
	19	4,4	2,4	2,0	1,9	2,6	2,2	2,3		
	20	4,3	3,1	1,2	1,9	2,4	2,2	2,1		
	21	5,2	2,6	2,6	2,1	3,1	2,3	2,9		
	22	5,8	2,8	3,0	2,2	3,6	2,3	3,5		
	23	5,7	1,7	4,0	2,2	3,5	2,3	3,3		
	24	7,1	2,5	4,6	2,5	4,6	3,1	4,1		
	25	6,9	2,4	4,5	2,4	4,5	2,8	4,1		
26	7,6	2,5	5,1	2,7	4,9	3,5	4,1			

Quadro C12: Seções em Base Granular revestidas com Pré Misturado a Frio e reperfilagem de 2,0 cm + recape de 5,0 cm de CBUQ

Base Granular + PMF					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Reperfilagem de 2,0cm + Recape de 5,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS342	2	6,7	1,6	5,1	1,8	4,9	2,3	4,4		
	4	5,4	1,8	3,6	1,7	3,7	2,2	3,2		
	5	6,4	1,7	4,7	1,8	4,6	2,3	4,1		
	6	6,7	1,6	5,1	1,8	4,9	2,3	4,4		
	7	6,4	1,5	4,9	1,8	4,6	2,3	4,1		
	9	6,7	1,5	5,2	1,8	4,9	2,3	4,4		
	10	6,5	1,5	5,0	1,8	4,7	2,3	4,2		
	11	5,8	1,5	4,3	1,7	4,1	2,2	3,6		
	12	5,7	1,6	4,1	1,7	4,1	2,2	3,5		
	20	6,1	1,6	4,5	1,7	4,4	2,2	3,9		
	22	5,7	1,6	4,1	1,7	4,0	2,2	3,5		
	23	4,8	1,6	3,2	1,6	3,2	2,1	2,7		
	24	5,7	1,7	4,0	1,7	4,0	2,2	3,5		

Quadro C13: Seções em Base Granular revestidas com Pré Misturado a Frio e reperfilagem de 2,0 cm + recape de 6,0 cm de CBUQ

Base Granular + PMF					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Reperfilagem de 2,0cm + Recape de 6,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS342	1	7,3	1,5	5,8	1,1	6,2	2,2	5,1	1,7	5,6
	3	7,8	1,6	6,2	1,1	6,7	2,3	5,5	1,7	6,1
	21	6,2	1,6	4,6	1,1	5,1	2,1	4,1	1,5	4,7

Quadro C14: Seções em Base Estabilizada revestidas com Tratamento Superficial Duplo  
recape de 4,0 cm de CBUQ

Base Estabilizada + TSD					Previsões dos Modelos do Programa HDM-4					
Recape de 4,0cm em CBUQ					IRI - Linear	Diferença	IRI - Bilinear	Diferença	IRI - Ajustado	Diferença
Rodovia	SH	IRI antes	IRI depois	$\Delta$ IRI medido						
RS020	1	6,6	2,3	4,3	3,9	2,7	4,9	1,7	2,9	3,7
	3	5,8	2,5	3,3	3,4	2,4	4,0	1,8	2,5	3,2
	7	6,9	2,8	4,2	4,1	2,8	5,2	1,7	3,0	3,9
	10	6,6	2,5	4,1	3,8	2,8	4,8	1,8	2,8	3,8
	12	6,6	2,8	3,8	3,9	2,7	4,9	1,7	2,9	3,7
	14	6,6	2,8	3,8	4,0	2,6	5,1	1,5	3,0	3,6
	19	6,6	2,8	3,8	3,7	2,9	4,6	2,0	2,7	3,9
	20	6,6	2,9	3,7	3,8	2,8	4,8	1,8	2,8	3,8
	21	7,0	3,0	4,0	4,2	2,8	5,4	1,6	3,1	3,9