SÉRGIO PACÍFICO SONCIM

Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes

Orientador: Professor Associado José Leomar Fernandes Júnior.

São Carlos
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

S698d	<p>Soncim, Sérgio Pacífico.</p> <p>Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do estado da Bahia / Sérgio Pacífico Soncim ; orientador José Leomar Fernandes Júnior. São Carlos, 2011.</p> <p>Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.</p> <p>1. Pavimentos asfálticos. 2. Sistemas de gerência. 3. Modelos de desempenho. 4. Irregularidade longitudinal. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: **Engenheiro SÉRGIO PACÍFICO SONCIM**

Título da tese: **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia.**

Data da defesa: 28/06/2011:

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **José Leomar Fernandes Junior (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Glauco Túlio Pessa Fabbri**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Ana Paula Furlan**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **José Kiyinha Yshiba**
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

APROVADO

Profa. Dra. **Eliane Viviani**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Lauro e à minha mãe Maria Leodona, que dedicaram toda uma vida de amor e carinho aos filhos. À minha amada esposa Ana Cristina e à nossa querida filha Cecília, que em breve nascerá e trará mais alegria às nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao Professor e Orientador José Leomar Fernandes Júnior, que ao logo do desenvolvimento do trabalho soube conduzir a orientação de forma sábia, contribuindo para o meu crescimento científico e intelectual. Agradeço também pela amizade, pelo apoio e pela compreensão, que muito contribuíram para a superação das dificuldades que surgiram ao longo do caminho.

Ao CNPq pela concessão de uma bolsa de doutorado, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da EESC-USP, à UFBA pelo apoio aos levantamentos de campo e liberação em tempo integral para dedicação ao doutorado, e ao DERBA por ceder os dados para a execução desta pesquisa.

Aos Professores e demais funcionários do Departamento de Transportes da EESC pela colaboração e apoio, indispensáveis à conclusão deste trabalho.

Aos amigos do Departamento de Transportes, pela amizade e apoio fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, em especial: Jesner, Vivian, Luis Miguel, Marcos Bottene David Grubba, Walter e Francis.

Aos amigos do laboratório e da secretaria do Departamento de Transportes da EESC, pelo companheirismo e convívio diário, em especial: Paulo Toyama, João e Alexandre.

Aos amigos do Departamento de Transportes da UFBA, pela amizade e apoio à minha liberação das atividades como professor da UFBA, para a realização do curso de doutorado, em especial: Artur e Élio Fontes.

Aos meus pais Lauro e Maria Leodona, aos meus irmãos Ralf, Rômulo, Roger e Solange, pelo apoio e incentivo, e à minha esposa Ana Cristina, pela paciência, amor e dedicação.

Aos amigos que receberam a mim e a minha esposa em seu rol familiar, preenchendo o vazio deixado pela distância que nos separa das nossas famílias, e que, em breve, receberão a nossa Cecília. Em especial: Sr. José Leomar e Sr.^a Olga, Paulo Segantine e Carmen.

À Deus, por ter dado saúde e vitalidade a mim, e a todas essas pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para que eu chegasse ao final deste trabalho.

O único homem que está isento de erros, é aquele que não arrisca acertar.

Albert Einstein

RESUMO

SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia**. 2011. 241 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

O objetivo desta tese de doutorado foi desenvolver modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos para a malha rodoviária do Estado da Bahia. Os modelos de desempenho foram desenvolvidos para pavimentos em concreto asfáltico usinado a quente e em tratamento superficial duplo. Foram utilizadas informações de um banco de dados de gerência de rodovias do DERBA, coletados em 2004, e foram coletados dados complementares de Irregularidade Longitudinal em 2009, após o desenvolvimento de um planejamento fatorial específico para essa finalidade. Foram utilizadas duas formas de análise estatística dos dados para avaliar a significância dos fatores e definir os parâmetros dos modelos de desempenho: a Análise Exploratória de Dados (AED) e a Análise da Variância (ANOVA). Os fatores considerados foram a idade do pavimento, o tráfego e a pluviometria e os resultados da Análise Exploratória de Dados corroboraram os resultados encontrados pela Análise da Variância, tanto em relação aos efeitos dos fatores como das interações. Os modelos de previsão do desempenho foram desenvolvidos para as variáveis dependentes Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) e Área Total de Trincas (A_{TT}), para os pavimentos em concreto asfáltico usinado a quente, e os modelos de previsão de desempenho de Área de Desgaste (A_{Desg}) e Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}), para os trechos em tratamento superficial duplo. Para a Irregularidade Longitudinal, também foram desenvolvidos modelos de desempenho em separado, para regiões de clima semiárido a seco (IRI_{BAS}) e clima subúmido a úmido ($IRI_{BAÚ}$). Para a verificação da adequação dos modelos de previsão de desempenho foram utilizadas a análise de resíduos, o coeficiente de correlação (r) e o coeficiente de determinação (R^2). Os modelos de desempenho, desenvolvidos neste trabalho para a Área Total de Trinca (A_{TT}) e para a Irregularidade Longitudinal, foram comparados com modelos de desempenho empíricos, utilizados em programas de gerência de pavimentos por organismos rodoviários, do Brasil e do exterior, e apresentaram melhores resultados. O modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}) para a rede de rodovias em tratamento superficial duplo também foi comparado com modelo desenvolvido pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia – DERBA, com base em levantamentos para a priorização de trechos candidatos a atividades de manutenção e reabilitação, e apresentou melhor ajuste aos dados observados. No entanto, para que sejam obtidos ainda melhores resultados, quanto à previsão de desempenho dos pavimentos da rede de rodovias pavimentadas do Estado da Bahia, é necessário que sejam realizados novos levantamentos para alimentação do banco de dados, sugerindo-se estudos complementares que incluam fatores que não puderam ser considerados neste trabalho, como a capacidade estrutural, por exemplo. Recomenda-se que o método utilizado neste trabalho, baseado no planejamento fatorial, na Análise Exploratória de Dados e na Análise de Variância, seja repetido, pois se mostrou capaz de reduzir os custos da coleta de dados sem comprometer a precisão e acurácia dos modelos de desempenho obtidos.

Palavras-chave: Pavimentos asfálticos. Sistemas de Gerência. Modelos de Desempenho. Irregularidade longitudinal

ABSTRACT

SONCIM, S. P. Development of performance prediction models for asphalt pavements based on data from the highway network of the State of Bahia, Brazil. 2011. 241 f. Thesis (Ph.D.) – Engineering School of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, State of Sao Paulo, Brazil, 2011.

The objective of this thesis was to develop performance prediction models for asphalt pavements in the State of Bahia. The performance models were developed for hot-mix asphalt (HMA) and double surface treatment (ST). Information was obtained from a database maintained by DERBA (State of Bahia Department of Transportation), with data collected in 2004, and from additional collection of data, mainly of pavement roughness, performed in 2009 and that was based on an experimental design for this specific purpose. Two statistical analyses were used to assess the significant factors and define the parameters of the performance models: Exploratory Data Analysis (EDA) and Analysis of Variance (ANOVA). The factors considered were age of the pavement, traffic volume and rainfall, and the results of the exploratory data analysis corroborated the results found by the analysis of variance, both in relation to the effects of factors such as of their interactions. The performance prediction models were developed for the dependent variables Pavement Condition Index (PCI) and Area of Total Cracks (ATC) for HMA pavements, and Raveling (R) and roughness (IRI_{BA}) for ST pavements. For roughness, performance models were also developed considering, separately, two climate conditions: semiarid to arid (IRI_{BAa}) and sub-humid to humid (IRI_{BAh}). Residue analysis and calculation of correlation coefficient (r) and coefficient of determination (R^2) were performed to verify the adequacy of performance prediction models. The performance models developed in this work for Area of Total Cracks (ATC) and roughness (IRI) were compared with empirical performance models used for pavement management in Brazilian and foreign highway agencies, and they presented the best results. The performance model for roughness (IRI_{BA}) in ST pavements was also compared to a prediction model developed by DERBA using data collected by a maintenance and rehabilitation activities prioritization program and it presented the best fit to the observed data. However, to obtain even better results regarding the performance prediction of asphalt pavements in the State of Bahia, it is necessary to conduct new field surveys to feed the database and be used in further studies that include factors that could not be considered in this work, as structural capacity, for example. It is recommended that the method used in this work, based on factorial design, Exploratory Data Analysis and ANOVA, be repeated, because it proved capable of reducing the costs of data collection without compromising precision and accuracy of the obtained performance prediction models.

Keywords: Asphalt pavements. Management systems. Performance models. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Variação da serventia com o tempo / tráfego (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).....	30
Figura 2.2 – Perfilômetro Dinâmico de Superfície - GMR (GILLESPIE; SAYERS; HAGAN, 1987).....	42
Figura 2.3 - Perfilômetro inercial com sensor (SAYERS E KARAMIHAS, 1998)	43
Figura 2.4 – Rugosímetro BPR (SAYERS; KARAMIHAS, 1998)	44
Figura 2.5 – Mays Ride Meter (SAYERS; KARAMIHAS, 1998)	44
Figura 2.6 – Esquema do simulador de quarto de carro (KARAMIHAS, 2005)	46
Figura 2.7 – Esquema de determinação da AVMQ (KARAMIHAS, 1998).....	48
Figura 2.8 – Transição de probabilidades (WANG et al., 1993).....	63
Figura 3.1 – Participação percentual da área total do Estado da Bahia em relação ao Brasil e ao Nordeste (SEI, 2009)	70
Figura 3.2 – Principais Biomas do estado da Bahia (SEI, 2009)	71
Figura 3.3 – Distribuição Pluviométrica do estado da Bahia (SEI, 2009).....	72
Figura 3.4 – Tipologia climática do Estado da Bahia segundo <i>Thorntwaite</i> (SEI, 1998)	72
Figura 3.5 – Hipsometria do estado da Bahia (SEI, 1998)	75
Figura 3.6 – Relevo do estado da Bahia (SEI, 1998)	76
Figura 3.7 – Geologia do estado da Bahia (SEI, 1998)	77
Figura 3.8 – Carta de solos do estado da Bahia (SEI, 1998)	78
Figura 3.9 – Curvatura horizontal e alinhamento vertical dos trechos do banco de dados de rodovias	80
Figura 3.10 – Distribuição do relevo nos trechos do banco de dados de rodovias.....	81
Figura 3.11 – Largura da pista e largura do acostamento para os trechos do banco de dados de rodovias	81
Figura 3.12 – Idade da construção e histograma ano de construção para os trechos do banco de dados de rodovias	82
Figura 3.13 – Idade da construção (anos) para os trechos sem atividades de manutenção e reabilitação.....	82
Figura 3.14 – Regime pluviométrico para os trechos do banco de dados de rodovias.....	83
Figura 3.15 – ICPF e IES para os trechos do banco de dados de rodovias	85
Figura 3.16 – Principais tipos de revestimento asfálticos como construído.....	86
Figura 3.17 – Pavimentos que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação até o ano de 2004.....	86
Figura 3.18 – Principais tipos de revestimentos utilizados em substituição aos AAUQ e aos tratamentos contra/pó	87
Figura 3.19 – Contagens volumétricas para os trechos do banco de dados.....	88

Figura 3.20 – Contagem classificatória de veículos	88
Figura 3.21 – Contagem classificatória para ônibus e caminhões.....	89
Figura 4.1 – Localização das rodovias que tiveram trechos selecionados para levantamento de irregularidade longitudinal	102
Figura 4.2 – Principais componentes do perfilômetro inercial a laser	104
Figura 4.3 – Curva de regressão para os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser.....	106
Figura 5.1 – Gráfico de Dispersão dos valores de ICPF	111
Figura 5.2 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores do ICPF em trechos em CBUQ.....	111
Figura 5.3 – Matriz de Interação de efeitos para o ICPF nos trechos em CBUQ.....	115
Figura 5.4 – Gráfico de Youden para o ICPF para os trechos em CBUQ.....	116
Figura 5.5 – Gráfico de Efeitos para o ICPF dos trechos em CBUQ.....	117
Figura 5.6 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal para o ICPF, em trechos com CBUQ	118
Figura 5.7 – Gráfico de Dispersão dos valores da Área Total de Trincas.....	119
Figura 5.8 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Área Total de Trincas em trechos em CBUQ.....	120
Figura 5.9 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Área Total de Trincas nos trechos em CBUQ	120
Figura 5.10 – Gráfico de Youden dos valores da Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ	121
Figura 5.11 – Gráfico de Efeito dos valores da Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ	121
Figura 5.12 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Área Total de Trincas, com trechos em CBUQ	121
Figura 5.13 – Gráfico de Dispersão dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD	123
Figura 5.14 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Área de Desgaste para os trechos em TSD	123
Figura 5.15 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD.....	124
Figura 5.16 – Gráfico de Youden dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD	124
Figura 5.17 – Gráfico de Efeitos dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD	125
Figura 5.18 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD	125
Figura 5.19 – Gráfico de Dispersão dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD.....	126

Figura 5.20 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD	127
Figura 5.21 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD.....	127
Figura 5.22 – Gráfico de Youden dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD.....	128
Figura 5.23 – Gráfico de Efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD.....	128
Figura 5.24 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD	128
Figura 5.25 – Gráfico de Dispersão dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD	130
Figura 5.26 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco em trechos com TSD.....	130
Figura 5.27 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD	130
Figura 5.28 – Gráfico de Youden dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD	131
Figura 5.29 – Gráfico de Efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD	131
Figura 5.30 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco em trechos com TSD.....	131
Figura 5.31 – Gráfico de Dispersão dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, em trechos com TSD	133
Figura 5.32 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD.....	133
Figura 5.33 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD	133
Figura 5.34 – Gráfico de Youden dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD	134
Figura 5.35 – Gráfico de Efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, em trechos com TSD	134
Figura 5.36 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD.....	134
Figura 5.37 – Correlação dos valores observados do ICPF com os valores previstos	149
Figura 5.38 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho do ICPF obtido	149
Figura 5.39 – Gráfico de distribuição de probabilidade dos resíduos do ICPF.....	150
Figura 5.40 – Correlação dos valores observados da Área Total de Trincas com os valores previstos pela Equação 5.25	151
Figura 5.41 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho da Área Total de Trincas obtido	152

Figura 5.42 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.....	152
Figura 5.43 – Correlação dos valores observados da Área de Desgaste com os valores previstos pela Equação 5.26	153
Figura 5.44 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho da Área de Desgaste obtido..	155
Figura 5.45 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.....	155
Figura 5.46 – Correlação dos valores observados da Irregularidade Longitudinal com os valores previstos pela Equação 4.27.....	157
Figura 5.47 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal	157
Figura 5.48 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos da Irregularidade Longitudinal	158
Figura 5.49 – Correlação dos valores observados da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco com, os valores previstos pela Equação 5.28.....	159
Figura 5.50 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco.....	160
Figura 5.51 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco	160
Figura 5.52 – Correlação dos valores observados da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido com os valores previstos pela Equação 5.29.....	162
Figura 5.53 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido.....	162
Figura 5.54 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido	163
Figura 6.1 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre o ICPF	168
Figura 6.2 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre o ICPF.....	168
Figura 6.3 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre o ICPF.....	169
Figura 6.4 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a A_{TT}	169
Figura 6.5 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre a A_{TT}	170
Figura 6.6 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre a A_{TT}	170
Figura 6.7 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a A_{DESG}	171
Figura 6.8 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre a A_{DESG}	171
Figura 6.9 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre a A_{DESG}	172
Figura 6.10 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal IRI_{BA}	172
Figura 6.11 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre a Irregularidade Longitudinal IRI_{BA}	173
Figura 6.12 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre a Irregularidade Longitudinal IRI_{BA}	173

Figura 6.13 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco.....	174
Figura 6.14 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido	174
Figura 6.15 – Análise comparativa do modelo de desempenho de A_{TT} com modelo de Marcon (1996)	176
Figura 6.16 – Análise comparativa entre os modelos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})	180
Figura 6.17– Análise comparativa do modelo de desempenho de IRI_{BAS} , para o clima semiárido a seco com os modelos de Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007).....	181
Figura 6.18 – Análise comparativa do modelo de desempenho do IRI_{BAu} para o clima subúmido a úmido com os modelos de Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007)	183
Figura 6.19 – Análise comparativa do modelo para previsão do IRI_{BA} e a Equação 6.5 desenvolvida no estudo do DERBA (2005), para os trechos coletados nesta pesquisa	185
Figura 6.20– Análise comparativa do modelo para previsão do IRI_{BA} e a Equação 6.5, para dados de levantamentos realizados na pesquisa DERBA (2005)	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constantes físicas do modelo de simulação do Quarto-de-carro.....	47
Tabela 2.2 – Condições de superfície do pavimento (DNIT, 2006).....	49
Tabela 3.1 – Parâmetros de referência para classificação climática (SEI, 2009).....	73
Tabela 3.2 – Parâmetros de referência para classificação climática (SEI, 1997).....	74
Tabela 3.3 – Parâmetros de referência para classificação climática (SEI, 1997).....	74
Tabela 3.4 – ICPF – Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis (DNIT 08/2002 PRO).....	84
Tabela 3.5 – IES – Índice do Estado da Superfície do pavimento (DNIT 08/2002 PRO)	85
Tabela 3.6 – FV's calculados para os veículos/grupos.....	91
Tabela 4.1 – Representação do experimento fatorial com três fatores em dois níveis.....	94
Tabela 4.2 – Nível de importância dos dados necessários à gerência de pavimentos - adaptada ASTM E – 96 (2002).....	97
Tabela 4.3 – Valores médios, mínimos e máximos dos fatores ID, TA e PL nos 78 trechos em CBUQ	98
Tabela 4.4 – Valores médios, mínimos, máximos dos fatores ID, TA e PL nos 295 trechos em TSD.....	100
Tabela 4.5 – Resultados dos levantamentos realizados com nível e mira e com perfilômetro a laser.....	105
Tabela 4.6 – Análise de regressão para os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser	106
Tabela 4.7 – Análise de variância para os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser	106
Tabela 4.8 – Valores da Irregularidade Longitudinal, convertidos para a escala do IRI, obtidos dos levantamentos realizados em campo e utilizados no desenvolvimento dos modelos	107
Tabela 4.9 – Valores da Irregularidade Longitudinal, convertidos para a escala do IRI, obtidos dos levantamentos realizados em campo e utilizados na validação dos modelos	107
Tabela 5.1 – Matriz fatorial do ICPF das seções em CBUQ.....	110
Tabela 5.2 – Exemplo para determinação dos códigos dos níveis para a interação entre os fatores Idade e Tráfego	112
Tabela 5.3 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente ICPF	114
Tabela 5.4 – Matriz fatorial da variável dependente Área Total de Trincas das seções em CBUQ sem atividade de manutenção e reabilitação até 2004.....	119
Tabela 5.5 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ	119
Tabela 5.6 – Matriz fatorial da variável dependente Área de Desgaste das seções em TSD .	122
Tabela 5.7 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Área de Desgaste para os trechos em TSD.....	122

Tabela 5.8 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal das seções em TSD.....	126
Tabela 5.9 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD	126
Tabela 5.10 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco das seções em TSD	129
Tabela 5.11– Cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD	129
Tabela 5.12 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido das seções em TSD	132
Tabela 5.13 – Cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD	132
Tabela 5.14 – Tabela de Análise da Variância para modelo com três fatores.....	136
Tabela 5.15 – Matriz fatorial do ICPF das seções em CBUQ (ANOVA).....	140
Tabela 5.16 – Resumo da ANOVA para o planejamento fatorial do ICPF.....	140
Tabela 5.17 – Matriz fatorial da A_{TT} das seções em CBUQ (ANOVA)	140
Tabela 5.18 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da A_{TT}	141
Tabela 5.19 – Matriz fatorial da Área de Desgaste das seções em TSD (ANOVA)	141
Tabela 5.20 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Área de Desgaste.....	142
Tabela 5.21 – Matriz fatorial da Irregularidade Longitudinal das seções em TSD (ANOVA)	142
Tabela 5.22 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Irregularidade Longitudinal	142
Tabela 5.23 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco, das seções em TSD (ANOVA)	143
Tabela 5.24 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco, das seções em TSD.....	143
Tabela 5.25 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, das seções em TSD (ANOVA)	144
Tabela 5.26 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, das seções em TSD	144
Tabela 5.27 – Valores de ICPF observados e previstos pela Equação 5.24	148
Tabela 5.28 – Valores da Área Total de Trincas observados e previstos pela Equação 5.25	151
Tabela 5.29 – Valores da Área de desgaste observados e previstos pela Equação 5.26	154
Tabela 5.30 – Valores de Irregularidade Longitudinal observados e previstos pela Equação 5.27	156
Tabela 5.31 – Valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco, observados e previstos pela Equação 5.28.....	159

Tabela 5.32 – Valores da Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido observados e previstos pela Equação 5.29.....	161
Tabela 6.1 – Resumo comparativo entre os resultados da ANOVA e da AED para os efeitos dos fatores sobre as variáveis ICPF e A_{TT}	166
Tabela 6.2 – Resumo comparativo entre os resultados da ANOVA e da AED para os efeitos dos fatores sobre as variáveis A_{DESG} e IRI_{BA}	166
Tabela 6.3 – Resumo comparativo entre os resultados da ANOVA e da AED para os efeitos dos fatores sobre a variável IRI (clima semiárido a seco e clima subúmido a úmido)	166
Tabela 6.4 – Valores observados e os previstos pelos modelos de desempenho de A_{TT} e de Marcon (1996).....	176
Tabela 6.5 – Valores observados e previstos da Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}).....	179
Tabela 6.6 – Valores observados e previstos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_s}) para o clima semiárido a seco.....	181
Tabela 6.7 – Valores observados e previstos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_u}) para o clima subúmido a úmido	182
Tabela 6.8 – Valores de Irregularidade Longitudinal, observados e previstos pelas equações 5.27 e 6.5, para os dados de levantamentos realizados nesta pesquisa.....	184
Tabela 6.9 – Valores de Irregularidade Longitudinal, observados e previstos pelas equações 5.27 e 6.5, para os dados de levantamentos realizados na pesquisa DERBA (2005).....	185

LISTA DE SIGLAS

AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AAUQ	Areia Asfalto Usinado a Quente
ADesg	Área de Desgaste
AED	Análise Exploratória de Dados
ANOVA	Análise de Variância
APL	Analizador do Perfil Longitudinal
ASTM	American Society for Testing Materials
ATT	Área Total de Trincas
AVMQ	Aceleração Vertical Média Quadrática
BIRD	Internacional Bank for Reconstruction and Development
BPR	Bureau of Public Roads
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transportes
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CREMA	Contratos de Restauração e Manutenção
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DERBA	Departamento de InfraEstrutura de Transportes da Bahia
FEC	Fator de Equivalência de Carga
FV	Fatores de Veículos
ESAL	Equivalent Single Axle Load
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
GMR	General Motors Research
HDM	Highway Development & Management
HRSI	Highway Safety Research Institute
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP	Índice de Condição do Pavimento
ICPR	Índice de Condição do Pavimento Flexível
ID	Idade do Pavimento
IES	Índice de Estado de Superfície

IGG	Índice de Gravidade Global
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
IGI	Índice de Gravidade Individual
INGÁ	Instituto de Gestão das Águas e Clima
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IQL	Information Quality Levels
IRI	International Roughness Index
IRRE	International Road Roughness Experiment
ISA	Índice de Serventia Atual
LA	Lama Asfáltica
LVC	Levantamento Visual Contínuo
MERLIN	Machine for Evaluating Roughnesses using Low-cost Instrumentation
NIST	National Institute of Standards and Technology
O	Outros revestimentos
PCA	Portland Cement Association
PICR	Pesquisa do Interrelacionamento dos Custos de Construção, Manutenção e Utilização de Rodovias
PL	Pluviometria
PPR	Present Performance Rating
PSI	Present Serviceability Index
PSR	Present Serviceability Rating
PURD	Portable Universal Roughness Device
QI	Quociente de Irregularidade
RCI	Riding Confort Index
RDME	Road Deterioration and Maintenance Effects
RSP	Road Surface Profiler
SEI	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia
SHRP	Strategic Highway Research Program
SGP	Sistemas de Gerência de Pavimentos
SMITR	Sistemas de Medidas de Irregularidade do Tipo Resposta
SN	Número Estrutural
SNC	Número Estrutural Corrigido
SRH	Superintendência de Recursos Hídricos

SV	Slope Variance
TA	Tráfego
TCP	Tratamento Contra/Pó
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USP	Universidade de São Paulo
VMDA	Volume Médio Diário Anual
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE SIGLAS.....	18
SUMÁRIO.....	21
1 INTRODUÇÃO	25
1.1 JUSTIFICATIVA	25
1.2 OBJETIVOS.....	27
1.3 MÉTODO	27
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS	29
2.2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	31
2.3 FATORES QUE INFLUEM NO PROCESSO DE DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	34
2.3.1 Fatores ambientais	34
2.3.2 Efeito do tráfego	36
2.3.3 Outros fatores	37
2.4 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	39
2.4.1 Irregularidade longitudinal da superfície.....	39
2.4.1.1 Desenvolvimento do Índice Internacional de Irregularidade (IRI)	40
2.4.1.2 Equipamentos de medição da irregularidade longitudinal	41
2.4.1.3 Escalas de medição da irregularidade longitudinal	45
2.4.2 Defeitos na superfície do pavimento	51
2.4.2.1 Métodos de levantamento de defeitos no campo.....	52
2.4.2.2 Índices combinados de defeitos	56
2.5 MODELOS DE DESEMPENHO	58
2.5.1 Modelos de desempenho desenvolvidos para redes de rodovias no Brasil e exterior	63
2.5.2 Modelos do Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM).....	65
3 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA PAVIMENTADA DO ESTADO DA BAHIA.....	69
3.1 CARACTERIZAÇÃO TERRITORIAL DO ESTADO DA BAHIA.....	69
3.1.1 Biomas do estado da Bahia.....	70
3.1.2 Regime pluviométrico, clima e temperatura do estado da Bahia	71

3.1.3	Relevo, geologia e tipos de solos	74
3.2	BANCO DE DADOS DA REDE RODOVIÁRIA DO ESTADO DA BAHIA	79
3.2.1	Projeto.....	80
3.2.2	Idade dos pavimentos	82
3.2.3	Pluviometria	83
3.2.4	Avaliação da condição de superfície dos pavimentos	83
3.2.5	Tipos de revestimento asfálticos.....	86
3.2.6	Tráfego.....	87
4	PLANEJAMENTO FATORIAL PARA DESENVOLVIMENTO DOS	
	MODELOS DE DESEMPENHO.....	93
4.1	PLANEJAMENTO FATORIAL	93
4.1.1	Escolha das variáveis.....	95
4.1.2	Planejamento fatorial para os trechos em CBUQ.....	97
4.1.3	Planejamento fatorial para os trechos em tratamento superficial duplo.....	99
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL	102
4.2.1	Levantamentos em campo	102
4.2.2	Aferição do perfilômetro com o uso de nível e mira.....	104
5	DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE PREVISÃO DO	
	DESEMPENHO.....	109
5.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS (AED)	109
5.1.1	AED para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004	110
5.1.2	AED para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004	122
5.2	ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA)	135
5.2.1	ANOVA para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004	139
5.2.2	ANOVA para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004	141
5.3	ANÁLISE DE REGRESSÃO	144
5.4	VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS	147
5.4.1	Modelo de desempenho do Índice de condição do pavimento Flexível (ICPF)....	148
5.4.2	Modelo de desempenho da Área Total de Trincas (A_{TT})	150
5.4.3	Modelo de desempenho da Área de Desgaste (A_{Desg})	153
5.4.4	Modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})	156
5.4.5	Modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_s}) para clima semiárido a seco.....	158
5.4.6	Modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_u}) para clima subúmido a úmido	161
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MODELOS DE DESEMPENHO	165
6.1	ANÁLISE DOS EFEITOS DOS FATORES	165
6.1.1	Análise dos efeitos dos fatores ID, TA e PL no comportamento dos modelos	167

6.1.1.1	Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF).....	167
6.1.1.2	Área Total de Trincas (A_{TT})	169
6.1.1.3	Área de Desgaste (A_{Desg})	170
6.1.1.4	Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})	172
6.1.1.5	Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAS}) clima semiárido a seco.....	173
6.1.1.6	Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) clima subúmido a úmido	174
6.2	ANÁLISE COMPARATIVA COM MODELOS DE DESEMPENHO EXISTENTES	175
6.2.1	Modelo de desempenho para a Área Total de Trincas (ATT) para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004	175
6.2.2	Modelos de desempenho para a Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.....	177
6.2.3	Análise comparativa com estudo realizado pelo DERBA.....	183
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	187
	REFERÊNCIAS	191
	ANEXO A – MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO	199
	ANEXO B – MODELO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO HDM-4.....	211
	ANEXO C – TABELAS DE VALORES DOS PARÂMETROS DOS TRECHOS.....	215
	ANEXO D – TRECHOS EM TSD SEM ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO ATÉ O ANO DE 2004, UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO FATORIAL DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL	222
	ANEXO E – TABELAS COM OS CÁLCULOS DOS COEFICIENTES E DOS TESTES ESTATÍSTICOS DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	236
	ANEXO F – VALORES DAS ESPESSURAS E DO CBR DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS DOS TRECHOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL	241

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil, devido às suas características geográficas e necessidade de crescimento, depende de sua malha rodoviária para obter maior eficiência na movimentação de passageiros e cargas. De acordo com dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2006), o setor de transporte rodoviário tem papel fundamental na atual realidade brasileira, pois é responsável por 96% do transporte de passageiros e por 62% do transporte de cargas.

A malha rodoviária brasileira é um patrimônio com valor estimado em 150 bilhões de dólares. Pesquisa recente da CNT revelou que parte desse patrimônio está deteriorada ou em franca deterioração, com 55% dos pavimentos em estado regular, ruim ou péssimo. Para reverter esse quadro, de forma que o sistema rodoviário atinja, em curto prazo, os padrões necessários de desempenho, proporcionando conforto, segurança e economia aos usuários, os investimentos necessários são estimados em vinte bilhões de reais, com um bilhão de reais por ano para as atividades de conservação (CNT, 2006).

Nas últimas décadas, o investimento em infraestrutura rodoviária tem sido muito aquém das necessidades do país e, dentre suas consequências, percebe-se a redução de competitividade dos bens produzidos no Brasil. Uma alternativa, provavelmente a melhor, para reversão desse quadro e consequente melhoria no desempenho dos pavimentos, é a implantação de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) pelos organismos rodoviários.

Um SGP é um conjunto de métodos que auxilia os tomadores de decisões na busca por melhores estratégias para fornecer e manter pavimentos em condições adequadas de serventia por um determinado período de tempo. A função de um SGP é melhorar a eficiência das decisões e ampliar suas possibilidades, avaliar as consequências das decisões tomadas, facilitar a coordenação de atividades dentro do órgão rodoviário e assegurar a consistência das decisões tomadas em diferentes níveis de gerência dentro da mesma organização.

Os Modelos de Previsão de Desempenho são uma das principais ferramentas de um SGP. Shahin (1994) afirma que os modelos de previsão da condição dos pavimentos desempenham uma função similar à que o motor desempenha em um carro, enquanto Lytton (1987) destaca que eles são absolutamente essenciais à gerência de pavimentos, tanto em nível de rede quanto em nível de projeto, seja para decisões técnicas ou econômicas.

Em nível de rede, a previsão de desempenho do pavimento é importante para planejamento, priorização de projetos e alocação de recursos. Em nível de projeto, a previsão de desempenho é importante para a definição de atividades de manutenção e reabilitação, exigindo maior acurácia das previsões, pois em nível de rede são usadas para a estimativa das necessidades totais de manutenção e reabilitação, com o propósito de programação de investimentos.

A quantificação do desempenho dos pavimentos existentes e a previsão da sua condição futura constituem um problema para os engenheiros rodoviários. A evolução das tecnologias de avaliação dos pavimentos e o crescimento do uso de SGP ressaltam a necessidade de modelos de desempenho cada vez mais confiáveis (BUTT et al., 1987).

Os modelos de previsão de desempenho devem refletir as condições às quais eles são aplicados e devem ser desenvolvidos a partir de dados locais. O Brasil representa um exemplo excelente dessa necessidade, pois possui condições climáticas diversificadas e grande variedade de solos (QUEIROZ, 1984).

Os modelos de desempenho devem retratar, da melhor forma possível, as condições regionais, uma vez que cada região apresenta características diferenciadas como tráfego, clima, capacidade de suporte do subleito, tipo de materiais empregados na construção, além de diferentes técnicas e controles construtivos. Portanto, a decisão sobre qual modelo de previsão empregar pode definir o sucesso das atividades desenvolvidas pelo SGP (NASCIMENTO e FERNANDES JR., 2005).

Toda agência rodoviária deve gerenciar seu patrimônio de forma racional e, para tanto, precisa ser capaz de prever o desempenho de seus pavimentos. O planejamento das ações de manutenção depende, acima de tudo, da capacidade das agências rodoviárias de prever a condição futura do pavimento. Falhas nesse processo podem resultar em escolhas erradas de estratégias e, conseqüentemente, em utilização ineficiente dos recursos.

Neste trabalho procura-se desenvolver modelos de previsão de desempenho, particularmente para a malha rodoviária do Estado da Bahia, quinto maior estado do Brasil em extensão territorial, com uma malha rodoviária estadual de mais de 20.000 km de rodovias pavimentadas, cobrindo uma área de aproximadamente 565.000 km² e situada em região de clima tropical. Com sua grande extensão, o Estado da Bahia apresenta significativa distinção quanto aos índices de precipitação pluviométrica em suas diferentes regiões, além de

influência marcante de seu relevo e de sua vegetação, sendo a caatinga predominante sobre a floresta tropical úmida e o cerrado.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para a malha rodoviária do Estado da Bahia. Os objetivos específicos da pesquisa são:

- desenvolver modelos de desempenho empíricos, com base no banco de dados de levantamentos anteriormente efetuados na malha rodoviária do estado da Bahia;
- desenvolver modelos empíricos para previsão de irregularidade longitudinal, com base nos dados coletados especificamente para o desenvolvimento deste trabalho e que foram objeto de um planejamento fatorial;
- identificar os fatores mais importantes no processo de deterioração dos pavimentos da malha rodoviária do Estado da Bahia;
- comparar os modelos de desempenho desenvolvidos para a malha rodoviária do Estado da Bahia com modelos de desempenho empíricos desenvolvidos para outras redes rodoviárias no Brasil e no exterior.

1.3 MÉTODO

Os modelos de desempenho foram desenvolvidos com os dados disponíveis no banco de dados de gerência de rodovias do DERBA, coletados em 2004, e com os dados complementares de irregularidade longitudinal coletados em 2009, quando, por um período de 15 dias, a equipe composta pelo doutorando Sérgio, pelo professor José Leomar (USP), pelo técnico de laboratório Armando e pelo motorista Assis (UFBA) percorreu mais de 3.000 km de rodovias no Estado da Bahia e executou 650 km de levantamentos de irregularidade longitudinal.

Foram aplicadas duas formas de análise estatística dos dados, Análise Exploratória de Dados (AED) e a clássica Análise de Variância (ANOVA), de forma complementar e com o

intuito de aumentar a validade e abrangência das conclusões. Ao final, os modelos de desempenho desenvolvidos são comparados com modelos de desempenho empíricos, utilizados em programas de gerência de pavimentos por organismos rodoviários do Brasil e do exterior.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na sequência deste trabalho, o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis, dando ênfase aos modelos empíricos, desenvolvidos no exterior e no Brasil, principal objetivo da pesquisa a ser desenvolvida neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização territorial da região e uma análise do banco de dados de gerência de rodovias do DERBA, coletados em 2004, de forma a subsidiar a seleção dos fatores que influem no desempenho de seus pavimentos, como o clima, a pluviometria, a idade dos pavimentos e o tráfego.

O Capítulo 4 apresenta os critérios para a escolha das variáveis em estudo, bem como o planejamento fatorial desenvolvido para a realização do experimento, que consistiu em coleta de dados complementares de irregularidade longitudinal.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação da Análise Exploratória de Dados e da Análise de Variância na determinação dos principais fatores intervenientes no desempenho dos pavimentos e suas interações. Em seguida, são desenvolvidos os modelos de previsão de desempenho dos pavimentos considerando os principais fatores definidos pela Análise Exploratória de Dados e pela ANOVA.

O Capítulo 6 apresenta os resultados e as análises dos modelos desenvolvidos, assim como um estudo comparativo com modelos desenvolvidos para outras redes viárias no Brasil e no exterior. E, finalmente, o Capítulo 7 é dedicado às conclusões do estudo realizado, bem como às recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um relato sobre o estado da arte no desenvolvimento de modelos de desempenho de pavimentos asfálticos. Com base na literatura são apresentados os principais conceitos relacionados ao desempenho de pavimentos asfálticos, modelos desenvolvidos no exterior e no Brasil, sua classificação e suas principais características.

2.1 DESEMPENHO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

O *AASHO Road Test*, realizado em Ottawa, Illinois, no período entre 1958 e 1961, foi um dos primeiros e mais expressivos esforços de se estudar o desempenho dos pavimentos sob a ação de cargas do tráfego. Anteriormente, pouca importância era dada à avaliação do desempenho dos pavimentos, ou seja, o histórico de sua serventia, definida como a capacidade de um pavimento em servir ao tráfego com conforto, segurança e economia.

A importância do *AASHO Road Test* é tão grande que o próprio conceito de serventia foi aí pela primeira vez apresentado, além de ter sido o primeiro estudo que relacionou quantitativamente o desempenho de pavimentos com fatores de projeto (propriedades dos materiais e espessuras das camadas) e com as cargas do tráfego (cargas por eixo e tipo de eixo), conforme destacado por Haas e Hudson (1978).

O desempenho é definido como a variação da serventia que o pavimento oferece aos seus usuários, ao longo do tempo ou após um determinado número de aplicações de cargas do tráfego, ou seja, o histórico da serventia fornecida ao usuário (CAREY; IRICK, 1960), como está ilustrado na Figura 2.1.

A medida da serventia atual de uma seção de pavimento foi primeiramente apresentada por Carey e Irick (1960), que estabeleceram cinco premissas fundamentais associadas ao conceito de serventia:

1. As rodovias são construídas para o conforto e conveniência dos usuários. Uma boa rodovia é aquela que é segura e confortável;
2. A opinião dos usuários sobre como a rodovia os está servindo é, em geral, subjetiva;

3. Existem características das rodovias que podem ser medidas objetivamente e que, quando medidas e combinadas de forma apropriada, são relacionadas à avaliação subjetiva dos usuários sobre a capacidade que a rodovia tem em servi-los;
4. A serventia de uma rodovia pode ser expressa pela média das avaliações dadas pelos usuários das rodovias;
5. Desempenho é a medida da serventia de um pavimento ao longo do tempo ou após um determinado número de aplicações de carga.

Figura 2.1 – Variação da serventia com o tempo / tráfego (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994)

Com base nessas premissas, o Índice de Serventia Atual - ISA (na sigla em inglês *PSI*) foi desenvolvido, quando do *AASHO Road Test*, da seguinte forma: equipes de avaliadores trafegavam por seções de pavimentos; cada membro da equipe anotava sua avaliação subjetiva em um formulário padronizado, numa escala pré-estabelecida (0 – péssimo a 5 – ótimo); a média aritmética dessas avaliações subjetivas fornecia o Valor de Serventia Atual – VSA (na sigla em inglês *PSR*); análise estatística para correlacionar o VSA com valores obtidos através de medidas físicas de defeitos do pavimento (avaliação objetiva); finalmente, previsão do valor do VSA a partir de avaliações objetivas constitui o Índice de Serventia Atual (ISA).

Uma técnica similar foi também desenvolvida pelo *Pavement Design and Evaluation Committee of the Canadian Good Roads Association*, entre as décadas de 50 e 60. Para o estudo

canadense, o índice era chamado de *Present Performance Rating* (PPR), posteriormente nomeado de *Riding Comfort Index* (RCI), para denotar explicitamente a avaliação exclusiva do conforto de rolamento (0 – péssimo a 10 – ótimo) (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

Os estudos realizados durante o *AASHO Road Test* mostraram que a maior influência sobre a serventia do pavimento era da irregularidade longitudinal do perfil superficial. De acordo com o Guia da *AASHTO* (1986), a serventia do pavimento, expressa pelo Índice de Serventia Atual, é obtida de medidas de irregularidade longitudinal, considerado o fator predominante na estimativa do ISA, e de defeitos do pavimento como trincas, remendos e deformações permanentes.

A forma original da equação do Índice de Serventia Atual, obtida a partir dos resultados do *AASHO Road Test*, é apresentada em Haas e Hudson (1978), conforme a Equação 2.1, para pavimentos flexíveis:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 1,38 RD^2 - 0,01(\sqrt{C + P})^{0,5} \quad R^2 = 0,84 \quad (2.1)$$

em que: PSI : índice de serventia atual;

SV : média da variância da declividade determinada por um perfilômetro;

RD : média da medida da deformação permanente na trilha de roda (pol);

C : é a extensão, em pés, das trincas, por 1000 pés quadrados de área;

P : é a área de remendos, em pés quadrados, por 1000 pés quadrados de área.

A equação do PSI para o *AASHO Road Test* foi desenvolvida por meio de regressão múltipla, isto é, um grupo de medidas físicas foi relacionado às avaliações subjetivas. Embora essas medidas físicas tenham incluído defeitos do pavimento, como deformações permanentes nas trilhas de rodas, trincamento e remendos, foi a medida objetiva da irregularidade que mostrou ter maior correlação com a média das avaliações subjetivas (VSA).

2.2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A resposta dos pavimentos sob a ação de cargas repetidas depende de fatores relacionados à composição do tráfego, ao clima e ao meio ambiente, às técnicas construtivas e materiais de construção empregados, bem como suas iterações. Por consequência, também

está relacionada aos mecanismos de deterioração dos pavimentos, influenciando no histórico da serventia da estrutura ao longo do tempo, ou seja, seu desempenho.

Fernandes Jr. (1994) apresenta como principais fatores que contribuem para o início, propagação e acúmulo de deterioração os ambientais (temperatura e teor de umidade) e as solicitações do tráfego (carga por eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de suspensão etc.). Além desses fatores, qualidade dos materiais, as técnicas e cuidados construtivos e as estratégias de manutenção e reabilitação também podem influir na deterioração dos pavimentos ao longo da vida em serviço.

Os principais conceitos relacionados aos mecanismos de deterioração de pavimentos, como apresentado por Hudson (1971), são:

1. Resposta Estrutural: é a reação do pavimento às cargas e ao meio ambiente, manifestada por uma variação no estado de tensão. As respostas estruturais (tensões, deformações e deslocamentos) quando levadas ao limite, em termos de magnitude ou número de repetições, podem causar algumas das formas de deterioração dos pavimentos;

2. Deterioração: são as consequências visíveis do efeito cumulativo das cargas e do meio ambiente sobre os pavimentos. As formas de deterioração associadas ao comprometimento estrutural dos pavimentos e que contribuem significativamente para a redução da serventia de um pavimento são as trincas por fadiga do revestimento asfáltico e a deformação permanente nas trilhas das rodas;

3. Fratura: é o estado em que as partes de uma estrutura são separadas (por exemplo, em razão de trincas causadas por carga excessiva, pela aplicação repetida de carga, ou por contração e expansão causadas por fatores ambientais);

4. Distorção: é a mudança da forma original do pavimento (por exemplo, a deformação permanente nas trilhas das rodas, que se manifestam na seção transversal e pode ser causada por carga excessiva, fluência, densificação ou expansão, e a irregularidade longitudinal);

5. Desintegração: é o estado em que o pavimento é decomposto em seus elementos (por exemplo, faixas desgastadas em razão da distribuição irregular de ligante betuminoso, da abrasão provocada pelo tráfego, de reatividade química ou pelo envelhecimento natural do ligante asfáltico).

Os modelos de desempenho utilizados no auxílio ao processo de decisão são úteis quando conseguem explicar o processo de deterioração dos pavimentos, pois a estimativa da sua evolução (ou taxa de deterioração) é importante na determinação da vida em serviço do pavimento, definida como o período compreendido entre o início de aplicação das cargas do tráfego e uma intervenção de reabilitação.

De acordo com Haas e Hudson (1978), a ruptura ocorre quando as tensões ou deformações atingem seu valor limite para o material empregado, o que ocasiona a ocorrência de defeitos estruturais em forma de trincas ou deformações permanentes. Os defeitos estruturais, no entanto, não constituem a “ruptura” do pavimento, que ocorre somente quando o acúmulo de defeitos reduz a serventia do pavimento a um nível abaixo do aceitável pelos usuários ou estabelecidos pelos engenheiros da rodovia.

Segundo Yoder e Witczak (1975), o processo de deterioração de pavimentos tem dois aspectos, o estrutural e o funcional. No primeiro caso há a fratura de uma ou mais partes da estrutura do pavimento, até o ponto que o pavimento seja incapaz de suportar as solicitações impostas pelo tráfego. Já a ruptura funcional, que pode ou não vir acompanhada da estrutural, ocorre quando o pavimento não consegue fornecer condições de segurança e conforto aos seus usuários, devido, particularmente, à irregularidade longitudinal.

De acordo com a equação de desempenho do Método *AASHTO* (1986), a maior contribuição à perda da serventia está relacionada à variação da irregularidade longitudinal, sendo menos significativas as contribuições da deformação permanente nas trilhas de rodas e das trincas por fadiga e remendos no revestimento asfáltico. Entretanto, Fernandes Jr. (1994) comenta sobre a forte correlação que há entre as formas de deterioração estrutural (trincas por fadiga e deformação permanente) e a irregularidade longitudinal (forma de deterioração funcional), indicando que, muito frequentemente, ambas ocorrem simultaneamente no pavimento.

Segundo Fernandes Jr. (1994), existem duas causas que podem explicar essa correlação. Primeiro, os pavimentos, com a ocorrência de trincas, permitem a entrada de água e o enfraquecimento estrutural, que resulta na irregularidade longitudinal. A segunda causa é que a irregularidade longitudinal, devido à consolidação e deformações cisalhantes, acarreta cargas dinâmicas excessivas e rápida progressão das trincas. Essas hipóteses estão em conformidade com o postulado sobre mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis estabelecido pelo *AASHTO Road Test*: o início das trincas e sua progressão geralmente estão associados a um certo grau de deformação permanente, sendo também, resultado da mudança

na distribuição de tensões e perda de capacidade de carga, causada pela infiltração de água, com a irregularidade longitudinal podendo ser atribuída a esse processo de enfraquecimento estrutural (SMEATON; SENGUPTA; HASS, 1980).

2.3 FATORES QUE INFLUEM NO PROCESSO DE DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A deterioração dos pavimentos em serviço é causada, principalmente, pela ação combinada dos efeitos das cargas do tráfego e da ação do meio ambiente nos materiais que compõem sua estrutura.

2.3.1 Fatores ambientais

O efeito do meio ambiente é um dos fatores que afetam o desempenho dos pavimentos. Quando as condições ambientais da região onde o pavimento foi construído variam de forma significativa, fatores ambientais como temperatura e teor de umidade podem estar fortemente relacionados à deterioração dos pavimentos e devem ser incluídos no processo de investigação do desempenho dos pavimentos.

Os dois principais fatores ambientais, de acordo com o Manual da *AASHTO* (1986), no que diz respeito tanto ao desempenho de pavimentos quanto ao projeto de novas estruturas, são a temperatura e as precipitações de águas de chuvas que se infiltram no pavimento, alterando o teor de umidade das camadas que o constituem.

A infiltração da água das chuvas pode ocorrer por meio de trincas ou panelas na superfície dos pavimentos, defeitos nas bordas ou nos acostamentos etc. Isto permite que a água chegue às camadas do pavimento e ao subleito, aumentando o seu teor de umidade, por consequência reduzindo sua capacidade estrutural, o que pode resultar na aceleração do seu processo de deterioração. A intensidade da chuva e sua infiltração no pavimento têm impacto direto na capacidade estrutural do pavimento (YODER; WITCZAK, 1975).

Haas, Hudson e Zaniewski (1994) chamam a atenção para importância relativamente pequena dada para a investigação do efeito da variação de umidade no desempenho dos pavimentos, muito embora seus efeitos sejam tão importantes quanto os da temperatura.

Frequentemente, a drenagem do pavimento é considerada como um assunto separado do processo de dimensionamento do pavimento, com a suposição de que as condições de drenagem serão adequadas e não ocorrerá variação significativa do teor de umidade dos materiais.

De acordo com Markov (1982), a infiltração da água no pavimento, por meio de trincas ou de juntas, resulta no enfraquecimento potencial da estrutura do pavimento, que depende do tempo que as camadas permanecerão saturadas, que por sua vez, é função da quantidade de água que se infiltrou e das características de drenagem dos materiais.

O Manual da AASHTO (1986) também descreve alguns dos prejuízos causados pela infiltração da água no pavimento, como redução da resistência do subleito e das camadas do pavimento e bombeamento de material fino das camadas inferiores, resultando na perda da capacidade de suporte dos pavimentos flexíveis. O mesmo manual também chama a atenção para o efeito da infiltração da água associado a baixas temperaturas, ou seja, o congelamento, que causa uma série de defeitos no do pavimento.

Os efeitos da temperatura no comportamento dos pavimentos podem ser divididos em três categorias (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994):

- altas temperaturas durante a mistura e aplicação, que podem afetar a durabilidade do revestimento asfáltico;
- temperaturas médias durante a vida em serviço, cuja variação pode afetar a estabilidade, a susceptibilidade a deformações permanentes e a progressão de trincas; sob a aplicação de cargas repetidas do tráfego;
- baixas temperaturas do pavimento em serviço, que podem resultar no aparecimento de trincas térmicas por retração.

Apesar das altas temperaturas durante a mistura e aplicação e as baixas temperaturas durante o inverno rigoroso de países com clima temperado influírem no desempenho dos pavimentos, não fazem parte do escopo deste trabalho.

No Brasil, as altas temperaturas do ar e a grande absorção de radiação solar contribuem para o amolecimento do revestimento asfáltico, com ocorrência de deformações plásticas quando submetido às cargas do tráfego (PREVITERA, 1974).

De acordo com Medina e Motta (2005), a rigidez dos revestimentos asfálticos depende da temperatura, que controla a viscosidade dos ligantes. As variações diárias e sazonais da

temperatura causam variações da rigidez, ou seja, a deformabilidade do pavimento é condicionada pelas variações da temperatura do ar e pelas condições meteorológicas de um modo geral.

A idade do pavimento é um indicativo de envelhecimento e das propriedades dos materiais, em especial o ligante asfáltico. A idade e a intensidade da ação dos fatores ambientais aumentam a rigidez do revestimento asfáltico, o que associado ao acúmulo das solicitações dos eixos dos veículos, resulta no aparecimento de trincas por fadiga do material.

Estudos realizados por Paterson (1989), para o desenvolvimento de modelos de desempenho com dados coletados no Brasil - quando da Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), iniciada em 1975 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1982) - mostraram que, além do tráfego, a idade dos pavimentos, desde a sua construção ou última atividade de reabilitação, apresenta forte relação com a evolução das irregularidades e que os modelos de desempenho deveriam incluir os efeitos do tráfego e da idade dos pavimentos. Igualmente, estudo realizado por QUEIROZ (1984), considerou modelo de deterioração funcional de uma estrada pavimentada definido pelo tráfego e pela idade (desde a sua construção inicial ou após um recapeamento).

2.3.2 Efeito do tráfego

Um pavimento é construído para resistir às solicitações, impostas pelo meio ambiente e pelo tráfego, ao longo do período considerado em projeto para sua vida útil. O processo de deterioração ocorre devido ao acúmulo do dano causado pela aplicação de cargas sucessivas pelos eixos dos veículos, ou seja, elementos de transferência de carga para os pavimentos.

Devido a diversidade de eixos (eixo simples, tandem, triplo e quádruplo), bem como sua configuração nos veículos que compõem o tráfego, é usual convertê-los em um número equivalente de passagens de um eixo padrão (Equivalent Single Axle Load – ESAL). De acordo com o manual AASHTO (1986), os resultados do *AASHTO Road Test* mostraram que o dano causado pelo efeito da passagem de um eixo de qualquer massa (ou carga aplicada) pode ser representado por um número equivalente de aplicações de carga de um eixo padrão de 80 kN (18000 lbf). Por exemplo, pela aplicação de um eixo simples de 50 kN percebeu-se que foi causado um dano aproximadamente igual a 0,25 da aplicação do eixo padrão de 80 kN, ou

seja, quatro aplicações do eixo simples de 50 kN eram necessárias para causar o mesmo dano (ou redução na serventia do pavimento) causado por uma aplicação do eixo padrão de 80 kN.

De acordo com Fernandes Jr. (1994), a carga por eixo, independentemente dos fatores ambientais, do comportamento estrutural dos pavimentos e da ação combinada de outros fatores de tráfego, é a que mais afeta a deterioração dos pavimentos. Pode, muitas vezes, não ser o único fator significativo, mas tem de ser considerada, sempre, quando se tratar dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos.

Para o cálculo do efeito cumulativo das solicitações do tráfego, além da magnitude das cargas por eixo e do tipo de eixo, deveriam ser considerados também os efeitos da pressão de enchimento dos pneus, do tipo de rodagem, do tipo de pneu e do sistema de suspensão, conforme destacado por Fernandes Jr., (1994). Outros autores como Yoder e Witczak (1975), Huang (1993), Haas, Hudson e Zaniewski (1994), Medina (1997) e Medina e Motta (2005), também chamam a atenção para a influência desses fatores em uma análise mecanística ou empírico-mecanística de projetos e de desempenho de pavimentos, mas que não fazem parte do escopo deste trabalho.

2.3.3 Outros fatores

Os fatores ambientais e de tráfego, agindo ao longo do tempo de operação de uma rodovia, aparecem como os principais fatores no processo de deterioração dos pavimentos flexíveis. Entretanto, outros fatores como os critérios de projeto, as técnicas construtivas, o tipo de estrutura e materiais utilizados e as estratégias de manutenção e reabilitação, também poderiam ser incluídos como variáveis explicativas do processo de deterioração dos pavimentos, segundo autores como Hudson (1978), Darter (1980), Lytton et al (1982), Queiroz (1984), Paterson (1987), Haas, Hudson e Zaniewski (1994).

O projeto estrutural de pavimentos inclui informações como a capacidade de suporte do subleito e das demais camadas, com o objetivo de determinar as espessuras necessárias para atender a um determinado tráfego, durante sua vida em serviço. A escolha dos materiais é baseada nas propriedades requeridas pelo projeto estrutural, levando em consideração seu custo. Como os pavimentos têm a função de transferir as cargas do tráfego ao terreno natural (ou subleito), propriedades como espessura das camadas e resistência dos materiais que o compõem representam impacto no desempenho dos pavimentos.

As técnicas construtivas estão diretamente relacionadas à qualidade inicial do pavimento, que têm reflexo no desempenho do pavimento ao longo da sua vida em serviço. Nos pavimentos asfálticos, por exemplo, um dos principais fatores que afetam sua qualidade inicial é o grau de compactação. Baixa compactação do subleito ou falta de controle no processo pode levar a uma série de problemas, como o aparecimento de trincas ou deformações permanentes. Também, fatores como a temperatura de aplicação e pressão de compactação do revestimento asfáltico pode favorecer o aparecimento de irregularidades imediatamente após a abertura ao tráfego e o aparecimento de defeitos durante a vida em serviço.

O propósito das atividades de manutenção e reabilitação é manter o pavimento em condições mínimas aceitáveis de serventia. Na prática, atividades de manutenção de rotina, reabilitação e recapeamento são aplicadas de acordo com a severidade dos defeitos. A realização das atividades de manutenção, antes que o pavimento atinja níveis mínimos aceitáveis de serventia, pode permitir o prolongamento de sua vida em serviço. Atividades de reabilitação são aplicadas, normalmente, a seções que já atingiram um nível mínimo aceitável de serventia e apresentam um estado avançado de deterioração. Os efeitos das atividades de manutenção e reabilitação podem ser observados, por meio da melhoria das condições do pavimento e da redução na taxa de deterioração do pavimento.

Muito embora sejam fatores que também afetam o desempenho dos pavimentos, por vezes deixam de ser incluídos dentre as variáveis explicativas dos modelos de deterioração dos pavimentos por falta de informações nos bancos de dados das agências responsáveis pelo gerenciamento de suas rodovias.

Dentre as causas da falta dessas informações pode estar incluído o julgamento, dentre o grupo de especialistas que gerenciam uma rede, de que tais variáveis são menos significativas para a avaliação do desempenho dos seus pavimentos. Entretanto, não deveriam ser ignoradas, pois o processo de deterioração dos pavimentos pode não ser bem explicado somente pelas variáveis geralmente observadas e consideradas significativas até o presente.

Outro fato que não pode ser ignorado é a restrição de recursos para a coleta de dados e informações necessários para o gerenciamento de uma rede de rodovias no Brasil. Por ser um país de grande área territorial e dependente de extensa malha rodoviária, necessita de mudanças no sentido de se incentivar as pesquisas, os investimentos e também a cultura de coleta e manutenção das informações necessárias para o gerenciamento de suas rodovias.

2.4 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os pavimentos flexíveis podem ser, geralmente, avaliados por quatro atributos, para medir sua condição atual (ZHANG; ZINGH; HUDSON, 1993) e (HAAS, HUDSON; ZANIEWSKI, 1994), são eles:

- Irregularidade longitudinal da superfície – avaliação funcional;
- Defeitos na superfície do pavimento – levantamento de defeitos no campo;
- Deflexões recuperáveis - avaliação da capacidade estrutural;
- Coeficiente de atrito pneu-pavimento – avaliação de segurança.

Na sequência são comentados os aspectos relacionados apenas à avaliação funcional e ao levantamento de defeitos no campo, pelo motivo de serem os parâmetros utilizados no desenvolvimento dos modelos de desempenho desta pesquisa.

2.4.1 Irregularidade longitudinal da superfície

A *American Society for Testing Materials* (ASTM), de acordo com a especificação E867-82, define a irregularidade como “desvios de uma superfície, em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características que afetam a dinâmica do veículo, a qualidade de rolamento, a dinâmica das cargas e a drenagem”. Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) definem a irregularidade longitudinal da superfície como “a variação na elevação da superfície que induz vibração aos veículos”.

A irregularidade da superfície do pavimento é considerada o mais importante indicativo de desempenho dos pavimentos, pois afeta diretamente o conforto e a segurança dos usuários da rodovia, além de estar relacionada com os custos operacionais dos veículos. De acordo com Paterson (1987), a irregularidade longitudinal da superfície influencia a dinâmica do movimento e a operação do veículo, por consequência, o conforto dos usuários, o desgaste e os custos operacionais dos veículos, a segurança e o impacto das rodas do veículo sobre o pavimento. A segurança é afetada, pois, segundo Burns (1981), a irregularidade pode causar problemas que afetam a resposta dos veículos aos estímulos do perfil, que podem levar a perda do controle do veículo e, conseqüentemente, resultar em acidentes.

A irregularidade pode ser descrita em termos de “distorções da superfície do pavimento” que podem gerar aceleração vertical e lateral no veículo. A aceleração vertical é provocada pelas distorções longitudinais, sendo o principal fator de desconforto do usuário. O deslocamento lateral é gerado pelas curvas horizontais e pelas elevações transversais diferenciadas do pavimento. Os custos dos usuários são também afetados, pois as distorções afetam a dinâmica dos veículos, que por sua vez, influencia os custos de operação dos veículos pelo aumento do seu desgaste, manutenção e maior tempo de viagem (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

A irregularidade do pavimento de uma rodovia pode variar com o tempo e geralmente segue a tendência de reduzir o desempenho com o avanço da idade. O aumento da irregularidade vai depender, também, de fatores relacionados ao controle de execução durante a obra, ao tipo de estrutura, a exposição ao tráfego e ao meio ambiente (BURNS, 1981).

2.4.1.1 Desenvolvimento do Índice Internacional de Irregularidade (IRI)

Muito embora vários estudos tenham sido desenvolvidos, nos anos que se seguiram ao *AASHO Road Test*, com o objetivo de determinar uma medida física para a irregularidade, a maioria das medidas não era facilmente comparável porque não havia equivalência entre métodos e medidas utilizados para caracterizar a irregularidade (SAYERS; GILLESPIE; QUEIROZ, 1986). De acordo com Hudson (1980), várias medidas de irregularidade eram usadas ao redor do mundo e comparações entre as medidas não eram fáceis, porque nenhum sistema de medida de irregularidade era capaz de apresentar resultados equivalentes para diferentes condições. Era necessário que houvesse um sistema capaz de determinar medidas compatíveis em quaisquer condições.

Na década de 70, o Banco mundial financiou várias pesquisas rodoviárias em países em desenvolvimento, cujo objetivo era uma investigação detalhada sobre a composição dos custos totais do transporte rodoviário, em função dos custos de construção, de manutenção e de utilização das estradas. Nessas pesquisas, a irregularidade foi identificada como o principal fator envolvendo a qualidade de rolamento (conforto) e os custos dos usuários. Entretanto, dados de irregularidades de diferentes partes do mundo não podiam ser comparados e, até mesmo os levantados num mesmo país eram de pouco valor porque eram baseados em métodos não consistentes no tempo (SAYERS; KARAMIHAS, 1998).

Finalmente, em 1982, o Banco Mundial conduziu uma pesquisa (*International Road Roughness Experiment – IRRE*) no Brasil, com fins de estabelecer uma correlação e um padrão de calibração para medidas de irregularidade (SAYERS; GILLESPIE; QUEIROZ, 1984). Os resultados do IRRE mostraram que um índice padrão de irregularidade era, de fato, possível, e um índice foi proposto, cuja metodologia de obtenção poderia se utilizar da maioria dos equipamentos de medição utilizados à época. O índice resultante dessa metodologia foi chamado de Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional (IRI - *International Roughness Index*).

O IRI é uma escala de medida de irregularidade baseada num modelo matemático chamado quarto-de-carro, que simula os movimentos verticais induzidos a uma roda sob velocidade de 80 km/h. Os movimentos verticais induzidos são acumulados e divididos pela distância percorrida, resultando num índice com unidade m/km (SAYERS; GILLESPIE; QUEIROZ, 1986). O IRI foi o primeiro índice padrão para a medição de parâmetros ligados às irregularidades largamente utilizado, possível de ser correlacionado com diferentes tipos de medidores de perfil, cujos resultados são expressos em unidades como m/km, in/mi, contagens/km etc.

2.4.1.2 Equipamentos de medição da irregularidade longitudinal

Os equipamentos ou processos de medidas da irregularidade longitudinal de pavimentos podem ser classificados em (SAYERS; GILLESPIE; PATERSON, 1986):

- Sistemas de Medidas Indiretas do Perfil (Perfilômetros) – um exemplo de equipamento utilizado neste tipo de sistema de medição é o Perfilômetro Dinâmico de Superfície – GMR, do tipo inercial, como apresentado na Figura 2.2. Esse tipo de perfilômetro requer quatro componentes básicos: aparelho para medir a distância entre o veículo e a superfície do pavimento (transdutor – em sua versão inicial era utilizado um potenciômetro conectado a uma roda em contato com a superfície do pavimento); aparelho de referência inercial para compensar o movimento vertical do veículo (acelerômetro); hodômetro para a localização do veículo na seção do pavimento; micro computador para registrar e analisar os dados. O acelerômetro, mecânico ou eletrônico, montado no chassi, tem a finalidade de medir a aceleração vertical do veículo durante o percurso no trecho da rodovia.

Integra-se duas vezes a aceleração vertical para quantificar os deslocamentos verticais da massa do veículo (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

Figura 2.2 – Perfilômetro Dinâmico de Superfície - GMR (GILLESPIE; SAYERS; HAGAN, 1987)

Alguns perfilômetros registram o perfil real da superfície do pavimento, enquanto que outros processam os dados no computador e apenas registram o sumário estatístico da irregularidade (YSHIBA, 2003). Outros exemplos: perfilômetro CHLOE; Analisador do Perfil Longitudinal – APL; perfilômetro K. J. Jaw; MERLIN (*Machine for Evaluating Roughnees using Low-cost Instrumentation*) do TRRL.

Atualmente, é comum que os equipamentos de medidas indiretas do pavimento do tipo inercial utilizem sensores óticos, a laser ou ultrassônico, para medir a distância entre o veículo e a superfície da rodovia (Figura 2.3). Os óticos e a laser baseiam-se na projeção e no ângulo de reflexão de uma imagem sobre a superfície para determinar, por meio de triangulação, a distância entre o aparelho que a emite e a superfície de reflexão. Já os ultrassônicos trabalham com a emissão e a reflexão de ondas sonoras (SAYERS; KARAMIHAS, 1998). Os equipamentos que contam com esse tipo de recurso coletam os dados do perfil em pontos discretos que servem de entrada para um programa de computador que calcula as elevações, distâncias e índices de irregularidades. Exemplos: o perfilômetro a laser do TRRL e o Dynatest Mark II RSP – Road Surface Profiler.

Figura 2.3 - Perfilômetro inercial com sensor (SAYERS E KARAMIHAS, 1998)

- Sistemas de Medidas de Irregularidade do Tipo Resposta (SMITR) – as reações dos veículos às irregularidades são medidas e acumuladas em termos de deslocamentos verticais entre o eixo traseiro e o chassi do veículo, em resposta à excitação dinâmica provocada pelo movimento ao longo do perfil. Existem sistemas de medidores mecânicos de deslocamentos entre o chassi e o eixo do veículo, por exemplo, o Rugosímetro BPR, o Mays Ride Meter, o Bump Integrator, o PCA meter e o sistema integrador IPR/USP. Sistemas medidores da resposta do veículo à irregularidade, por meio de acelerômetro, por exemplo: o *Automatic Road Analyzer* (ARAN) e o *Portable Universal Roughness Device* (PURD) (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

A maioria dos medidores de irregularidade do tipo resposta segue o conceito do equipamento desenvolvido pelo *Bureau of Public Roads* (BPR), ou Roughometer. O BPR é um sistema de reboque com roda única (Figura 2.4), cujo mecanismo simula um quarto de carro, para medir a resposta às irregularidades e processar as informações sobre os movimentos verticais entre o eixo e o chassi do veículo e reduzi-las a um simples sumário estatístico, isto é, um número que descreve a irregularidade do pavimento (SAYERS; GILLESPIE; PATERSON, 1986) (SAYERS; KARAMIHAS, 1998).

Figura 2.4 – Rugosímetro BPR (SAYERS; KARAMIHAS, 1998)

Apesar de seguir o conceito do mecanismo desenvolvido para o BPR, os equipamentos medidores do tipo resposta são, geralmente, montados em um veículo de passeio, como mostrado na Figura 2.5. A medida da irregularidade longitudinal é obtida pelo somatório dos valores absolutos dos deslocamentos verticais, dividido pela distância percorrida na rodovia. A sua unidade é dada, normalmente, em in /mi ou mm/km, muito embora algumas vezes pode ser dada em contagens/mi ou km, a depender do programa utilizado (SAYERS E KARAMIHAS, 1998).

Figura 2.5 – Mays Ride Meter (SAYERS; KARAMIHAS, 1998)

No Brasil, o sistema integrador IPR/USP é o aparelho do tipo resposta mais utilizado. Ele é montado em veículo de passeio médio e à medida que se desloca sobre a via, o integrador fornece o somatório dos valores absolutos dos deslocamentos verticais de um ponto do diferencial, em relação à carroceria do veículo. O procedimento DNER-PRO 182/94 (DNER, 1994b) normaliza o emprego do sistema integrador IPR/USP para medidas de irregularidade de pavimentos (BENEVIDES, 2006).

De acordo com Haas, Hudson e Zaniewski (1994), dentre suas vantagens estão o baixo custo de aquisição e operação, velocidade de operação próxima à velocidade do tráfego, obtenção dos dados de irregularidade em termos de levantamento global, fácil operação e boa reprodutibilidade. Suas principais desvantagens são necessidade frequente de calibração e adequada manutenção, por serem equipamentos afetados por fatores como velocidade do veículo, desgaste dos componentes da suspensão, desgaste e variação de pressão do pneu e alteração na carga transportada.

- Sistemas de Medidas Diretas do Perfil – medem, de forma direta e com acurácia, a geometria do perfil longitudinal do pavimento em cada uma das trilhas de roda, como por exemplo, o conjunto nível e mira. Devido ao nível de acurácia e reprodutibilidade de suas medidas, são utilizados para a calibração ou validação de outros métodos, em pesquisas ou em casos especiais onde há necessidade de tal acurácia (SAYERS; GILLESPIE; PATERSON, 1986). Outros exemplos são a viga do TRRL e o *Dipstick*.

2.4.1.3 Escalas de medição da irregularidade longitudinal

A irregularidade pode ser medida em diversas escalas, que dependem diretamente do equipamento utilizado para a avaliação da superfície do pavimento. Se o equipamento mede o perfil longitudinal, então é necessário que se reduza os dados obtidos a um sumário estatístico. Se, por outro lado, mede a resposta do veículo à irregularidade do pavimento, é necessário que se correlacione as medidas obtidas a uma escala comum, para que possam ser comparadas às medidas efetuadas por diferentes equipamentos, de modo a propiciar uma consistente e estável medida de irregularidade (YSHIBA, 2003).

Os três sumários estatísticos de uso mais comum são (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994):

- Modelo de simulação de Quarto-de-Carro – o modelo consiste de uma simulação de um veículo simplificado, formado pela massa do chassi, um amortecedor, uma mola e uma roda (Figura 2.6). O modelo de Quarto-de-Carro pode ser descrito matematicamente através de duas equações diferenciais de segunda ordem (Equações 2.2 a 2.3), conforme apresentado por Queiroz (1984) e ASTM (1170):

$$-K_1(X_1 - X_2) - D(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) = M_1 \ddot{X}_1 \quad (2.2)$$

$$K_1(X_1 - X_2) + D(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_2(X_2 - W) = M_2 \ddot{X}_2 \quad (2.3)$$

em que: K_1 , K_2 e D : constantes;

X_1 : ordenada da massa suspensa;

X_2 : ordenada da massa não suspensa;

W = ordenada do perfil.

Figura 2.6 – Esquema do simulador de quarto de carro (KARAMIHAS, 2005)

Como o equipamento do tipo resposta mede o deslocamento entre o chassi e o eixo do veículo, deve-se calcular a diferença das elevações entre o chassi e o eixo em resposta ao perfil do pavimento, na direção do movimento do veículo. Isto é feito pela integração das diferenças nas velocidades entre as massas suspensas e não suspensas, produzindo a estatística de quarto de carro (QC) (Equação 2.4) (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994):

$$QC = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{X}_1 - \dot{X}_2| dt \quad (2.4)$$

em que: L : distância ao longo da estrada;

V : velocidade de avanço.

De acordo com Haas, Hudson e Zaniewski, (1994), dois grupos de constantes físicas têm sido utilizados para o cálculo das estatísticas de Quarto-de-Carro. Um grupo representa os parâmetros originais do BPR e outro um grupo de parâmetros desenvolvidos na pesquisa do *Highway Safety Research Institute* (HSRI), como apresentado na Tabela 2.1, já normalizados pelo valor da massa suspensa. Na pesquisa internacional de medição de irregularidade, promovida pelo Banco Mundial, realizada no Brasil em 1982, a estatística de Quarto-de-Carro calculada foi chamada de Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional de (IRI).

Tabela 2.1 – Constantes físicas do modelo de simulação do Quarto-de-carro (ASTM E1170-1997)

<i>Tipo de veículo</i>	$K_1 (seg^{-2})$	$K_2 (seg^{-2})$	M	$D (seg^{-1})$
BPR	129	643	0,16	3,9
HSRI (Ride Meter)	63,3	653	0,15	6,0
Ride Meter - Trailer	125	622	0,26	8,0

- Aceleração Vertical Média Quadrática (AVMQ) – a aceleração vertical média quadrática é uma estatística de perfil longitudinal relativamente simples e que pode ser definida como a diferença média quadrática entre a variação de elevação e o intervalo de distância horizontal correspondente. Essa distância horizontal é o comprimento de base e a AVMQ pode ser computada para diversos comprimentos de base (QUEIROZ, 1984).

A AVMQ é obtida de elevações y_1, y_2, y_n de pontos igualmente espaçados ao longo de uma trilha de roda, de acordo com a Equação 2.5. A Figura 2.7 apresenta uma figura esquemática de determinação da Aceleração Vertical (AVMQ).

$$AVMQ_B = \left[\sum_{i=2}^{n-1} \frac{AV_i^2}{n-2} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

em que: $AVMQ_B$: aceleração vertical média quadrática, correspondente ao comprimento de base B ;

B : comprimento da base em metros;

n : número de elevações do perfil;

S_i : uma estimativa da derivada de y no ponto i (inclinação);

AV_i : uma estimativa da derivada segunda de y no ponto i (aceleração vertical).

Figura 2.7 – Esquema de determinação da AVMQ (KARAMIHAS, 1998)

Gillespie, Sayers e Segel (1980) desenvolveram uma metodologia de calibração em que a escala de medida de irregularidade é baseada na simulação de um quarto-de-carro para um perfil longitudinal medido por um perfilômetro. Queiroz (1984) desenvolveu um procedimento similar a partir de perfis medidos com nível e mira, para calibração de equipamentos do tipo resposta a partir de perfis medidos com nível e mira, em que a escala é o Quociente de Irregularidade (QI), dado em contagens/km.

Apesar da pesquisa realizada no Brasil (PICR) ter fornecido uma referência estável para a calibração do *Maysmeter* (QI) por meio de levantamentos realizados com perfilômetros, julgou-se conveniente examinar a viabilidade da obtenção do mesmo padrão através do levantamento do perfil dos pavimentos através de nível e mira, como já havia sido sugerido por Hudson (1980).

Os dados levantados através de nível e mira permitem calcular um sumário estatístico da seção, a aceleração vertical média quadrática (AVQM), que quantifica a irregularidade da superfície do pavimento. O valor de (QI) é obtido em função de $AVMQ_B$ cuja Equação 2.6 foi obtida quando da PICR (GEIPOT, 1981).

$$QI = -8,54 + 6,14AVQM_{1,0} + 19,38AVQM_{2,5} \quad (2.6)$$

em que: QI : quociente de irregularidade, contagens/km;

$AVQM_{1,0}$: aceleração vertical média quadrática com comprimento base igual a 1,0 m;

$AVQM_{2,5}$: aceleração vertical média quadrática com comprimento base igual a 2,5 m.

Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) estabeleceram a Equação 2.7 que correlacionam o QI e o IRI :

$$IRI = \frac{QI}{13} \quad (2.7)$$

em que: IRI : m/km;

QI_m : contagens/km.

Os valores de IRI típicos (SAYERS; GILLESPIE; QUEIROZ, 1986) são:

$1,5 \leq IRI \leq 2,5$ m / km para pavimentos em excelente condição;

$IRI \geq 12$ m / km para pavimentos em péssimas condições.

No que diz respeito a escala do QI , Paterson (1987) considera como o seguinte:

$15 < QI < 30$ contagens / km: excelente;

$30 \leq QI < 45$ contagens / km: boa;

$45 \leq QI < 60$ contagens / km: regular;

$60 \leq QI < 75$ contagens / km: má;

$75 \leq QI$ contagens / km: péssima.

Na Tabela 2.2 são apresentados os níveis de conceitos atribuíveis e relativos às condições de superfície do pavimento em função da avaliação subjetiva e as correspondentes faixas de valores de QI e IRI recomendados pelo Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2005).

Tabela 2.2 – Condições de superfície do pavimento (DNIT, 2006)

	<i>QI (cont./km)</i>	<i>IRI (m/km)</i>
Conceito		
Excelente	13-25	1-1,9
Bom	25-35	1,9-2,7
Regular	35-45	2,7-3,5
Ruim	45-60	3,5-4,6
Péssimo	> 60	> 4,6

- Variância da Declividade Longitudinal (SV) – a variância da declividade longitudinal (Slope Variance – SV) foi utilizada quando do *AASHO Road Test*, na tentativa de correlacionar o PSI (*Present Serviceability Index*) com medidas de variância da declividade longitudinal do pavimento, feitas com o perfilômetro CHLOE. A equação de determinação é apresentada na Equação 2.8, de acordo com Haas, Hudson e Zaniewski (1994):

$$SV = \frac{\sum_{i=1}^n \left[x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]}{n-1} \quad (2.8)$$

em que: SV: variância de inclinação;

x_i : a i-ésima medida de inclinação;

n : número total de medidas.

O principal problema do uso da SV é a determinação da declividade longitudinal do pavimento, pois técnicas modernas de medidas de perfil longitudinal normalmente utilizam espaçamento fixo, diferente daquele obtido com o perfilômetro CHLOE (HAAS, HUDSON e ZANIEWSKI, 1994). Embora também tenha sido utilizada na PICR por Queiroz (1984), para determinação do QI por meio de correlação com as medidas realizadas com o conjunto nível e mira, não apresentou uma estimativa melhor do que a realizada pela estatística da Aceleração Vertical Média Quadrática.

2.4.2 Defeitos na superfície do pavimento

Defeitos na superfície do pavimento podem ocorrer logo após a entrada em operação de uma rodovia ou ao longo de sua vida em serviço. No primeiro caso, pode estar associado a falhas na elaboração e critérios de projeto ou no processo construtivo. No outro, podem representar indícios de deterioração da estrutura do pavimento, que se refletem na superfície do pavimento, devido à ação das cargas do tráfego e efeitos do meio ambiente nos materiais que constituem o pavimento. Os defeitos na superfície ainda podem ocorrer devido a intervenções ocasionadas da necessidade de instalação de estruturas de apoio a infraestrutura como tubulações, por exemplo.

As avaliações de defeitos na superfície dos pavimentos são parte integrante de um SGP e são utilizados pelas agências rodoviárias, de forma complementar, para monitorar a condição de uma rede de rodovias. Estas avaliações dão subsídios para a determinação de apropriadas atividades de manutenção para desacelerar o processo de aparecimento de defeitos e deterioração, ou atividades de reabilitação para restabelecer a níveis aceitáveis de serventia o pavimento (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

Existem diferentes formas de se realizar o levantamento de defeitos de superfície que podem ser adotadas pelos órgãos em função do objetivo do levantamento (em nível de rede ou de projeto, por exemplo), da disponibilidade de recursos e equipamentos e também de pessoal capacitado para sua realização. Entretanto, é consenso entre autores como Hudson (1978), AASHTO (1986), Haas, Hudson e Zaniewski (1994) e Shahin (1994) que os levantamentos dos defeitos deveriam incluir além dos tipos de defeitos, sua severidade e sua extensão (ou densidade).

A Severidade é o grau de deterioração associado aos vários tipos de defeitos, geralmente classificados em níveis (baixo, médio e alto) e os termos extensão ou densidade referem-se à frequência de ocorrência ou área relativa da superfície do pavimento afetada por cada combinação do tipo de defeitos e severidade (YSHIBA, 2003).

A realização dos levantamentos de defeitos dos pavimentos, com fins de gerência, necessita de nomenclaturas e definições claras dos tipos, severidades e extensão, bem como os métodos de levantamento dos principais defeitos observados nos pavimentos. O Quadro 2.1 apresenta alguns dos principais manuais, catálogos e descrições de métodos de levantamentos encontrados na literatura.

Isto é importante porque pode-se definir critérios bem estabelecidos para a realização dos levantamentos e também a determinação do estado de condição atual de pavimentos de uma rede gerenciada. Desta forma pode-se gerar um banco de dados de levantamentos de defeitos de uma rede de rodovias com vistas a auxiliar no processo decisório sobre atividades de manutenção e reabilitação, bem como podem ser utilizados para o desenvolvimento de modelos de deterioração dos pavimentos.

2.4.2.1 Métodos de levantamento de defeitos no campo

A avaliação de defeitos pode ser realizada por meio de caminharmento ao longo da seção avaliada, pode ser realizada por avaliadores dentro de um veículo em movimento ou ainda pode ser realizada de forma automática, onde os veículos são aparelhados com equipamentos especiais dotados de câmeras fotográficas e de vídeo. As avaliações por meio de caminhada são utilizadas para os levantamentos que necessitam de dados mais precisos sobre a condição do trecho avaliado. Já os levantamentos realizados com o auxílio de veículos em movimento são mais recomendados para a avaliação de extensos trechos de uma rede, pois consomem menos tempo e recursos financeiros, quando comparados aos levantamentos realizados por meio de caminharmento.

A execução dos levantamentos por meio de caminharmento e a realizada por avaliadores dentro de um veículo em movimento podem ser classificados como manual, pois em ambos os procedimentos as características dos defeitos dos pavimentos são registradas pelo avaliador em planilhas para posterior processamento. Esta planilha pode ser constituída de uma folha de papel padronizada, na qual o avaliador registra as características dos defeitos utilizando códigos alfanuméricos, ou pode ser eletrônica, quando então o operador registra os defeitos utilizando um teclado e um computador (MARCON, 1996).

No levantamento automatizado as imagens do pavimento são registradas por meio de câmeras, possibilitando uma posterior análise das imagens (fotos e/ou vídeos) no escritório. Os veículos de última geração não apenas registram as imagens do pavimento, como também permitem a classificação e quantificação dos tipos de defeitos com base em um gabarito pré-estabelecido, eliminando a subjetividade (FERNANDES Jr.; ODA; ZERBINI, 2006).

Quadro 2.1 – Manuais de levantamento de defeitos

Catálogo de defeitos dos revestimentos dos pavimentos (ARB, 1978)	<ul style="list-style-type: none"> • 64 tipos de defeitos, sendo 32 para pavimentos flexíveis; • Descrição e causas prováveis de ocorrência de defeitos.
AASHTO – Apêndice K – Defeitos típicos (AASHTO, 1986)	<ul style="list-style-type: none"> • 17 tipos de defeitos para pavimentos flexíveis e 21 para pavimentos rígidos; • Apresenta a descrição, nível de severidade e métodos de medição para cada tipo de defeito.
Manual do Ministry of Transportation and Communication of Ontario (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994) e (CHONG et al, 1989)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 tipos de defeitos para pavimentos flexíveis e 6 tipos para pavimentos rígidos; • Apresenta a descrição, 5 níveis de severidade (incluindo fotografias) e extensão dos defeitos, sendo esta dividida em 5 categorias variando de inferior a 10% até superior a 80% da área.
PAVER-US Army Corps of Engineers (SHAHIN; WALTER, 1990) e (SHAHIN, 1994)	<ul style="list-style-type: none"> • 19 tipos de defeitos para pavimentos asfálticos e 19 tipos para pavimentos rígidos; apresenta a descrição, 3 níveis de severidade (incluindo fotografias) e densidade de defeitos; • Utiliza percentuais variáveis de amostra entre 10% e 25% para levantamentos em nível de rede e em nível de projeto, varia de acordo com o erro permitido e a variabilidade do defeito observado; • O levantamento é manual, realizado por meio de caminhamento pela seção avaliada e os defeitos são registrados em planilha; • Estabelece uma metodologia de cálculo para a determinação do ICP (Índice de Condição do Pavimento).
Manual para identificação de defeitos – MID (DOMINGUES, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta a descrição de 24 defeitos e os relaciona aos seus mecanismos de ocorrência, localização, classe funcional (associados à qualidade de rolamento e a segurança do pavimento) ou estrutural (associados à perda de capacidade do pavimento em suportar as cargas que as solicitam), três níveis de severidade (incluindo fotografias) e métodos de medição.
<i>Manual do Programa Estratégico de Pesquisas Rodoviárias – Strategic Highway Research Program (SHRP 1993 e 2003) e (FERNANDES Jr.; ODA; ZERBINI, 2006)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Considera 15 tipos de defeitos em pavimentos flexíveis, identificando-os através de fotos e figuras. Apresenta, para cada tipo de defeito, a descrição, os níveis de severidade (incluindo fotografias) e a forma de quantificação da extensão.

Bennett (1998) ressalta a tendência para o uso de equipamentos automatizados para a coleta de dados dos pavimentos. Cita que os administradores e consultores dispõem de uma grande variação destes tipos de equipamentos, produzidos em diversos países, com diferentes tecnologias, com variabilidade de custos, capacidades e características. Destaca também que os principais problemas que têm sido encontrados pelos usuários referem-se a verificação e a avaliação do desempenho destes instrumentos, bem como na correta identificação dos defeitos. Alguns dos equipamentos que realizam levantamentos automáticos são apresentados no Quadro 2.2.

O tamanho da amostra também é outro aspecto importante na escolha do método de levantamento e depende dos tipos de defeitos, da precisão desejada, do tempo disponível e dos custos envolvidos, mas geralmente varia de 10 a 25% para levantamentos em nível de rede (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994) e (SHAHIN, 1994). A amostragem pode ser aleatória, conforme recomendado pela teoria estatística, ou em intervalos pré-determinados, conforme ocorre em alguns organismos rodoviários estrangeiros (no Departamento de Transportes do Texas, por exemplo) (FERNANDES Jr.; ODA; ZERBINI, 2006).

No Brasil, as normas DNIT 005/2003, DNIT 006/2003, DNIT 007/2003 e DNIT 008/2003 estabelecem as definições, os critérios e os equipamentos utilizados para a realização dos levantamentos de defeitos de pavimentos tanto por meio de caminhamento (ou a pé) quanto para o método que se utiliza de avaliadores dentro de um veículo em movimento, neste último caso chamado de levantamento visual contínuo (LVC).

Quadro 2.2 – Equipamentos automatizados para levantamentos de defeitos.

<p>Sistema PASCO ROADRECON – (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Consiste de duas câmeras fotográficas instaladas em um veículo tipo van. Uma câmera registra de forma contínua a superfície do pavimento, com finalidade de levantar os defeitos de superfície, e a outra tira fotos, de forma intermitente, para estimativa da profundidade da trilha de rodas. O trabalho é efetuado à noite, com a quantidade e ângulo de iluminação controlados. O veículo pode ser operado acima de 80 km/h e fotografar faixas com até 4,80 m de largura. A análise dos defeitos requer a interpretação manual das fotos.
<p>Sistema GERPHO (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Registra as imagens da superfície do pavimento de forma contínua com um filme de 35 mm. Utiliza iluminação artificial para operar à noite. A informação sobre os defeitos é obtida a partir do filme, utilizando-se de um gabarito previamente elaborado. Os dados são processados automaticamente.
<p>Sistema ARAN (Automatic Road Analyzer) (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mede o afundamento das trilhas das rodas, perfis transversais e irregularidade. Os defeitos são registrados por meio de sensores ultrasônicos, espaçados a cada 0,30 m, instalados na parte dianteira do veículo. Filma a superfície do pavimento. O avaliador usa dois teclados para auxiliar nos levantamentos e podem ser registrados 20 tipos de defeitos, 3 níveis de severidade e 5 níveis de extensão.
<p>Sistema Laser Road Test – RST (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza a tecnologia laser para medir a largura e a profundidade das trincas, a profundidade da deformação permanente das trilhas de roda, os perfis longitudinais e transversais, a macro-textura e as distâncias percorridas. Um avaliador identifica trincas e outros tipos de defeitos. Um microcomputador integra os sinais do acelerômetro e do hodômetro, que processa e armazena os dados obtidos em tempo real.
<p>ROMDAS – TPL – Road Measurement Data acquisition System (ROMDAS) – Transverse Profile Logger (TPL) (BENNETT, 1998)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento projetado para registrar o perfil transversal dos pavimentos utilizando sensores ultrasônicos instalados em um veículo. Também mede a irregularidade e registra a condição visual em vídeo. Cinco sensores com espaçamento de 100 mm estão contidos em uma parte anexa do sistema denominada UMSA (Ultrasonic Measurement Sistem Array). A Seção principal do TPL contém 20 sensores. Na execução dos levantamentos um controle ligado a um computador dispara os sensores e armazena os dados. Os disparos dos sensores levam um tempo de aproximadamente 0,125 s.

2.4.2.2 Índices combinados de defeitos

Durante a avaliação da superfície de trechos de pavimentos rodoviários é natural que sejam levantados diversos tipos de defeitos, com diferentes níveis de severidade e densidade. Isto pode gerar um número extenso de combinações que pode conduzir a determinação equivocada do atual estado de condição do pavimento avaliado. Para resolver esse problema é necessário converter os resultados dessas avaliações em um valor, ou um índice combinado de defeitos, que possa ser utilizado como critério na tomada de decisão sobre priorização de atividades de manutenção e reabilitação.

Os índices combinados de defeitos podem ser determinados através de avaliações subjetivas (feitas por painéis de avaliadores) ou calculados a partir de informações detalhadas sobre a extensão e o nível de severidade de diferentes formas de deterioração dos pavimentos. A condição do pavimento pode ser quantificada, por exemplo, pelo índice de Condição do Pavimento (ICP) (FERNANDES Jr.; ODA; ZERBINI, 2006).

O ICP é um valor numérico que varia de 0 (para uma péssima condição) a 100 (para uma excelente condição). Sua determinação é baseada no levantamento visual de defeitos no qual os tipos de defeitos, o nível de severidade e sua densidade são anotados e medidos para uma determinada seção de pavimento, de acordo com o *PCI Distress Identification Manual* (SHRP, 1990).

O método é baseado na dedução de valores ponderados que variam de 0 a 100 (o pavimento já sai com 100 pontos) que irá indicar o impacto que cada defeito tem na condição do pavimento em termos de severidade e densidade. Se o valor deduzido é zero significa que o nível de manifestação corrente de um determinado defeito não apresenta impacto no atual desempenho do pavimento, caso contrário, indica grande impacto.

A densidade de defeitos é determinada pela somatória da extensão de cada tipo de defeito, para cada nível de severidade, dividido pela área total do pavimento selecionada para amostra. A extensão dos defeitos pode ser medida em metros quadrados, metro linear, número de ocorrências, dependendo do tipo de defeito. Então, baseado na densidade e nível de severidade, o valor a ser deduzido para cada tipo de defeito pode ser obtido das correspondentes curvas de dedução de valores (para cada tipo de defeito) conforme apresentado no *PCI Distress Identification Manual*. O valor final do Índice de Condição do

Pavimento será a diferença entre a pontuação inicial e a somatória dos valores dedutíveis (Equação 2.9) (SHAHIN, 1994).

$$ICP = 100 - \sum_i \sum_j D_{ij} \times f_{ij} \quad (2.9)$$

em que: D_{ij} : extensão do defeito i com o nível de severidade j ;

f_{ij} : fator de ponderação do defeito i com o nível de severidade j .

Apesar do conceito do ICP desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* ser de grande aplicação é necessário cuidado quando da utilização das curvas de dedução, pois estas foram desenvolvidas para um grupo de definições de tipos e severidades de defeitos. Se as agências resolvem modificar as definições, especialmente com relação ao nível de severidade, então as curvas de dedução de valores deverão ser cuidadosamente modificadas (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

Uma alternativa às curvas de dedução são os fatores de ponderação. Como certos defeitos influem mais que outros para a perda da serventia do pavimento, cada nível de severidade de um determinado defeito deve ser associado a um fator de ponderação, sendo que os fatores de ponderação também devem ser ajustados para as condições operacionais e ambientais do local onde serão utilizados (FERNANDES Jr.; ODA; ZERBINI, 2006).

No Brasil, é muito utilizado o Índice de Gravidade Global (IGG), que é um índice de defeitos combinado, definido por um número que permite a avaliação das condições de deterioração apenas de uma seção ou através de comparação relativa entre várias seções de uma malha de pavimentos (YSHIBA, 2003). A norma do DNIT 006/2003 PRO, fixa as condições exigíveis na avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos e tem como meta estabelecer uma forma de calcular o IGG, utilizando uma combinação de defeitos. O método avalia 15% da área total do pavimento analisado e os levantamentos são feitos a pé (BENEVIDES, 2006).

O IGG é calculado com base na atribuição de pesos ou fatores de ponderação aplicáveis a cada evento mensurado (frequência relativa de estações com ocorrência de cada tipo de defeito e parâmetros ligados à análise estatística das flechas nas trilhas de roda), pesos esses que buscam caracterizar sua influência sobre a serventia do pavimento. As Equações 2.10, 2.11 e 2.12 para seu cálculo são apresentadas a seguir (DNIT, 2006):

$$f_r = \frac{100 \cdot f_a}{n} \quad (2.10)$$

$$IGI = f_r \cdot f_p \quad (2.11)$$

$$IGG = \sum IGI \quad (2.12)$$

em que: n_j : número de estações inventariadas;

f_p : fator de ponderação do defeito;

IGI : Índice de Gravidade Individual (correspondente a cada evento considerado isoladamente);

f_a : frequência absoluta (número de vezes em que a ocorrência é verificada);

f_r : frequência relativa (número de vezes em que a ocorrência é verificada em relação ao total de estações).

Apesar de o IGG ser utilizado para classificar o estado geral de um determinado trecho homogêneo de pavimento, em função da incidência de defeitos de superfície, autores como (YSHIBA, 2003), (BENEVIDES, 2006) e (FERNANDES Jr.; ODA; ZERBINI, 2006) citam que as principais limitações método do IGG são o fato de não levar em conta o nível de severidade, apenas o tipo de defeito (exceto para as trincas); e considerar apenas o número de ocorrências e não a extensão.

2.5 MODELOS DE DESEMPENHO

Desde que os conceitos de gerência de pavimentos foram iniciados na década de 60, muitos modelos de previsão de desempenho foram desenvolvidos como forma de tentar inferir sobre o futuro desempenho dos pavimentos, com propósitos de planejamento. Haas, Hudson e Zaniewski (1994) agrupam esses modelos em quatro tipos básicos:

- Modelos Mecanísticos: esses modelos excluem todas as inferências empíricas na estimativa da deterioração do pavimento. Todas as respostas e seus efeitos na estrutura do pavimento são puramente mecânicos e baseados na representação física do processo de deterioração, o qual é representado por parâmetros de resposta como tensões, deformações e deflexões. Essas respostas estruturais são utilizadas para prever o desempenho dos pavimentos em termos de deformações permanentes e propagação de trincas.

Esse tipo de modelo não tem sido completamente desenvolvido por causa da complexidade do processo de deterioração dos pavimentos, e também porque as respostas estruturais necessitam estar relacionadas à deterioração dos pavimentos para terem significado para os engenheiros de pavimentação. Entretanto, mais incentivos e esforços deveriam ser canalizados para o desenvolvimento de modelos mecanísticos, pois os atuais modelos de deterioração empíricos e empírico-mecanísticos são desenvolvidos para representar condições restritas de materiais e estruturas.

- Modelos empírico-mecanísticos: nesses modelos as respostas estruturais (tensões, deformações e deslocamentos) são correlacionadas com dados experimentais sobre a evolução da deterioração estrutural ou funcional dos pavimentos, por meio de análise de regressão. Os modelos empírico-mecanísticos são especialmente úteis para a previsão da evolução de formas de deterioração associadas às solicitações do tráfego (trincas por fadiga do revestimento e deformação permanente nas trilhas das rodas (FERNANDES Jr., 1994). A primeira forma da função de desempenho (empírico-mecanística) de pavimentos foi desenvolvida com base na análise dos dados obtidos no *AASHO Road Test*, para as condições de aplicação acelerada de carregamento e particulares características climáticas e de resistência do subleito, como apresentado na Equação 2.15:

$$\log\left(\frac{p_0 - p_t}{p_0 - p_T}\right) = \beta(\log W_t - \log \rho) \quad (2.15)$$

em que: p_0 : valor inicial do índice de serventia do pavimento (4,2 para o *AASHO Road Test*);

p_t : valor do índice de serventia num determinado tempo t ;

p_T : 1,5 era o valor terminal para o índice de serventia;

β : função desenvolvida com base nas variáveis de projeto e de carregamento que influem na forma da curva de desempenho;

ρ : função desenvolvida com base nas variáveis de projeto e de carregamento que representam o número necessário de aplicações de eixo para atingir o valor de 1,5 para o índice de serventia;

W_t : número de aplicações do eixo padrão num determinado tempo t .

Para as condições do *AASHO Road Test*, foram desenvolvidas equações de regressão para β e ρ para pavimentos flexíveis, como apresentado nas Equações 2.16 e 2.17 a seguir:

$$\beta = 0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}} \quad (2.16)$$

$$\rho = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 \quad (2.17)$$

em que: SN : número estrutural da seção de pavimento.

Pela combinação das Equações 2.15, 2.16 e 2.17 e, reescrevendo, o número de aplicações do eixo padrão para que se atinja um determinado estado de deterioração fica (Equação 2.18):

$$\log W_{18} = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{p_0 - p_t}{p_0 - p_r}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} \quad (2.18)$$

Apesar de ter representado um grande avanço para o estudo do comportamento dos pavimentos sob ação das cargas do tráfego, os resultados são aplicados apenas para as condições de desenvolvimento do *AASHO Road Test* (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994). Na sua forma atualizada é apresentada conforme a Equação 2.19, (AASHTO, 1993):

$$\log W_{18} = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{4,2 - p_t}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log M_R - 8,07 \quad (2.19)$$

em que: $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$

M_R : valor do módulo de resiliência;

a_1 , a_2 e a_3 : coeficientes estruturais para as camadas de revestimento, base e subbase respectivamente;

D_1 , D_2 e D_3 : espessuras das camadas de revestimento, base e subbase respectivamente;

m_2 e m_3 : coeficientes de drenagem para as camadas de base e subbase respectivamente.

Outro exemplo de modelos empírico-mecanísticos são os que foram desenvolvidos por Queiroz (1984) onde a teoria das camadas elástico-lineares foi utilizada para relacionar

respostas estruturais com formas de deterioração durante a PICR. A irregularidade e o trincamento são previstos de acordo com as Equações 2.20 e 2.21 respectivamente:

$$\text{Log}(QI) = 1,297 + 9,22 \times 10^{-3} A + 9,08 \times 10^{-2} TR - 7,03 \times 10^{-2} ER + 5,57 \times 10^{-4} (SEN1 \times \log N) \quad R^2 = 0,51 \quad (2.20)$$

$$CR = -8,70 + 0,258 HST1 \times \log N + 1,006 \times 10^{-6} HST1 \times N \quad R^2 = 0,50 \quad (2.21)$$

em que: QI : quociente de irregularidade, em contagens/km;

$SEN1$: energia específica de compressão vertical no topo do subleito, em $10^{-4} \times \text{kgf.cm}$;

TR : variável indicadora do tipo de revestimento (0 para concreto asfáltico e 1 para tratamento superficial duplo);

CR : porcentagem de área trincada;

HST : tensão horizontal de tração na face inferior do revestimento, em kgf/cm^2 .

- Modelos Empíricos: Modelos de previsão empíricos relacionam um determinado índice de desempenho do pavimento (variável dependente), como por exemplo, indicadores subjetivos (ISA – Índice de Serventia Atual, por exemplo) ou objetivos (irregularidade longitudinal, acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, aparecimento e propagação de trincas por fadiga, por exemplo) a variáveis independentes, como as solicitações do tráfego, geralmente representadas pelo número de aplicações equivalentes do eixo-padrão, ou os efeitos do meio ambiente (temperatura e teor de umidade), geralmente representados pelo número de anos, que quantificam os ciclos climáticos. Uma das técnicas mais utilizada no desenvolvimento de modelos empíricos é a análise por regressão. O critério normalmente empregado nesta técnica para escolher o modelo que melhor se ajusta aos dados é o coeficiente de determinação (R^2).

Como exemplos deste tipo de modelo aparecem os desenvolvidos para a estimativa do quociente de irregularidade (QI) e para a estimativa da evolução do trincamento dos pavimentos (CR), desenvolvidos por Queiroz (1981) durante a Pesquisa do Interrelacionamento dos Custos de Construção, Manutenção e Utilização de Rodovias (PICR) conduzida no Brasil. Uma programação fatorial foi utilizada para a seleção das variáveis analisadas e das seções observadas. As Equações 2.13 e 2.14 foram obtidas por meio de análise de regressão para o QI e o CR :

$$QI = 12,63 - 5,16ER + 3,31TR + 0,393A + 8,66\left(\frac{\log N}{SNC}\right) + 7,17 \times 10^{-5}(\log B \times \log N)^2 \quad R^2=0,52 \quad (2.13)$$

$$CR = -18,53 + 0,04568 \log N + 0,005018B \times A \times \log N \quad R^2=0,64 \quad (2.14)$$

em que: *A*: idade do pavimento desde a construção ou recapeamento, em anos;

B: deflexão pela viga Benkelman (0,01mm);

ER: variável indicadora do estado de restauração (0 como construído e 1 se recapeado);

N: número equivalente de operações do eixo padrão de 80 kN;

TR: variável indicadora do tipo de revestimento (0 para concreto asfáltico e 1 para tratamento superficial);

SNC: número estrutural corrigido.

- Modelos subjetivos: são desenvolvidos com base na experiência e no conhecimento adquirido pelos especialistas responsáveis pela gerência de uma determinada rede. Os modelos são desenvolvidos com o auxílio de técnicas que auxiliam na “captura” da experiência de forma estruturada. Uma das técnicas mais utilizadas são as matrizes de probabilidade de transição de *Markov*. Neste processo, a previsão do estado de condição futuro do pavimento depende apenas da sua condição atual, que pode ser levantada em campo. Uma matriz de probabilidade de transição define a probabilidade que um pavimento em uma condição estado inicial tem de alterar esta condição inicial no futuro. Métodos que se utilizam de entrevistas ou aplicação de formulários podem ser utilizados para obter a informação dos especialistas e desenvolver as matrizes de transição. No processo de extração do conhecimento os especialistas informam, a partir do conhecimento de uma condição estado inicial do pavimento, qual a probabilidade de ocorrer uma alteração futura neste estado em um determinado período de tempo. A Figura 2.9 ilustra o processo de transição de probabilidades da condição de um pavimento.

Figura 2.8 – Transição de probabilidades (WANG et al., 1993)

As principais vantagens do desenvolvimento de modelos de probabilidades de transição são: a possibilidade do desenvolvimento de curvas de desempenho sem a necessidade de uma coleção de dados históricos e a calibração direta através do uso de um método formal de entrevistas por especialistas.

2.5.1 Modelos de desempenho desenvolvidos para redes de rodovias no Brasil e exterior

Desde a década de 70 estudos têm sido realizados no Brasil com o objetivo de desenvolvimento de modelos de desempenho para utilização em gerência de pavimentos. Merecem destaque os estudos iniciados em 1975 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1981) que resultaram na PICR. Nesta pesquisa, Queiroz (1981) utilizou dados obtidos da observação de 63 seções de pavimento em serviço, da malha rodoviária compreendida no quadrilátero Brasília, Goiânia, Belo Horizonte e São Paulo, para o desenvolvimento de modelos de desempenho. Alguns dos principais modelos resultantes da pesquisa foram apresentados anteriormente.

Paterson (1987) desenvolveu as equações de desempenho de pavimentos utilizadas no *The Highway Design and Maintenance Standards Model* (WATANADA et al., 1987). A base empírica para o desenvolvimento dos modelos de regressão foi a mesma utilizada por Queiroz (1981) durante a PICR. O motivo da escolha foi a grande quantidade de dados observados ao longo do tempo que incluem irregularidades, trincamento, desgaste, deformações permanentes, atividades de manutenção, tráfego e pluviometria para uma

programação fatorial de trechos de pavimentos em serviço (PATERSON, 1989). As equações desenvolvidas são apresentadas no anexo A.

Marcon (1996) desenvolveu modelos de previsão de desempenho com base em dados da rede rodoviária do estado de Santa Catarina. Os dados foram coletados em 1990 e referiam-se a deflexões, irregularidades de superfície, defeitos, materiais empregados, espessuras das camadas e tráfego do estado, dividido em três regiões. O desempenho dos pavimentos foi representado pelas variáveis dependentes: quociente de irregularidade, deflexões, índice de gravidade global, trincamento total e afundamento nas trilhas de roda, tendo como variável independente o intervalo de tempo, em anos, ou o número de operações do eixo padrão de 80 kN. Com base nos dados, foram testados cinco tipos de equações (linear, logarítmica, polinomial, exponencial e potencial) por meio de regressão. Para cada par de variáveis foi indicada a equação que apresentava o melhor coeficiente de determinação (R^2). Posteriormente, os modelos foram comparados a modelos de previsão de desempenho existentes. As equações desenvolvidas são apresentadas no anexo A.

Yshiba (2003) desenvolveu modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural sobre o desempenho de pavimentos, quantificado em termos de irregularidade longitudinal e deflexões. A técnica usada foi a análise da variância (ANOVA) aplicada aos dados de levantamentos realizados em 1995 e 1998 na malha rodoviária do Estado do Paraná. A ANOVA permite a determinação do nível de significância de fatores pré-selecionados e de suas interações, bem como a modelagem do desempenho dos pavimentos. Os modelos foram comparados com modelos desenvolvidos por Queiroz (1981) e Paterson (1987) e mostram melhores resultados, evidenciando as limitações de modelos de desempenho desenvolvidos e calibrados sob condições específicas. As equações desenvolvidas são apresentadas no anexo A. Yshiba (2003) desenvolveu, também, modelos de desempenho probabilísticos para cada uma das células das matrizes fatoriais, que correspondem às combinações de fatores considerados para a análise da ANOVA, a partir de avaliações realizadas por engenheiros do DER-PR e mediante o estabelecimento de matrizes de estabilidade de *Markov*.

Benevides (2006) desenvolveu modelos estatísticos baseado em levantamentos realizados em 72 trechos da malha rodoviária pavimentada da região metropolitana de Fortaleza, em 2006. Nos modelos estatísticos foram estabelecidas equações de regressão, utilizando a Análise de Variância (ANOVA). Foram determinadas equações de evolução para os defeitos/severidades efetuados pelo LVC em 2004 e 2005, assim como equações de

regressão que relacionam os valores de irregularidade longitudinal obtido com os perfilômetros inercial e a laser. Também foram estabelecidas equações relacionando a irregularidade longitudinal com os defeitos indicados pelo LVC, com os valores do ICP dos modelos probabilísticos, com a deflexão e com o número estrutural corrigido. Para comparar o modelo de previsão da condição do pavimento pela irregularidade obtido nesta pesquisa com o de outra referência foi escolhido o estudo de Dewan e Smith (2002). Modelos de regressão múltipla e evolução de irregularidade com o ICP, a deflexão e os defeito/severidade foram também estabelecidos.

Assim como Yshiba (2003), Benevides (2006) também desenvolveu modelos probabilísticos. Foram estabelecidos vetores estados inicial dos trechos (para cada tipo de revestimento - CBUQ, AAUQ e TSD), considerando a situação atual do pavimento, e utilizadas as matrizes de probabilidade de transição de *Markov* para gerar os modelos probabilísticos e assim determinar o ICP. Benevides (2006) ainda utilizou o software HDM-4 para analisar, a partir de diferentes estratégias de manutenção, a evolução da irregularidade longitudinal em alguns trechos da pesquisa, como forma de avaliar o efeito das mesmas no desempenho dos pavimentos. As equações estatísticas para a previsão das irregularidades longitudinais são apresentadas no anexo A.

Albuquerque et al. (2007) desenvolveu modelos de Previsão de Desempenho a partir de dados de levantamentos de Deflexão com FWD, de Deflexão com Viga Benkelman e de irregularidade longitudinal para pavimentos em Tratamento Superficial dos Estados do Ceará e Paraíba. O clima foi considerado pelo Índice de Aridez desenvolvido pela UNESCO e a capacidade estrutural do pavimento foi expressa pelo número estrutural corrigido (SNC). Já a idade do pavimento e as cargas de tráfego foram expressas em termos de número acumulado de repetições do eixo padrão. Todos os modelos foram construídos através de regressão por crescimento exponencial. As equações para a previsão das irregularidades longitudinais são apresentadas no anexo A.

2.5.2 Modelos do Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM)

O *Highway Development and Management Model*, desenvolvido pelo Banco Mundial, é uma ferramenta de auxílio utilizada em planejamento e programação de investimentos e atividades de manutenção ou reabilitação de rodovias. O HDM é um modelo computacional

que simula condições físicas e econômicas através de um determinado período de análise, para uma série de alternativas e cenários.

As primeiras versões do HDM (HCM e HDM-II) levavam em consideração apenas modelos de regressão simples que foram desenvolvidos a partir de dados observados em estudos realizados em locais específicos. Entretanto, esses modelos não são necessariamente transferíveis, e possuem algumas limitações inerentes.

No desenvolvimento do HDM-III e HDM-4, um maior grau de transferência foi inserido nos modelos, considerando avanços tecnológicos e diferentes condições de climas. Isto foi possível devido a aplicação de uma abordagem empírico-mecanística no desenvolvimento dos novos modelos, onde teorias de movimento dos veículos e novas tecnologias, comportamentos estruturais de diferentes tipos de materiais sob a ação de cargas do tráfego, foram combinadas com dados operacionais de veículos e condições de rodovias levantados em diversas localidades, por meio de técnicas estatísticas. O modelo de custos operacionais, por exemplo, foi desenvolvido com base nos estudos realizados no Quênia, no Caribe, no Brasil e na Índia entre meados das décadas de 70 e 80.

O HDM-4 inclui modelos de deterioração (*Road Deterioration* – RD) e modelos para estimativa dos efeitos das atividades de manutenção e reabilitação nos pavimentos (*Road Works Effects* – WE). Eles são utilizados com o propósito de se estimar a condição anual da rodovia e para a avaliação relativa sobre quais atividades de M&R utilizar. Os custos das atividades de M&R e construção também podem ser relacionados aos custos dos usuários através de modelos de custos. No HDM-III estas relações eram combinadas dentro de um único módulo chamado *Road Deterioration and Maintenance Effects* (RDME), o que foi mudado na versão HDM-4, aparecendo em módulos separados, o que facilita a consideração de uma grande variedade de intervenções usando critérios baseados nos parâmetros de efeitos aos usuários.

Os modelos de deterioração do HDM-4 são mais flexíveis que os desenvolvidos para o HDM-III, pois permitem o manuseio de uma variedade de pavimentos proporcionando o ajuste dos modelos em função das condições de contorno apresentadas nas seções a serem estudadas, e por utilizar modelos mais detalhados cujos efeitos são inter-relacionados. Outro aspecto importante é a possibilidade de calibração. Nos modelos de deterioração, as taxas de progressão e o efeito das intervenções são afetados pelo clima e pelas características dos materiais de construção, por exemplo. No entanto, é possível que essas variáveis sejam

controladas através de fatores de calibração a serem incluídos nos modelos (KERALI; ODOKI, 2000).

Os modelos de deterioração do HDM são em função da estrutura do pavimento e materiais utilizados, da qualidade do processo construtivo, do volume e da composição do tráfego, das características geométricas, das condições ambientais, da idade dos pavimentos e das atividades de manutenção. Os modelos desenvolvidos para a irregularidade em pavimentos flexíveis são apresentados no anexo B.

3 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA PAVIMENTADA DO ESTADO DA BAHIA

Este capítulo apresenta uma caracterização territorial da região em estudo e um diagnóstico do banco de dados de levantamentos de rodovias realizado em 2004, disponibilizado pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia (DERBA). O objetivo desta etapa da pesquisa é entender o comportamento e a distribuição dos principais fatores que influem no desempenho dos pavimentos, como o clima, a pluviometria, a idade e o tráfego.

3.1 CARACTERIZAÇÃO TERRITORIAL DO ESTADO DA BAHIA

A Bahia é o quinto estado do país em área territorial, com 564.629,67 km², correspondendo a 36,34% do total do Nordeste brasileiro, sendo que, deste total, 68,7% encontram-se na região semi-árida. O Estado da Bahia limita-se ao norte com os Estados do Alagoas, Sergipe, Pernambuco e Piauí, a leste com o oceano Atlântico, ao sul os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais e a oeste com os Estados de Goiás e Tocantins. Possui o maior litoral entre os estados brasileiros em termos de extensão, com aproximadamente 1.183 km (Figura 3.1).

O relevo de seu território caracteriza-se por grande diversidade que inclui dunas, planícies e manguezais no litoral, um planalto na parte sudeste, uma região de clima e vegetação semi-áridos e a depressão do Vale do São Francisco, que corta o estado.

O clima predominante é tropical, com temperaturas médias anuais que variam entre 18,4°C e 33°C. As temperaturas mais baixas, que chegam a 6°C, ocorrem no município de Caetité, enquanto a mais alta, 41°C, é normalmente registrada no município de Remanso (SEI, 2009).

O estado da Bahia também apresenta uma grande diversidade quanto aos índices de precipitação pluviométrica em suas diferentes regiões, influência de seu relevo e de sua vegetação, sendo a caatinga predominante sobre a floresta tropical úmida e o cerrado.

Figura 3.1 – Participação percentual da área total do Estado da Bahia em relação ao Brasil e ao Nordeste (SEI, 2009)

3.1.1 Biomas do estado da Bahia

O estado da Bahia detém imenso potencial ambiental, representado principalmente pelos biomas do cerrado, da caatinga e da mata atlântica. O cerrado (aproximadamente 15% do território) destaca-se pela sua rica biodiversidade e potencial aquífero, com destaque à bacia do rio São Francisco. Nestes espaços concentram-se, atualmente, as mais importantes atividades agrícolas do estado.

A caatinga domina a maior porção do território (aproximadamente 65%), apresentando alguns redutos de prosperidade, diversidade de paisagens e riqueza biológica ímpar. A Mata Atlântica representa cerca de 6% da área original, abrigando remanescentes da segunda maior floresta tropical úmida do Brasil, que, originalmente, estendia-se do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul, partindo do litoral e adentrando o território (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Principais Biomas do estado da Bahia (SEI, 2009)

3.1.2 Regime pluviométrico, clima e temperatura do estado da Bahia

O estado da Bahia apresenta uma variação pluviométrica cuja quantidade e distribuição anual das precipitações diminui do litoral para o interior, ou seja, no sentido leste/oeste, com valores que variam de 2.600 mm no litoral de Salvador a Ilhéus a 500 mm anuais no extremo norte do estado, caracterizando uma diversidade climática que passa do clima úmido a subúmido até semiárido a árido.

Os dados de precipitação utilizados na geração das isoietas (Figura 3.3) foram extraídos de séries contínuas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e da Superintendência de Recursos Hídricos (SRH), atual Instituto de Gestão das Águas e Clima (Ingá), nos períodos de 1961/1990. Foram observadas 33 estações pluviométricas (SEI, 2009).

Os tipos climáticos que se observam na Bahia, segundo a classificação de *Thorntwaite*, variam de úmido (Índice Hídrico - Im de 100 a 60%) a árido (Im < -40%), conforme apresentado na Tabela 3.1.

Figura 3.3 – Distribuição Pluviométrica do estado da Bahia (SEI, 2009)

Figura 3.4 – Tipologia climática do Estado da Bahia segundo *Thornthwaite* (SEI, 1998)

O clima árido é predominante no extremo norte do estado da Bahia, na região do Vale do São Francisco, divisa com os Estados de Pernambuco e Alagoas, caracterizado por um clima extremamente seco com temperaturas médias variando entre 23,5°C e 27,1°C e com precipitação pluviométrica entre 300 e 500 mm anuais.

Na maior parte do território baiano é predominante o clima semiárido, principalmente na parte central e norte, com temperatura média variando entre 20,7°C e 26,8°C e com precipitação pluviométrica variando de 500 a 800 mm anuais. Apesar de ser o clima predominante na região central, o clima subúmido a seco aparece em áreas menores internas, onde há ocorrência de maiores altitudes, e a leste e a oeste, com temperaturas médias de 18,8°C a 25,4°C e regime pluviométrico variando de 800 a 1100 mm anuais (Figura 3.4).

Tabela 3.1 – Parâmetros de referência para classificação climática (SEI, 2009)

Tipos Climáticos		Índice Hídrico (%)	Excedente Hídrico (mm)	Regime Pluviométrico
Úmido	B4r A'	> 80	1000 a 1200	Janeiro a Dezembro
	B3r A'	80 a 60	600 a 1000	Janeiro a Dezembro
	B2r A'	60 a 40	300 a 600	Janeiro a Dezembro
	B2r B'	60 a 40	700 a 800	Primavera / Verão
	B1r A'	40 a 20	300 a 600	Outono / Inverno
	B1r' A'	40 a 20	300 a 600	Prim. / Ver. e Out. /Inv.
	B1w A'	40 a 20	> 600	Primavera / Verão
Úmido a Subúmido	C2d A'	20 a 0	50 a 300	Outono / Inverno
	C2d' A'	20 a 0	50 a 300	Prim. / Ver. e Out. /Inv.
	C2d B'	20 a 0	50 a 300	Primavera / Verão
	C2w A'	20 a 0	300 a 600	Primavera / Verão
Subúmido a Seco	C1d A'	0 a -20	0 a 100	Prim. / Ver. e Out. /Inv.
	C1d' A'	0 a -20	0 a 100	Primavera / Verão
	C1d B'	0 a -20	0 a 100	Primavera / Verão
	C1w2 A'	0 a -20	0 a 200	Primavera / Verão
	C1w2 B'	0 a -20	0 a 50	Primavera / Verão
Semi árido	Dd A'	-20 a -40	0	Primavera / Verão
	Dd' A'	-20 a -40	0	Sem estação definida
	D1d B'	-20 a -40	0	Primavera / Verão
Árido	Ed A'	< -40	0	Primavera / Verão

No extremo oeste (divisa com os estados de Goiás e Tocantins) e a leste (litoral) predominam os climas úmido e úmido a subúmido, com precipitações médias variando de 1100 a valores superiores a 2000 mm e temperaturas médias anuais oscilando entre 24,5°C e 33°C e de 25,4°C a 32,2°C, respectivamente. As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam os parâmetros de referência utilizados para a classificação climática, segundo *Thorntwaite* (SEI, 1997).

Tabela 3.2 – Parâmetros de referência para classificação climática (SEI, 1997)

<i>Descrição</i>	<i>Temperatura Mínima (°C)</i>	<i>Temperatura Média (°C)</i>	<i>Temperatura Máxima (°C)</i>	<i>Amplitude Térmica (°C)</i>	<i>Precipitação Média (mm)</i>
Árido	18,5 a 22,4	23,5 a 27,1	29,3 a 33,7	7,8 a 13,6	300 a 500
Semiárido	16,1 a 22,3	20,7 a 26,8	26,0 a 33,0	7 a 15	500 a 800
Subúmido a Seco	14,5 a 22,1	18,8 a 25,4	24,5 a 33	5 a 16	800 a 1100
Úmido a Subúmido	15,3 a 22,4	19,4 a 24,6	25,4 a 32,2	5 a 15,5	1100 a 2000
Úmido	14,4 a 22,5	18,4 a 25,3	24,3 a 31,2	4,9 a 13,5	> 2000

Tabela 3.3 – Parâmetros de referência para classificação climática (SEI, 1997)

<i>Descrição</i>	<i>Evapotranspiração Potencial (mm)</i>	<i>Deficiência Hídrica (mm)</i>	<i>Excedente Hídrico (mm)</i>	<i>Índice de Aridez (%)</i>	<i>Índice Hídrico (mm)</i>
Árido	1202 a 1771	834 a 1401	0	67 % a 79%	(- 60 a - 40)
Semiárido	915 a 1691	341 a 1060	0 a 90	30 a 66 %	(- 40 a - 20)
Subúmido a Seco	841 a 1560	29 a 547	0 a 237	2 a 43 %	- 20 a 0
Úmido a Subúmido	870 a 1332	3 a 426	22 a 424	0 a 35	0 a 20
Úmido	823 a 1406	0 a 345	200 a 1409	0 a 20	> 20

3.1.3 Relevo, geologia e tipos de solos

Aproximadamente 50% do território do Estado da Bahia encontram-se entre 400 e 800 metros de altitude, com 30% abaixo de 400 m (Figura 3.5). O quadro morfológico compreende três unidades: a baixada litorânea, o rebordo do planalto e o planalto. Constitui a baixada litorânea o conjunto de terras abaixo de 200 m. Erguem-se aí, dominando as praias e os areais da orla litorânea, terrenos de feição tabular, os chamados tabuleiros areníticos (SILVA; NASCIMENTO; PEREIRA, 2000).

Figura 3.5 – Hipsometria do estado da Bahia (SEI, 1998)

Para o interior, esses terrenos cedem lugar a uma faixa de colinas e morros argilosos, de solo espesso, relativamente fértil, sobretudo no Recôncavo Baiano, onde se encontra o massapé. Tanto a faixa das colinas e morros como a dos tabuleiros são cortadas transversalmente pelos rios que descem do planalto, ao longo dos quais estendem-se amplas planícies aluviais (várzeas) sujeitas a inundações que lhes renovam periodicamente os solos com a deposição de novos aluviões (SILVA; NASCIMENTO; PEREIRA, 2000).

O rebordo do planalto ergue-se imediatamente a oeste dos morros e colinas, formando uma faixa de terrenos muito acidentados, por meio da qual se ascende da baixada até o planalto. Ao norte de Salvador, o rebordo do planalto desaparece, pois a transição entre planalto e baixada se faz suavemente. O planalto ocupa a maior parte do estado e está dividido em quatro principais relevos: Planalto Sul-baiano, Serra Geral do Espinhaço, Depressões Periféricas e Chapadão Ocidental do São Francisco (Figura 3.6)

Figura 3.6 – Relevo do estado da Bahia (SEI, 1998)

O Planalto Sul-baiano, formado principalmente por cobertura Detrítica Tércio-Quaternária e Terrenos Granulíticos (Figura 3.7), situa-se no sudeste do Estado. Sua superfície, com 700 a 800 m de altitude média, apresenta-se suavemente ondulada, com amplos vales de fundo chato. Entretanto, o rio de Contas e o Paraguaçu abriram em seu seio profundos vales, dividindo-o em três seções: o planalto de Conquista, no sul; o de Itiruçu, no centro; o de Cruz das Almas, no norte.

As principais ocorrências de tipos de solos encontrados na região são os latossolos e os argissolos. Os latossolos são solos muito intemperizados, profundos e de boa drenagem. Caracterizam-se por grande homogeneidade de características ao longo do perfil, mineralogia da fração argila predominantemente caulinítica ou caulinítica-oxídica e praticamente ausência de minerais primários de fácil intemperização. Nesta região da Bahia a predominância é de latossolos amarelos (IBGE, 2007). Os argissolos apresentam característica marcante de possuírem um aumento de teor de argila na camada superficial para a subsuperficial, geralmente acompanhado de boa diferenciação de cores e outras características. A

profundidade dos solos é variável, mas em geral são pouco profundos ou profundos. A principal ocorrência na Bahia são de argissolos vermelho-amarelo alumínico (IBGE, 2007).

Figura 3.7 – Geologia do estado da Bahia (SEI, 1998)

A Serra Geral do Espinhaço consiste em uma faixa de terrenos elevados (1.300 m de média e 1.850 m no pico das Almas, seu ponto culminante) que corta o Estado da Bahia de norte a sul pelo centro. Sua constituição geológica é, principalmente, de rochas siliciclásticas e vulcânicas félsicas. Sua superfície ora se apresenta como alinhamentos montanhosos (cristas quartzíferas), ora como elevações tabulares. Essas últimas predominam na porção oriental e setentrional, formando um amplo conjunto de formas suaves denominado de Chapada Diamantina.

As principais ocorrências de solos nesta região da Bahia são os latossolos, os argissolos e os neossolos litólicos, conforme se observa na Figura 3.8. São encontrados latossolos vermelhos, além dos amarelos, na região central da Chapada Diamantina e próximo a Brumado. Os latossolos vermelhos ocorrem geralmente em grandes profundidades, são

homogêneos, apresentam boa drenagem e coloração vermelho-escuro devido à presença significativa de óxidos de ferro (entre 180 e 400 g/kg). Os neossolos litólicos são solos jovens, em início de formação e pedregosos; são solos rasos, constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso (menos de 30 cm de espessura) (IBGE, 2007) (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Carta de solos do estado da Bahia (SEI, 1998)

As Depressões Periféricas e Interplanáticas estendem-se a oeste do Espinhaço, com disposição semelhante, isto é, formando faixa de sentido norte-sul. Constituem as terras de reduzida altitude (400 m em média) e relativamente planas que, com suave inclinação, caem para o rio São Francisco. No fundo da depressão fica a planície aluvial do São Francisco, periodicamente inundada por suas cheias. Nesta região observa-se a ocorrência de latossolos amarelos, chernossolos e cambissolos.

Os chernossolos são solos que se apresentam no perfil em pequenas espessuras, que se caracterizam pela presença de um horizonte superficial com teores consideráveis de matéria orgânica, de cores escurecidas e boa fertilidade, sobre horizontes subsuperficiais avermelhados ou

escurecidos com argila de alta atividade. Os cambissolos são solos que apresentam grande variação no tocante à profundidade, ocorrendo desde rasos a profundos. A drenagem varia de acentuada a imperfeita e podem ocorrer em cores diversas. Muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos (IBGE, 2007).

As depressões compreendem, também, toda a porção nordeste do planalto baiano. Aí se desenvolvem amplas superfícies que se inclinam suavemente para o litoral, a leste, e para a calha do São Francisco, ao norte, com altitudes entre 200 e 500 m. Esses terrenos exibem o típico clima semi-árido, observado em todo o sertão da região Nordeste: grandes planuras nas quais despontam picos e maciços isolados. Formam o subsolo dessa região rochas cristalinas antigas, com exceção de uma faixa de formações sedimentares, que do Recôncavo se projeta para o norte, dando lugar a uma série de chapadas areníticas também denominadas tabuleiros. Nesta região das depressões verifica-se a ocorrência de latossolos amarelos, argissolos vermelho-amarelo aluminoso, neossolos litólicos, cambissolos, e numa extensão que vai de Feira de Santana a Juazeiro, os planossolos.

Os planossolos compreendem solos minerais, imperfeitamente ou maldrenados, adensados e geralmente com acentuada concentração de argila, com permeabilidade muito lenta ou lenta, constituindo um horizonte que é responsável pela detenção do lençol d'água sobreposto (suspensão), de existência periódica e presença variável durante o ano (IBGE, 2007).

O Chapadão Ocidental do São Francisco, constituído de rochas sedimentares, ergue-se a oeste das Depressões Periféricas, com uma altura aproximada de 850 m. Seu topo regular imprime-lhe feição tabular e o caráter de extenso chapadão, a que se aplica o nome genérico de Espigão Mestre. Nesta região da Bahia aparecem, principalmente, os latossolos amarelos, os cambissolos e os neossolos quartzarênicos (areias quartzosas).

3.2 BANCO DE DADOS DA REDE RODOVIÁRIA DO ESTADO DA BAHIA

A rede rodoviária do estado da Bahia é gerenciada pelo DERBA (Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia) e conta com mais de 20.000 km de rodovias estaduais pavimentadas, distribuídos em uma área de 564.629,67 km². O banco de dados utilizado nesta pesquisa faz parte dos estudos desenvolvidos pelo DERBA, em 2005 (Sugestões Técnicas para Implementação do Programa de Restauração e Manutenção Rodoviária- CREMA – DERBA - BIRD -Volumes I a V, 2005), para a implementação do programa de restauração e manutenção rodoviária. Para a sua elaboração foram coletados dados sobre as condições de superfície dos pavimentos de aproximadamente 9.000 km de rodovias (745 trechos) durante o

ano de 2004. Além disso, estão incluídas, também, informações cadastrais como o tipo de revestimento existente, a idade dos pavimentos, dados da geometria, da pluviometria e informações sobre o tráfego.

Nesta etapa da pesquisa são apresentadas informações numéricas e gráficas, desenvolvidas a partir dos dados referentes a todos os 745 trechos incluídos no banco de dados fornecido pelo DERBA. Abrange trechos em tratamento superficial, CBUQ e outros tipos de revestimentos, tenham eles sofrido alguma atividade de manutenção e reabilitação ou não, contendo informações referentes à geometria, ao relevo, à idade dos pavimentos, à pluviometria, às condições de superfície e ao tráfego.

3.2.1 Projeto

A geometria pode ser definida em termos de parâmetros que refletem, principalmente, o alinhamento horizontal (curvatura horizontal média em grau/km) e o alinhamento vertical (média da somatória das alturas de aclives e declives em m/km) de uma rodovia (KERALI; ODOKI, 2000). De acordo com a observação dos gráficos da Figura 3.9 percebe-se que o grupo de rodovias encontrado no banco de dados apresenta curvatura horizontal menor ou igual a 150 grau/km e somatória das alturas dos aclives e declives menor ou igual a 15 m/km em mais de 90% dos trechos. A Figura 3.10 mostra que apenas 5% dos trechos se encontram em relevo montanhoso, o restante em terreno ondulado e plano, este último atingindo mais de 52% dos trechos.

Figura 3.9 – Curvatura horizontal e alinhamento vertical dos trechos do banco de dados de rodovias

De acordo com a classificação geométrica do manual do HDM-4 e pela análise da Figura 3.9, as rodovias do banco de dados podem ser classificadas, de modo geral, como “levemente sinuosas e levemente onduladas”, consequência das características do relevo, com predominância de planaltos e planícies, e também dos critérios de projeto que levaram à execução de rodovias com extensos trechos em tangente.

Figura 3.10 – Distribuição do relevo nos trechos do banco de dados de rodovias

As rodovias do banco de dados apresentam largura de pista menor ou igual a 7 metros em 97% dos trechos, sendo que aproximadamente 57% não apresentam algum tipo de acostamento, como pode ser observado nos gráficos da Figura 3.11.

Figura 3.11 – Largura da pista e largura do acostamento para os trechos do banco de dados de rodovias

3.2.2 Idade dos pavimentos

O banco de dados de rodovias do estado da Bahia é composto por rodovias com idade superior a 20 anos, em sua maioria, conforme pode ser observado na Figura 3.12. Apenas uma pequena parte das rodovias (14%) apresenta idade inferior a 10 anos. Também pode-se notar que boa parte das rodovias foram construídas entre as décadas de 70 e 80.

Figura 3.12 – Idade da construção e histograma ano de construção para os trechos do banco de dados de rodovias

A Figura 3.13 representa o quantitativo de rodovias que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até a data da realização da coleta de dados pelo DERBA, no ano de 2004. Pode-se observar que 43% desses trechos apresentam idade superior a 20 anos e 23% apresentam idade inferior a 10 anos.

Figura 3.13 – Idade da construção (anos) para os trechos sem atividades de manutenção e reabilitação

3.2.3 Pluviometria

O gráfico da Figura 3.14 mostra a distribuição de chuvas para os trechos rodoviários disponíveis no banco de dados. Pode-se observar que quase 40% dos trechos apresentam pluviometria menor ou igual a 500 mm/ano e 25% dos trechos apresentam regime pluviométrico entre 500 e 800 mm, ou seja, assemelham-se ao regime pluviométrico típico da maior parte do estado da Bahia, característicos das regiões de clima árido a semiúmido, de acordo com a classificação climática de *Thornthwaite*.

Figura 3.14 – Regime pluviométrico para os trechos do banco de dados de rodovias

3.2.4 Avaliação da condição de superfície dos pavimentos

As informações da avaliação da condição de superfície dos pavimentos disponíveis no banco de dados foram obtidas por meio da metodologia preconizada na norma DNIT 08/2002 PRO – “Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos”.

A norma DNIT 08/2002 PRO estabelece as condições exigíveis na avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos pelo processo de Levantamento visual contínuo determinando-se o ICPF – Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis, ao mesmo tempo em que proporciona também os elementos necessários para o cálculo do IGGE – Índice de Gravidade Global Exedito e do IES – Índice do Estado de Superfície do Pavimento.

O ICPF é estimado com base na avaliação visual do pavimento, classificando a superfície do pavimento segundo os conceitos mostrados na Tabela 3.4, tendo em vista a aplicabilidade das medidas de manutenção determinadas pelo profissional avaliador.

Tabela 3.4 – ICPF – Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis (DNIT 08/2002 PRO)

<i>Conceito</i>	<i>Descrição</i>	<i>ICPF</i>
Ótimo	Necessita apenas de conservação rotineira	5 - 4
Bom	Aplicação de lama asfáltica – Desgaste superficial, trincas não muito severas em áreas não muito extensas	4 - 3
Regular	Correção de pontos localizados ou recapeados - pavimento trincado, com “painelas” e remendos pouco frequentes e com irregularidade longitudinal ou transversal	3 - 2
Ruim	Recapeamento com correções prévias - defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas - remendos superficiais ou profundos	2 - 1
Péssimo	Reconstrução - defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão. Degradação do revestimento e das demais camadas - infiltração de água e descompactação da base	1 - 0

O IGGE é calculado com base nas frequências e pesos dos defeitos do tipo trincas, deformações, painelas e remendos, conforme a Equação 3.1.

$$IGGE = (Pt \times Ft) + (Poap \times Foap) + (Ppr \times Fpr) \quad (3.1)$$

em que: Ft, Pt : frequência e peso do conjunto de trincas;

$Foap, Poap$: frequência e peso do conjunto de deformações;

Fpr, Ppr : frequência e peso do conjunto de painelas e remendos.

O IES, cujos valores estão compreendidos de 0 a 10 é avaliado em função do ICPF e do IGGE, constituindo, pois, uma síntese de dois índices. Os valores do IES juntamente com o código e o conceito atribuídos ao estado de superfície do pavimento são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – IES – Índice do Estado da Superfície do pavimento (DNIT 08/2002 PRO)

<i>Descrição</i>	<i>IES</i>	<i>Código</i>	<i>Conceito</i>
IGGE $\leq$ 20 e ICPF $>$ 3,5	0	A	Ótimo
IGGE $\leq$ 20 e ICPF $\leq$ 3,5	1	B	Bom
20 $\leq$ IGGE $\leq$ 40 e ICPF $>$ 3,5	2		
20 $\leq$ IGGE $\leq$ 40 e ICPF $\leq$ 3,5	3	C	Regular
40 $\leq$ IGGE $\leq$ 60 e ICPF $>$ 2,5	4		
40 $\leq$ IGGE $\leq$ 60 e ICPF $\leq$ 2,5	5	D	Ruim
60 $\leq$ IGGE $\leq$ 90 e ICPF $>$ 2,5	7		
60 $\leq$ IGGE $\leq$ 90 e ICPF $\leq$ 2,5	8	E	Péssimo
IGGE $>$ 90	10		

Pela análise da Figura 3.15 pode-se observar que 60% dos trechos rodoviários presentes no banco de dados apresentavam ICPF com conceito bom e ótimo e 25% com conceito regular. Também pode-se observar que aproximadamente 70% dos pavimentos levantados apresentavam o Índice de Estado de Superfície com conceitos ótimo e bom. Apenas 10% apresentavam conceito regular, sendo o restante, ruim a péssimo.

Figura 3.15 – ICPF e IES para os trechos do banco de dados de rodovias

3.2.5 Tipos de revestimento asfálticos

A Figura 3.16 mostra a distribuição, como construído, dos principais tipos de revestimento asfálticos. Pode-se perceber a predominância de revestimentos do tipo tratamento superficial (aproximadamente 50% do total), seguido do tratamento contra/pó, com 17% do total.

Figura 3.16 – Principais tipos de revestimento asfálticos como construído

A Figura 3.17 apresenta os revestimentos contidos no levantamento e que não haviam sofrido algum tipo de atividade de manutenção e reabilitação até 2004. Pode-se perceber que os trechos em areia asfalto usinado a quente (AAUQ) e tratamento contra/pó sofreram intervenções e foram substituídos por outros tipos de revestimentos. Os tratamentos superficiais representam 67% do total dos trechos, seguidos pelos trechos em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), com 16% do total.

Figura 3.17 – Pavimentos que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação até o ano de 2004

Os pavimentos antigos, que sofreram atividades de manutenção e reabilitação, foram substituídos principalmente por tratamentos superficiais, em sua maioria, seguidos por CBUQ, como pode ser observado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Principais tipos de revestimentos utilizados em substituição aos AAUQ e aos tratamentos contra/pó

3.2.6 Tráfego

As informações sobre as características dos veículos que trafegam na rede rodoviária do Estado da Bahia, com relação a tipos e volumes médios diários, foram obtidas por meio de contagens volumétricas e classificatórias em 50 postos, realizadas pelo DERBA em 2004 (Sugestões Técnicas para Implementação do Programa de Restauração e Manutenção Rodoviária– CREMA – DERBA - BIRD -Volume I a V, 2005).

As informações sobre carregamento dos veículos, como estimativa da quantidade de veículos carregados, veículos vazios e veículos infratores (veículos com excesso de PBT e/ou excesso por eixo) foram fornecidas pelo DERBA, referente a pesagens realizadas em 2005 e 2006 em 6 postos de pesagem portátil dinâmica de veículos de carga em rodovias estaduais e federais no estado da Bahia. A Figura 3.19 mostra a distribuição do VMDA para os 745 trechos presentes no banco de dados. Pela análise da figura pode-se notar que mais de 50% dos trechos pesquisados apresentam VMDA menor ou igual a 1000 veículos por dia. Apenas uma pequena proporção apresenta VMDA superior a 4000 veículos por dia.

Figura 3.19 – Contagens volumétricas para os trechos do banco de dados

A Figura 3.20 apresenta valores médios para as contagens classificatórias dos veículos nos trechos. Pode-se observar que, em média, 70% do tráfego é de veículos de passeio e 7 % de ônibus. O tráfego de veículos de carga predominante é de caminhões leves (5%), caminhões médios (5%), caminhões pesados (8%) e semi-reboques (4%).

Figura 3.20 – Contagem classificatória de veículos

Considerando-se apenas o VMDA para ônibus e caminhões, ocorre a predominância de caminhões pesados e ônibus, com 27% e 22% respectivamente, sendo o restante composto principalmente por caminhões médios, leves e semi-reboques (Figura 3.21).

Figura 3.21 – Contagem classificatória para ônibus e caminhões

As pesagens realizadas pelo DERBA (Operação de postos de pesagem dinâmica de veículos nas rodovias estaduais e federais delegadas, 2005 a 2006) em seis postos localizados em Dias D’Avila, Camaçari, Firmino Alves, Jacobina, Cansanção e Itiúba mostraram que, do total de veículos fiscalizados, 79,63% eram veículos carregados. Do total de veículos carregados, 19,69% eram veículos infratores, ou seja, apresentavam excesso de PBT e/ou excesso por eixo. Do total dos infratores, 86,38% eram veículos sem excesso de PBT, mas com excesso por eixo, 8,16% eram veículos com excesso de PBT, mas sem excesso por eixo, e 5,46% eram veículos com ambos os excessos.

Número N - O número equivalente de operações do eixo padrão (N) de 80 kN foi estimado com base nos valores do tráfego médio diário (VMDA) do banco de dados de gerência da malha viária da Bahia. Os volumes médios diários para cada um dos anos anteriores desde a abertura do tráfego até 2003 foram estimados em função do tráfego de 2004 e das taxas de crescimento, fornecidas pela Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI, 2009).

Foram estimados os valores de N, utilizando o método da AASHTO (1993), considerando somente o tráfego que passou no trecho durante o ano de 2004 (N2004) e também considerando o tráfego que passou no trecho durante toda a vida útil do pavimento, ou seja, desde a abertura ao tráfego até o ano de 2004.

Fatores de Veículos (FV) - Os fatores de veículos são determinados a partir das avaliações das cargas por eixo dos veículos que trafegam nas rodovias e têm por finalidade estimar o dano provocado ao pavimento comparado ao de uma carga padrão. Eles são determinados

somando-se os efeitos destrutivos de cada eixo que compõe o veículo. O efeito destrutivo de cada eixo é variável de acordo com o peso do mesmo.

O conhecimento dos efeitos cumulativos das solicitações do tráfego é fundamental para os métodos de dimensionamento e para os sistemas de gerência de pavimentos. Por causa da grande variabilidade das condições de tráfego, seus efeitos cumulativos têm que ser expressos por um denominador comum, os Fatores de Equivalência de Carga (FEC). O FEC permite a conversão de aplicações de diferentes solicitações em um número equivalente de aplicações da solicitação-padrão, possibilitando o dimensionamento e a previsão do desempenho de pavimentos para o tráfego misto real (FERNANDES JR., 1994).

Os fatores de equivalência de carga utilizados no Brasil são empíricos e calculados pelo Método da AASHTO (utilizado neste trabalho), modificado por Treybig e Von Quintus (1976), utilizado no Método de Projeto de Restauração DNER-PRO 159 (DNER, 1985), pelo Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (TURNBULL; FOSTER; AHLVIN, 1962), utilizado no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER, de autoria do Engenheiro Murillo Lopes de Souza (SOUZA, 1981), e pelo desenvolvido por HVEEM e SHERMAN (1962), utilizado na DNER-PRO 10-79 para avaliação de pavimentos existentes e dimensionamento de reforços.

Os relatórios de pesagem de veículos realizados pelo DERBA não contemplam as pesagens individuais por eixo dos veículos, para cada veículo que transitam nas rodovias estaduais, e sim, informações gerais sobre o montante de veículos que apresentam, ou não, excesso de peso. Por esse motivo, não foi possível a determinação de fatores de veículos característicos e próprios para o tráfego existente. Para a sua determinação foram adotados os seguintes procedimentos e considerações:

1. Os fatores de veículos foram estimados por grupos de veículos, isto é, ônibus, caminhões médios, caminhões pesados e reboques / semi-reboques, conforme contagens volumétricas realizadas em 2004.
2. Para o cálculo do FV foram adotados os limites legais conforme classificação do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006), de acordo com a composição da frota obtida das contagens volumétricas realizadas em 2004. Foram considerados os percentuais de veículos carregados e vazios, conforme pesagens realizadas pelo DERBA em 2005 e 2006.

Os veículos que compõem cada grupo e seus respectivos valores de FV calculados são apresentados na Tabela 3.6. Com a finalidade de obtenção de um único fator de veículo para os reboques e semi-reboques, foi adotado o seguinte procedimento: achou-se a média ponderada dos fatores de veículos para reboques e semi-reboques, em que o fator de ponderação corresponde ao percentual de participação na frota de veículos comerciais.

Tabela 3.6 – FV's calculados para os veículos/grupos

<i>Tipo / Grupo de Veículo</i>		<i>Percentual dos Veículos Comerciais</i>	<i>Fatores de Veículos AASHTO</i>	
Ônibus	3C	26	0,77	
Caminhões Médios	2C	21	0,47	
Caminhões Pesado	3C	33	1,20	
Semi-reboques	2S1/2S2	1	2,85	} 3,22
	2S3/3S2/3S3	15	2,98	
Reboques	3D4	4	4,20	

4 PLANEJAMENTO FATORIAL PARA DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE DESEMPENHO

Neste capítulo é apresentado o planejamento fatorial para desenvolvimento dos modelos de desempenho, com base nas informações de levantamentos disponíveis no banco de dados do DERBA. Inclui, também, a seleção de trechos para coleta de dados complementares de irregularidade longitudinal e os critérios usados para a escolha das variáveis.

4.1 PLANEJAMENTO FATORIAL

Os planejamentos fatoriais são uma ferramenta estatística utilizada para pesquisar as diferenças nas respostas provenientes de variações nos fatores, denominados de efeitos principais, bem como os efeitos de interação entre os fatores. Inicialmente, escolhem-se as variáveis independentes a serem estudadas e seleciona-se um número fixo de níveis para cada uma das variáveis (ou fatores), que são combinadas em um arranjo experimental $l_1 \times l_2 \times \dots \times l_k$ admitindo-se l_1 níveis para a primeira variável, l_2 para a segunda, ..., e l_k para a $k^{\text{ésima}}$ (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978).

O planejamento fatorial foi desenvolvido, neste trabalho, com o objetivo de arranjar os dados disponíveis no banco de dados de rodovias do DERBA de tal forma que as matrizes fatoriais facilitassem a posterior análise estatística e o desenvolvimento dos modelos de desempenho para pavimentos em tratamento superficial duplo e em CBUQ, que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação até 2004. Foi necessária, também, a coleta de dados complementares para o desenvolvimento de modelos de irregularidade longitudinal para trechos em tratamento superficial duplo (TSD).

Para o desenvolvimento das matrizes fatoriais foram adotados dois níveis para cada fator, obtendo-se experimentos fatoriais do tipo $2^3=8$. Não foi possível aumentar o número de níveis para 3 ou mais, pois as tentativas de realizá-lo resultaram em células vazias nas matrizes fatoriais. Além disso, no caso dos levantamentos complementares, havia a necessidade de redução do número de amostras em razão da limitação orçamentária para a execução dos levantamentos. A representação do experimento fatorial com três fatores (ID-Idade, TA-Tráfego e PL-Pluviometria), cada um com dois níveis, é apresentada na Tabela 4.1.

Também foram previstas réplicas para as células das matrizes fatoriais, pois são importantes para a estimativa do erro experimental. As réplicas são repetições de avaliações em seções de pavimento pertencentes a uma mesma célula da matriz fatorial, cujos resultados foram obtidos com os mesmos equipamentos, equipe de campo, procedimentos e espaço de inferência.

Tabela 4.1 – Representação do experimento fatorial com três fatores em dois níveis

<i>Níveis</i>			<i>Representação</i>			<i>Variável resposta</i>
Fator ID	Fator TA	Fator PL	ID	TA	PL	
inferior	inferior	inferior	-1	-1	-1	$\bar{Y}_{111}$
inferior	inferior	superior	-1	-1	+1	$\bar{Y}_{112}$
inferior	superior	inferior	-1	+1	-1	$\bar{Y}_{121}$
inferior	superior	superior	-1	+1	+1	$\bar{Y}_{122}$
superior	inferior	inferior	+1	-1	-1	$\bar{Y}_{211}$
superior	inferior	superior	+1	-1	+1	$\bar{Y}_{212}$
superior	superior	inferior	+1	+1	-1	$\bar{Y}_{221}$
superior	superior	superior	+1	+1	+1	$\bar{Y}_{222}$

em que: $\bar{Y}_{111}$ é a resposta média, para a situação em que os fatores ID, TA e PL são tomados em seu nível inferior;

$\bar{Y}_{112}$ é a resposta média, para a situação em que os fatores ID e TA são tomados em seu nível inferior e o fator PL, em seu nível superior;

$\bar{Y}_{121}$ é a resposta média, para a situação em que os fatores ID e PL são tomados em seu nível inferior e o fator TA, em seu nível superior;

$\bar{Y}_{122}$ é a resposta média, para a situação em que o fator ID é tomado em seu nível inferior e os fatores TA e PL, em seu nível superior;

$\bar{Y}_{211}$ é a resposta média, para a situação em que o fator ID é tomado em seu nível superior e os fatores TA e PL, em seu nível inferior;

$\bar{Y}_{212}$ é a resposta média, para a situação em que os fatores ID e PL são tomados em seu nível superior e o fator TA, em seu nível inferior;

$\bar{Y}_{221}$ é a resposta média, para a situação em que os fatores ID e TA são tomados em seu nível superior e o fator PL, em seu nível inferior;

$\bar{Y}_{222}$ é a resposta média, para a situação em que os fatores ID, TA e PL são tomados em seu nível superior.

4.1.1 Escolha das variáveis

A escolha das variáveis deve ser relacionada ao nível de gerência com que se pretende desenvolver o estudo. Neste trabalho, as variáveis foram escolhidas com base na disponibilidade de informações no banco de dados para o desenvolvimento de modelos de desempenho para gerência em nível de rede, mas também foram levados em consideração os principais estudos desenvolvidos para as condições nacionais, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

Dessa forma, foram considerados critérios apresentados por Bennet e Paterson (2000), que permitem estruturar o gerenciamento de informações de forma que sejam adequadas às necessidades, para os diferentes níveis de gerência de pavimentos. Também foram observadas as recomendações do *Standard Guide for Prioritization of Data Needs for Pavement Management* (ASTM E – 96, Revisada 2002).

Bennet e Paterson (2000) apresentam os IQL (*Information Quality Levels*) em cinco níveis, variando de 1 a 5 em função dos objetivos do nível de gerência, como apresentado a seguir:

1. IQL1 e IQL2 – representam os níveis de detalhamento de informações típico da gerência em nível de projeto, onde muitos atributos devem ser medidos e coletados. Esses níveis são indicados para as agências que gerenciam vias expressas ou rodovias principais e são dotadas de orçamento disponível para suas pesquisas.
2. IQL3 – exige menor detalhamento, geralmente 2 ou 3 atributos, os quais podem ser usados em gerência em nível de rede. Indicado para o gerenciamento de rodovias rurais ou locais, sendo simples, mas eficaz para o seu propósito.

3. IQL4 e IQL5 – representam os níveis de informação que são usados em nível de planejamento. São indicados para o nível de gerência onde as estatísticas rodoviárias e os indicadores de desempenho são direcionados para os gerenciadores e ao público, pois são de fácil entendimento, sem a necessidade de conhecimento aprofundado sobre o assunto.

O *Standard Guide for Prioritization of Data Needs for Pavement Management* (ASTM E – 96, Revisada 2002) estabelece critérios baseados no nível de gerência que se deseja (rede ou projeto) e na classificação funcional das rodovias, subdividindo-as em principais, normalmente incluindo vias expressas e arteriais, e secundárias, normalmente incluindo rodovias coletoras e vias urbanas, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Do mesmo modo, as rodovias são subdivididas em rodovias com alto volume de tráfego, para um VMDA superior a 10.000, e rodovias com baixo volume de tráfego, para rodovias com VMDA inferior a 10.000, embora haja menção de que esses podem ser alterados, se necessário.

A importância relativa dos dados necessários à gerência, em função dos critérios citados, é, então, classificada como alta (A), média (M) e baixa (B). Percebe-se que a importância dos dados cresce em função do nível de gerência (de rede para projeto), da classificação da via e do tráfego que a mesma suporta.

Com base nos dados disponíveis no banco de dados e nos conceitos de gerência em nível de rede, foram selecionadas as seguintes variáveis para desenvolvimento dos modelos de desempenho da rede rodoviária do estado da Bahia:

1. Variáveis dependentes: Irregularidade longitudinal (IRI, em m/km) e área de desgaste, (A_{Desg} , em % da área total do pavimento), para pavimentos em Tratamento Superficial Duplo (TSD); Índice de Condição de Pavimento Flexível (ICPF) e área total de trincas, (A_{TT} , em % da área total do pavimento), para pavimentos em CBUQ.
2. Variáveis independentes: tráfego (TA) desde o início da operação do trecho (representado pelo número equivalente de operações do eixo padrão de 80 kN); idade do pavimento (ID, em anos), e pluviometria (PL, em mm anuais).

Tabela 4.2 – Nível de importância dos dados necessários à gerência de pavimentos - adaptada ASTM E – 96 (2002)

<i>Tipos de dados</i>	<i>Nível de Rede</i>				<i>Nível de Projeto</i>			
	Principais		Secundárias		Principais		Secundárias	
	Tráfego	Tráfego	Tráfego	Tráfego	Tráfego	Tráfego	Tráfego	Tráfego
	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo	Alto	Baixo
Dados Relacionados ao Desempenho								
Irregularidade Longitudinal	A	A	M	M	A	A	A	A
Defeitos de superfície	A	A	A	A	A	A	A	A
Atrito pneu-pavimento	M	M	M	B	A	B	A	B
Deflexões recuperáveis	M	B	M	B	A	A	A	M
Materiais	B	B	B	B	A	M	M	B
Dados Relacionados ao Histórico								
Construção	A	A	M	B	A	A	M	B
Manutenção	A	M	M	B	A	M	M	B
Tráfego	A	M	M	B	A	M	M	B
Acidentes	A	M	A	M	A	A	A	M
Dados Relacionados à Geometria								
Larguras de pista	A	A	A	A	A	A	A	A
Curvatura horizontal	A	M	M	B	A	M	M	B
Subidas / descidas	M	B	M	B	A	M	M	M
Curvatura vertical	M	B	B	B	M	B	B	B
Acostamento	A	M	A	M	A	A	A	M
Dados Relacionados ao Meio Ambiente								
Drenagem	A	M	A	M	A	M	A	M
Clima	A	M	M	B	A	M	M	B

4.1.2 Planejamento fatorial para os trechos em CBUQ

Os níveis foram escolhidos de acordo com a distribuição dos fatores idade do pavimento (ID), tráfego desde a abertura do pavimento até o ano de 2004 (TA) e pluviometria (PL), para os trechos em CBUQ que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação até o ano de 2004, de acordo com o banco de dados do DERBA, resultando num total de 78 trechos. A Tabela 4.3 apresenta, para os 78 trechos, os valores médios, mínimos e máximos para os fatores ID, TA e PL.

Tabela 4.3 – Valores médios, mínimos e máximos dos fatores ID, TA e PL nos 78 trechos em CBUQ

<i>Fator</i>	<i>Média</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
ID	24	6	40
TA	2.013.039	35.002	4.705.610
PL	888	383	1934

Entretanto, não foram utilizados todos os 78 trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004, pois alguns dos trechos não tinham, simultaneamente, informações das variáveis dependentes ICPF e Área Total de Trincas (A_{TT}).

A programação fatorial foi desenvolvida para os conjuntos de dados apresentados no ANEXO C, Tabelas C.1 e C.2, respectivamente para o ICPF e para a A_{TT} . Os valores das réplicas utilizados para o desenvolvimento dos modelos foram escolhidos de forma aleatória, para células que apresentaram mais de dois valores. Os demais valores foram utilizados na fase da validação dos modelos.

Os valores limites dos níveis dos fatores foram escolhidos de maneira que as células do arranjo do experimento fatorial fossem preenchidas com uma quantidade de trechos aproximadamente igual.

O planejamento fatorial para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004 é apresentado seguir:

a) Variável dependente Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF):

Fator ID: idade do pavimento, com dois níveis, codificados por i_1 (-1) e i_2 (+1):

- nível i_{d1} : idade do pavimento ≤ 26 anos;
- nível i_{d2} : idade do pavimento > 26 anos.

Fator TA: tráfego desde a sua abertura até o ano de 2004, com dois níveis, codificados por n_1 (-1) e n_2 (+1):

- nível ta_1 : tráfego $\leq 2 \times 10^6$ operações do eixo padrão de 80 kN;
- nível ta_2 : tráfego $> 2 \times 10^6$ operações do eixo padrão de 80 kN.

Fator PL: pluviometria, com dois níveis, codificados por p_1 (-1) e p_2 (+1):

- nível pl_1 : pluviometria ≤ 720 mm/ano;
- nível pl_2 : pluviometria > 720 mm/ano.

b) Variável dependente área total de trincas (A_{TT}):

Fator ID: idade do pavimento, com dois níveis, codificados por i_1 (-1) e i_2 (+1):

- nível id_1 : idade do pavimento ≤ 26 anos;
- nível id_2 : idade do pavimento > 26 anos.

Fator TA: tráfego desde a sua abertura até o ano de 2004, com dois níveis, codificados por n_1 (-1) e n_2 (+1):

- nível ta_1 : tráfego $\leq 2,48 \times 10^6$ operações do eixo padrão de 80 kN;
- nível ta_2 : tráfego $> 2,48 \times 10^6$ operações do eixo padrão de 80 kN.

Fator PL: pluviometria, com dois níveis, codificados por p_1 (-1) e p_2 (+1):

- nível pl_1 : pluviometria ≤ 720 mm/ano;
- nível pl_2 : pluviometria > 720 mm/ano.

Pode-se perceber que os valores médios dos fatores, como apresentado na Tabela 4.3, não coincidiram com os utilizados para a delimitação dos níveis no planejamento fatorial para as variáveis idade, tráfego e pluviometria, entretanto, os valores mantiveram-se próximos dos mesmos.

4.1.3 Planejamento fatorial para os trechos em tratamento superficial duplo

Os níveis foram escolhidos de acordo com a distribuição dos fatores idade do pavimento (ID), tráfego desde a abertura do pavimento até o ano de 2004 (TA) e pluviometria (PL), para os trechos em tratamento superficial duplo que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação até o ano de 2004, de acordo com o banco de dados do DERBA, resultando num total de 295 trechos. A Tabela 4.4 apresenta, para os 295 trechos, os valores médios, mínimos e máximos para os fatores ID, TA e PL.

Tabela 4.4 – Valores médios, mínimos, máximos dos fatores ID, TA e PL nos 295 trechos em TSD

<i>Fator</i>	<i>Média</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
ID	19	6	36
TA	994303	85000	4171043
PL	523	303	1930

Igualmente ao ocorrido para os trechos em CBUQ, não foram utilizados todos os 295 trechos em TSD no planejamento fatorial para a variável dependente área de desgaste (A_{Desg}).

A programação fatorial foi desenvolvida para os conjuntos de dados apresentados no ANEXO C, Tabela C.3, para a A_{Desg} . Os valores das réplicas utilizados para o desenvolvimento dos modelos foram escolhidos de forma aleatória, para as células que apresentaram mais de dois valores. Os demais valores foram utilizados na fase da validação dos modelos.

O planejamento fatorial para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004 é apresentado seguir:

a) Variável dependente A_{Desg} :

Fator ID: idade do pavimento, com dois níveis, codificados por i_1 (-1) e i_2 (+1):

- nível id_1 : idade do pavimento ≤ 15 anos;
- nível id_2 : idade do pavimento > 15 anos.

Fator TA: tráfego desde a sua abertura até o ano de 2004, com dois níveis, codificados por n_1 (-1) e n_2 (+1):

- nível ta_1 : tráfego $\leq 6 \times 10^5$ operações do eixo padrão de 80 kN;
- nível ta_2 : tráfego $> 6 \times 10^5$ operações do eixo padrão de 80 kN.

Fator PL: pluviometria, com dois níveis, codificados por p_1 (-1) e p_2 (+1):

- nível pl_1 : pluviometria ≤ 445 mm/ano;
- nível pl_2 : pluviometria > 445 mm/ano.

Pode-se perceber que os valores médios dos fatores para os 295 trechos, como apresentado na Tabela 4.4, não coincidiram com os utilizados para a delimitação dos níveis no

planejamento fatorial para as variáveis idade, tráfego e pluviometria, entretanto, os valores mantiveram-se próximos dos mesmos.

b) Variável dependente Irregularidade Longitudinal:

O fato de a irregularidade longitudinal ser um importante indicativo de desempenho utilizado em gerência de pavimentos, em nível de rede, e de não haver informações suficientes para o desenvolvimento de modelos de desempenho no banco de dados de rodovias do estado da Bahia, para este parâmetro, houve a necessidade de um experimento de campo para coleta de dados suficientes ao desenvolvimento deste trabalho.

Para execução do experimento e coleta de dados de irregularidade longitudinal foram considerados os 295 trechos em tratamento superficial duplo que não haviam sofrido atividades de manutenção e reabilitação até o ano de 2004 (ANEXO D, Tabela D.1), o que facilitou a seleção dos trechos a serem levantados, pois forneceu um número maior de opções e permitiu a escolha daqueles que resultasse em menor custo.

Os níveis dos fatores para a escolha dos trechos a serem levantados em campo são apresentada a seguir:

Fator ID: idade do pavimento, com dois níveis, codificados por id_1 (-1) e id_2 (+1):

- nível id_1 : idade do pavimento ≤ 15 anos;
- nível id_2 : idade do pavimento > 15 anos.

Fator TA: tráfego desde a sua abertura até o ano de 2004, com dois níveis, codificados por n_1 (-1) e n_2 (+1):

- nível ta_1 : tráfego $\leq 6,0 \times 10^5$ operações do eixo padrão de 80 kN;
- nível ta_2 : tráfego $> 6,0 \times 10^5$ operações do eixo padrão de 80 kN.

Fator PL: pluviometria, com dois níveis, codificados por p_1 (-1) e p_2 (+1):

- nível pl_1 : pluviometria ≤ 445 mm/ano;
- nível pl_2 : pluviometria > 445 mm/ano.

Os trechos foram agrupados, por meio de um algoritmo desenvolvido em planilha Excel. A escolha dentro dos grupos não pôde seguir o critério da aleatoriedade, pois foi

necessário montar um roteiro escolhendo-se trechos preferencialmente sequenciais, como forma de redução de custos.

Os trechos selecionados, conforme agrupamento em fatores e níveis, são apresentados nos ANEXO D, Tabela D.2. As rodovias que tiveram trechos selecionados para levantamento são apresentadas na Figura 4.1, onde -1 e +1 indicam os níveis dos fatores analisados no experimento (Pluviometria, Tráfego e Idade).

Figura 4.1 – Localização das rodovias que tiveram trechos selecionados para levantamento de irregularidade longitudinal

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

4.2.1 Levantamentos em campo

A pesquisa de campo para a coleta de dados complementares de irregularidade longitudinal foi realizada em outubro de 2009 e contou com o apoio da Universidade de São Paulo, da Universidade Federal da Bahia e do CNPq. Durante um período de 15 dias foram percorridos mais de 3.000 km de rodovias dentro do estado da Bahia, no interior e no litoral, passando por diferentes tipos de climas, de vegetação e de relevo.

O roteiro montado para a execução dos levantamentos teve como principal objetivo abranger todos os trechos, conforme o planejamento fatorial, entretanto, alguns trechos não foram executados ou por dificuldade de acesso aos locais dos levantamentos ou pelo motivo de o trecho estar em obras de recuperação. Foram os casos dos trechos 172EBA0045, 420BBA0132-1 e 220EBA0020.

Alguns trechos incluídos no planejamento fatorial para coleta de dados de irregularidade longitudinal apresentam o mesmo Código do DERBA (p. ex. o trecho 160EBA0065 do ANEXO, D Tabela D.2). Isso ocorre em trechos onde não existem materializações físicas como entroncamentos com outras rodovias estaduais, mas entroncamentos com vias locais, marcos ou divisas que subdividam os trechos em diferentes distâncias. Dessa forma, os trechos foram completamente levantados em sua distância total e depois foram subdivididos em escritório, para a obtenção dos valores de irregularidade longitudinal.

Também, devido a restrições orçamentárias, alguns trechos tiveram apenas uma faixa de pista levantada, pois o levantamento das duas faixas elevaria o custo e o tempo necessário aos levantamentos. Desta forma, foram executados 650 km de levantamentos de irregularidade longitudinal.

O equipamento utilizado para a medição da irregularidade foi um perfilômetro inercial laser, disponibilizado pelo Laboratório de Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Os principais componentes do equipamento são (Figura 4.2): módulos de medição a laser com e sem acelerômetros (Figura 4.2 a); hodômetro de precisão com dispositivo de fixação (Figura 4.2 b); *hub* que concentra as informações dos componentes e as envia para o computador (Figura 4.2 c); suporte para fixação no veículo (Figura 4.2 d); barra de suporte para fixação dos módulos; software para coleta de informações; software para processamento de dados.

Figura 4.2 – Principais componentes do perfilômetro inercial a laser

O equipamento é constituído de um sistema de medição dos perfis longitudinal e transversal de pavimentos rodoviários, que realiza suas medições com o auxílio de medidores de distância (veículo-pavimento), sem contato (a laser), medidores de aceleração vertical do veículo (acelerômetros) e de um sistema de medição de deslocamento e velocidade. O equipamento é gerenciado por um sistema micro processado que coordena a aquisição dos dados e os envia a um computador portátil, em tempo real.

Os procedimentos de montagem, de calibração, de operação do equipamento no campo e de processamento dos dados baseiam-se no “*Manual de Instalação e Operação do Perfilômetro Laser para Pavimentos - CIBERLASER*” fornecido pelo fabricante. O software para o processamento dos dados coletados se utiliza das equações para cálculo do IRI apresentadas por Sayers, Gillespie e Paterson (1986).

4.2.2 Aferição do perfilômetro com o uso de nível e mira

Com o objetivo de verificar a acurácia das medidas realizadas pelo perfilômetro a laser usado no experimento, foram realizadas leituras de nível e mira, conforme preconizado na norma DNER-ES 173-86. As medidas com nível e mira não puderam ser realizadas nos trechos de levantamentos de irregularidade longitudinal realizados nesta pesquisa, por

questões de segurança. Por este motivo, as medidas com nível e mira tiveram que ser realizadas nas imediações do campus da UFBA, em Salvador.

Foram selecionados três trechos, de 50 metros cada um com três níveis de irregularidade (alta, média e baixa), de maneira que fosse possível a obtenção de uma curva de calibração. Os trechos foram devidamente sinalizados e contaram com o apoio da segurança dos Campi da Universidade Federal da Bahia, para o controle do tráfego.

Após executadas as leituras com nível e mira, as leituras com o perfilômetro a laser foram executadas por três vezes em cada trecho, de forma que fosse possível a obtenção da média e do desvio-padrão. Os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser, já convertidos para a escala do IRI, são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados dos levantamentos realizados com nível e mira e com perfilômetro a laser

<i>TRECHO 1</i>		<i>TRECHO 2</i>		<i>TRECHO 3</i>	
NM_1_E	NM_1_D	NM_2_E	NM_2_D	NM_3_E	NM_3_D
6,31	6,64	3,81	4,37	10,69	9,32
PERF_1_1_E	PERF_1_1_D	PERF_2_1_E	PERF_2_1_D	PERF_3_1_E	PERF_3_1_D
3,46	4,63	2,56	2,79	8,02	7,15
PERF_1_2_E	PERF_1_2_D	PERF_2_2_E	PERF_2_2_D	PERF_3_2_E	PERF_3_2_D
4,54	4,75	2,61	2,66	7,88	7,00
PERF_1_3_E	PERF_1_3_D	PERF_2_3_E	PERF_2_3_D	PERF_3_3_E	PERF_3_3_D
3,67	4,53	2,56	2,72	7,22	6,60
MÉDIA = 4,27		MÉDIA = 2,65		MÉDIA = 7,31	
DESV. PAD.= 0,332		DESV. PAD.= 0,020		DESV. PAD. = 0,355	

em que: NM: resultados dos levantamentos com nível e mira, convertidos para a escala do IRI;

PERF_*i*_*n*: resultados dos levantamentos realizados com o perfilômetro a laser;

i: número do trecho;

n: ao número da passada;

E: trilha de roda interna;

D: trilha de roda externa.

Com base nos valores médios das leituras com nível e mira e das medidas realizadas com o perfilômetro a laser foi realizada uma análise de regressão simples. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 – Análise de regressão para os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser

<i>Estatística de regressão</i>	
R-Quadrado	0,996
Erro padrão	0,268
Observações	3

Tabela 4.7 – Análise de variância para os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser

<i>ANOVA</i>					
	gl	SQ	MQ	F	F crítico
Regressão	1	17,651	17,651	244,732	0,041
Resíduo	1	0,072	0,072		
Total	2	17,724			

A equação obtida por meio de regressão simples (Equação 4.1) é apresentada na Figura 4.3, onde y representa a irregularidade longitudinal obtida por meio de levantamentos com nível e mira e x representa a obtida por meio de levantamentos realizados com o perfilômetro a laser. Apesar de ter apresentado um R-quadrado elevado ($R^2 = 0,996$), pela observação dos resultados percebe-se que os valores de irregularidade longitudinal obtidos com o perfilômetro a laser apresentaram valores absolutos inferiores àqueles obtidos com nível e mira, ou seja, o aparelho mostrou boa precisão, mas não apresentou acurácia.

Figura 4.3 – Curva de regressão para os resultados dos levantamentos com nível e mira e com o perfilômetro a laser

Devido ao fato de o método de levantamento com nível e mira ser considerado de alto nível de acurácia e reprodutibilidade, tomou-se a decisão de utilizar a Equação 4.1, obtida por

meio de regressão simples, para ajustar os valores de irregularidade longitudinal obtidos por meio de levantamentos com o perfilômetro a laser, quando do desenvolvimento dos modelos de desempenho.

Os valores de irregularidade longitudinal obtidos pelos levantamentos nos trechos selecionados são apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9, respectivamente para utilização no desenvolvimento dos modelos e para a validação dos mesmos, escolhidos por sorteio, já corrigidos pela Equação 4.1. O código do DERBA está referenciado aos trechos apresentados no ANEXO, D, Tabela D.2. No total foram coletados dados de 16 trechos para o desenvolvimento dos modelos e de 18 trechos para validação.

Tabela 4.8 – Valores da Irregularidade Longitudinal, convertidos para a escala do IRI, obtidos dos levantamentos realizados em campo e utilizados no desenvolvimento dos modelos

CÓDIGO DO DERBA	<i>Irregularidade Longitudinal (IRI)</i>
161EBA0065	3,16
161EBA0070	3,24
030BBA0252	4,03
030BBA0252	3,80
160EBA0060	4,53
160EBA0065	4,17
122BBA0500-2	5,41
026EBA0150	5,03
650EBA0020	3,52
884EBA0005	3,25
120EBA0050	4,39
250EBA0005	4,14
084EBA0020	5,21
262EBA0110	4,80
409EBA0015	7,63
410BBA0010-1	6,57

Tabela 4.9 – Valores da Irregularidade Longitudinal, convertidos para a escala do IRI, obtidos dos levantamentos realizados em campo e utilizados na validação dos modelos

CÓDIGO DO DERBA	<i>Irregularidade Longitudinal (IRI)</i>
161EBA0065	3,43
161EBA0065	3,37
030BBA0250	3,60
030BBA0250	4,11
148EBA0125	4,86
148EBA0130	4,71
148EBA0140	5,01
122BBA0500-2	5,41
026EBA0150	5,02
650EBA0020	4,20
884EBA0005	4,82
120EBA0050	4,29
120EBA0050	4,01
262EBA0115	4,29
262EBA0115	4,88
409EBA0015	5,86
409EBA0015	6,15
410BBA0010-2	5,00

5 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE PREVISÃO DO DESEMPENHO

Para o desenvolvimento dos modelos estatísticos foram utilizadas duas formas de análise estatística dos dados para a verificação da significância dos fatores e de suas interações: a Análise Exploratória de Dados (AED) e a clássica Análise da Variância (ANOVA).

A Análise Exploratória de Dados (AED) é uma filosofia de análise de dados sugerida pelo NIST/EUA – *Handbook of Statistical Method* e que foi primeiramente desenvolvida por Tukey (1977). Ela emprega uma variedade de técnicas, em sua maioria gráficas, para maximizar a percepção dentro de um grupo de dados, revelar as variáveis mais importantes, detectar “outliers”, testar a fundamentação das hipóteses e tirar conclusões sobre a significância estatística dos fatores (NIST/SEMATECH, 2008). Na ANOVA, os testes dependem da fundamentação de hipóteses e, portanto, a validade de suas conclusões depende da validade das hipóteses.

5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS (AED)

A AED é uma abordagem para análise de dados de simples aplicação e de grande importância nos estágios iniciais de análise de um experimento fatorial. A aplicação das técnicas de análises gráficas diferencia-se no foco e na sensibilidade, podendo mostrar diferentes aspectos com relação aos dados e, quando múltiplas técnicas apresentam redundância, há maior confiança quanto à validade e alcance das conclusões.

Foram escolhidas seis técnicas gráficas devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação. São elas: Gráfico de Dispersão (*Scatter Plot*), Gráfico de Dispersão das Médias (*Mean Plot*), Matriz de Interação de Efeitos (*Interaction Effects Matrix Plot*), Gráfico de Youden (*Youden Plot*), Gráfico de Efeitos (*Effects - Plot*), Gráfico de Distribuição de Probabilidade Semi-Normal (*Half-Normal Probability Plot*).

Na sequência é apresentado um exemplo mais detalhado sobre a técnica, para a variável dependente Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF), considerando os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004. Para as demais

variáveis independentes são apresentados os gráficos obtidos pelas técnicas e um resumo de suas conclusões.

5.1.1 AED para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Variável dependente ICPF

A Tabela 5.1 apresenta a matriz fatorial com os resultados do experimento com 8 combinações de fatores e que também será utilizada na ANOVA. As duas réplicas utilizadas em cada célula da matriz fatorial estão no ANEXO C, Tabela C.1. De maneira a uniformizar os cálculos da análise estatística, foram consideradas, sempre, duas réplicas. No caso da AED foram utilizadas as médias aritméticas dos valores das réplicas de cada célula para o desenvolvimento das técnicas gráficas.

Tabela 5.1 – Matriz fatorial do ICPF das seções em CBUQ

Idade (A)	<i>Tráfego Acumulado (B)</i>			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	4,50	3,17	2,37	2,00
	3,50	2,75	2,20	1,75
id ₂	3,00	2,70	2,00	1,50
	2,00	2,10	1,80	1,00

- **Gráfico de Dispersão:** o Gráfico de Dispersão auxilia na determinação dos fatores mais importantes, que são aqueles que acarretam uma variação significativa na dispersão dos valores da variável resposta quando se passa do nível inferior (-) para o nível superior (+), quando comparado com o valor da sua média global. No eixo vertical aparecem os valores médios para a variável resposta, para um dado nível, para cada um dos fatores, enquanto no eixo horizontal apresentam-se os fatores com seus dois níveis (- e +).

Pela observação da Figura 5.1 percebe-se que a variável mais importante é o Tráfego (TA), pois apresenta a maior dispersão dos valores da variável resposta, em relação a média global dos valores de ICPF. Em sequência aparecem a Idade do Pavimento (ID), como o segundo fator mais importante e, por fim, a Pluviometria (PL), como a variável menos importante.

Figura 5.1 – Gráfico de Dispersão dos valores de ICPF

- **Gráfico de Dispersão das Médias:** um fator é importante se ele apresenta uma variação significativa na dispersão dos valores médios da variável resposta, quando se passa do nível inferior (-) para o nível superior (+), em comparação com o valor da sua média global. No eixo vertical aparecem os valores médios da variável resposta, para um dado nível, para cada um dos fatores, e no eixo horizontal apresentam-se os fatores com seus dois níveis (- e +).

Analisando-se a Figura 5.2 pode-se perceber que a variável mais importante é o Tráfego (TA), pois apresenta a maior dispersão dos valores médios da variável resposta quando se passa do nível inferior para o nível superior, em relação à média global dos valores de ICPF. Em sequência aparecem a Idade do Pavimento (ID), como o segundo fator mais importante e, por fim, a Pluviometria (PL), como a variável menos importante.

Figura 5.2 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores do ICPF em trechos em CBUQ

Matriz de Interação de Efeitos: é utilizada para determinar quais os principais fatores e quais as interações entre fatores que têm efeito sobre a variável resposta. A Matriz de Interação de Efeitos consiste de uma matriz triangular superior direita onde são plotados, na diagonal, os gráficos de dispersão das médias dos fatores e, fora da diagonal, os gráficos de dispersão das médias das interações entre os fatores.

Para a determinação dos valores médios das interações entre fatores é feita a multiplicação dos códigos que representam os níveis dos fatores (-,+), como no exemplo apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Exemplo para determinação dos códigos dos níveis para a interação entre os fatores Idade e Tráfego

<i>FATORES</i>	<i>ID</i>	<i>TA</i>	<i>ID*TA</i>
NÍVEIS	-	-	+
	+	-	-
	-	+	-
	+	+	+

Dessa forma, o valor plotado no gráfico da interação entre os fatores ID e TA para o nível inferior “-” é simplesmente a média dos valores da variável resposta para a qual *ID*TA* é igual a “-”; e o valor plotado no gráfico da interação entre os fatores ID e TA para o nível superior “+” é simplesmente a média dos valores da variável resposta para a qual *ID*TA* é igual a “+”.

Os gráficos que compõem a matriz de interação de efeitos apresentam, no eixo vertical, os valores médios para a variável resposta para um dado nível, para cada um dos fatores e suas interações. No eixo horizontal apresentam-se os fatores (ou interações) com seus dois níveis.

Em cada gráfico que compõe a matriz de interação também são incluídos os efeitos que são calculados pelo Método dos Mínimos Quadrados. Esta é uma iniciativa de associação das técnicas gráficas a um método quantitativo para a determinação dos fatores e interações que exercem maior influência sobre a variável resposta. Os fatores ou interações que apresentam efeitos de grande magnitude são considerados importantes enquanto os que apresentam magnitude próxima de zero são considerados menos importantes.

O efeito E para um determinado fator é definido como a variação na média da variável resposta quando ocorre a mudança de níveis dos fatores (ou interações) e pode ser definido como na Equação 5.1 (NIST/SEMATECH, 2008):

$$E = \bar{Y}(+) - \bar{Y}(-) \quad (5.1)$$

em que: E : efeito estimado para um determinado fator ou combinação de fatores;

$\bar{Y}(+)$: valor médio da variável resposta para o nível superior (+) de um determinado fator ou interação;

$\bar{Y}(-)$: valor médio da variável resposta para o nível inferior (-) de um determinado fator ou interação.

O valor do efeito estimado E pelo método dos mínimos quadrados, devido à ortogonalidade do experimento 2^3 , pode ser calculado simplesmente como a diferença entre as médias dos níveis superior (+) e inferior (-) dos fatores e suas interações. Visualmente, a diferença entre os valores médios plotados no gráfico são os valores dos efeitos estimados pelos mínimos quadrados, sendo que maiores diferenças implicam em fatores (ou interações) mais importantes e pequenas diferenças implicam em fatores (ou interações) menos importantes. De maneira que se possa melhor entender a determinação dos efeitos dos fatores e de suas interações é apresentado, a seguir, um exemplo com os dados da Tabela 5.1 para a variável resposta ICPF. Um resumo do cálculo dos efeitos pode ser observado na Tabela 5.3.

- Idade do Pavimento (ID):

$$\bar{Y}(+) = \frac{2,5 + 2,40 + 1,90 + 1,25}{4} = 2,013$$

$$\bar{Y}(-) = \frac{4 + 2,96 + 2,28 + 1,88}{4} = 2,780$$

$$E = 2,0125 - 2,780 = -0,767$$

- Tráfego (TA):

$$\bar{Y}(+) = \frac{2,28 + 1,88 + 1,90 + 1,25}{4} = 1,8275$$

$$\bar{Y}(-) = \frac{4 + 2,96 + 2,50 + 2,40}{4} = 2,965$$

$$E = 1,8275 - 2,965 = -1,138$$

- Pluviometria (PL):

$$\bar{Y}(+) = \frac{2,96 + 2,40 + 1,88 + 1,25}{4} = 2,1225$$

$$\bar{Y}(-) = \frac{4,00 + 2,50 + 2,28 + 1,90}{4} = 2,67$$

$$E = 2,1225 - 2,67 = -0,548$$

- Interação ID*TA:

$$\bar{Y}(+) = \frac{4,00 + 2,96 + 1,90 + 1,25}{4} = 2,5275$$

$$\bar{Y}(-) = \frac{2,50 + 2,40 + 2,28 + 1,88}{4} = 2,265$$

$$E = 2,5275 - 2,265 = -0,263$$

- Interação ID*PL:

$$\bar{Y}(+) = \frac{4,00 + 2,28 + 2,40 + 1,25}{4} = 2,4825$$

$$\bar{Y}(-) = \frac{2,96 + 1,88 + 2,50 + 1,90}{4} = 2,31$$

$$E = 2,4825 - 2,31 = 0,175$$

- Interação TA*PL:

$$\bar{Y}(+) = \frac{4,00 + 2,5 + 1,88 + 1,25}{4} = 2,4075$$

$$\bar{Y}(-) = \frac{2,96 + 2,40 + 2,28 + 1,90}{4} = 2,385$$

$$E = 2,4075 - 2,385 = 0,021$$

Tabela 5.3 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente ICPF

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>23</i>	<i>123</i>
	ID	TA	PL	ID*TA	ID*PL	TA*PL	ID*TA*PL
Y (+)	2,013	1,827	2,121	2,527	2,483	2,406	2,248
Y (-)	2,779	2,965	2,671	2,265	2,308	2,386	2,544
E	-0,767	-1,138	-0,550	0,263	0,175	0,021	-0,296

Pela observação da Figura 5.3 pode-se perceber que a variável mais importante é o Tráfego (TA), pois apresenta a maior dispersão dos valores médios da variável resposta quando se passa do nível inferior (-) para o nível superior (+), em relação a media global dos valores de ICPF. Além disso, apresenta o maior efeito sobre a variável resposta, ou seja, maior magnitude (-1,138), quando comparado com os demais fatores e suas interações. Pode-se estabelecer a seguinte sequência de importância de fatores e interações:

1. Tráfego acumulado (efeito estimado = -1,138);
2. Idade do pavimento (efeito estimado = -0,767);
3. Pluviometria (efeito estimado = -0,548);
4. Interação ID*TA (efeito estimado = -0,263);
5. Interação ID*PL (efeito estimado = 0,173);
6. Interação TA*PL (efeito estimado = -0,0225).

Figura 5.3 – Matriz de Interação de efeitos para o ICPF nos trechos em CBUQ

- **Gráfico de Youden:** é utilizado para determinar o ranking dos fatores e suas interações, do mais importante ao menos importante. O gráfico de Youden apresenta no eixo vertical os valores médios para a variável resposta correspondente ao nível inferior “-“, para cada um dos fatores e suas interações, e no eixo horizontal aparecem os valores médios para a variável resposta para o nível superior “+“, para cada um dos fatores e suas interações. A numeração plotada no gráfico indica o fator ou a interação entre eles e a cruz indica a média global para a variável resposta ICPF:

em que:

- 1 indica fator ID;
- 2 indica fator TA;
- 3 indica fator PL;

- 12 indica a interação ID*TA;
- 13 indica a interação ID*PL ;
- 23 indica a interação TA*PL;
- 123 indica a interação ID*TA*PL.

Figura 5.4 – Gráfico de Youden para o ICPF para os trechos em CBUQ

De acordo com a técnica gráfica, se um fator não é importante o valor médio da variável resposta para o nível superior (+) de um determinado fator ou interação será aproximadamente o valor médio da variável resposta para o nível inferior (-) de um determinado fator ou interação e se um fator for importante acontecerá o oposto. Portanto, fatores não importantes tendem a formar *clusters* ao redor da média global da variável resposta e os fatores importantes tendem a ficar afastados dessa média.

Pela observação da Figura 5.4 pode-se perceber que a variável mais importante é o Tráfego (TA), pois está mais longe do centro (ou média global). Também se percebe que a interação TA*PL é a que apresenta menor importância, pois mais se aproxima da média global, no centro de um aglomerado formado pelas interações ID*TA, ID*PL e ID*TA*PL. Portanto, a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações, é: Tráfego, Idade do pavimento, Pluviometria, sendo as interações consideradas não importantes.

É importante frisar que esta lista ordenada de fatores, derivada da análise do gráfico de *Youden*, leva em consideração, também, as análises anteriores realizadas para as demais técnicas gráficas apresentadas. Percebe-se que há um alto grau de consistência as técnicas gráficas consideradas neste trabalho para a determinação da importância dos fatores.

- **Gráfico de Efeitos:** o gráfico de Efeitos auxilia na determinação do ranking dos fatores e suas interações, do mais importante ao menos importante. Ele também auxilia no agrupamento entre os fatores e suas interações em duas categorias: importantes e não importantes. No eixo vertical aparecem os valores absolutos (por esse motivo a nomenclatura |Efeitos|) dos efeitos estimados para os fatores e suas interações e no eixo horizontal é plotado a sequência dos fatores e suas interações, do mais importante ao menos importante (para experimento 23 tem-se de 1 a 7). A numeração plotada no gráfico indica o fator ou a interação entre eles, conforme indicado na Tabela 5.2.

Para experimentos fatoriais 2^k a estimativa dos efeitos pelo método dos mínimos quadrados para um determinado fator i , para a interação entre dois fatores e também entre múltiplos fatores, tem a forma $E = \bar{Y}(+) - \bar{Y}(-)$. É uma simplificação válida devido à ortogonalidade que ocorre nos experimentos em dois níveis.

Dado o fato de que os fatores e suas interações são padronizados em valores -1 e +1 (- e + de forma simplificada), para os níveis inferior e superior, e que os sinais são arbitrários e podem ser revertidos, dependendo de como foram feitas as atribuições iniciais ao experimento, a análise para a determinação da hierarquização de fatores e interações por meio da magnitude do efeito fornece bons resultados (NIST/SEMATECH, 2008).

Se um fator ou a interação entre fatores é importante, a média “+” será consideravelmente diferente da média “-“, e o valor absoluto da diferença será maior, quando comparado com os demais. Por outro lado, fatores ou interações sem importância terão pequenas diferenças nas médias e, assim, o valor absoluto da diferença será pequeno.

Figura 5.5 – Gráfico de Efeitos para o ICPF dos trechos em CBUQ

Pela observação da Figura 5.5 pode-se perceber que a hierarquização dos fatores, do mais importante para o menos importante, aparece da esquerda para a direita sendo a variável mais importante o Tráfego (TA), com o maior efeito absoluto. Também se percebe que a interação TA*PL é a que apresenta menor importância. Tem-se, portanto, a seguinte hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Tráfego, Idade do pavimento, Pluviometria, e demais interações apresentam baixa importância.

- **Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal:** o gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal é uma ferramenta gráfica que usa os efeitos estimados de forma ordenada para ajudar a avaliar quais são os fatores importantes e quais os não importantes. Os efeitos são plotados contra os valores esperados de sua distribuição normal, mas apenas os valores esperados positivos da curva de distribuição normal (eixo x) são considerados.

Fatores não importantes são aqueles que têm efeitos próximos de zero e os importantes são aqueles que apresentam valores de efeitos considerados distantes de zero. Então, os efeitos não importantes tendem a ter uma distribuição centrada próximo a zero, enquanto os efeitos importantes tendem a cair fora da distribuição centrada em zero.

Figura 5.6 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal para o ICPF, em trechos com CBUQ

Para fazer a distinção entre fatores importantes e não importantes é necessário identificar onde há a aglomeração de efeitos dos fatores e suas interações, em linha, próximo de zero, que são considerados não importantes, sendo os demais considerados importantes. Com base nessas considerações e pela análise da Figura 5.6 pode-se estabelecer a seguinte hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Tráfego, Idade do pavimento, Pluviometria, e demais interações apresentam baixa importância.

Variável dependente Área Total de Trinca (A_{TT})

A Tabela 5.4 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Área Total de Trincas e foram obtidas do ANEXO C, Tabela C.2. A Tabela 5.5 apresenta o resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente A_{TT} para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004. As Figuras 5.7 a 5.12 apresentam os gráficos da Análise Exploratória de Dados.

Tabela 5.4 – Matriz fatorial da variável dependente Área Total de Trincas das seções em CBUQ sem atividade de manutenção e reabilitação até 2004

Idade (A)	Tráfego Acumulado (B)			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	16,50	27,78	57,00	38,75
	8,75	9,29	25,39	35,00
id ₂	63,75	20,00	65,00	85,00
	55,00	5,00	58,00	71,00

Tabela 5.5 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ

	1	2	3	12	13	23	123
	ID	TA	PL	ID*TA	ID*PL	TA*PL	ID*TA*PL
Y (+)	52,844	54,392	36,477	42,664	36,079	46,719	49,275
Y (-)	27,306	25,758	43,673	37,486	44,071	33,431	30,875
E	25,538	28,634	-7,196	5,179	-7,991	13,288	18,400

Figura 5.7 – Gráfico de Dispersão dos valores da Área Total de Trincas

Figura 5.8 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Área Total de Trincas em trechos em CBUQ

Figura 5.9 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Área Total de Trincas nos trechos em CBUQ

Figura 5.10 – Gráfico de Youden dos valores da Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ

Figura 5.11 – Gráfico de Efeito dos valores da Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ

Figura 5.12 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Área Total de Trincas, com trechos em CBUQ

De acordo com a análise dos gráficos das Figuras 5.7 a 5.12 obteve-se a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Tráfego, Idade do pavimento, interação entre os fatores Idade do Pavimento, Tráfego Acumulado e Pluviometria, interação entre os fatores Tráfego Acumulado e Pluviometria, sendo as demais interações e a Pluviometria consideradas não importantes.

5.1.2 AED para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Variável dependente Área de Desgaste (A_{DESG})

A Tabela 5.6 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Área de Desgaste e foram obtidas do ANEXO C, Tabela C.3. A Tabela 5.7 apresenta o resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente A_{DESG} (%) para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004. As Figuras 5.13 a 5.18 apresentam os gráficos da Análise Exploratória de Dados.

Tabela 5.6 – Matriz fatorial da variável dependente Área de Desgaste das seções em TSD

Idade (A)	Tráfego Acumulado (B)			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	15,52	25,00	25,00	25,00
	5,00	13,00	16,43	21,92
id ₂	37,50	34,09	66,18	75,00
	25,00	18,75	38,25	61,00

Tabela 5.7 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Área de Desgaste para os trechos em TSD

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>23</i>	<i>123</i>
	ID	TA	PL	ID*TA	ID*PL	TA*PL	ID*TA*PL
Y (+)	44,471	41,097	34,221	37,368	31,348	33,243	34,741
Y (-)	18,359	21,732	28,609	25,462	31,481	29,587	28,088
E	26,112	19,365	5,612	11,906	-0,133	3,656	6,653

Figura 5.13 – Gráfico de Dispersão dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD

Figura 5.14 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Área de Desgaste para os trechos em TSD

Figura 5.15 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD

Figura 5.16 – Gráfico de Youden dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD

Figura 5.17 – Gráfico de Efeitos dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD

Figura 5.18 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Área de Desgaste para os trechos em TSD

De acordo com a análise dos gráficos das Figuras 5.13 a 5.18 obteve-se a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Idade do Pavimento, Tráfego, interação entre os fatores Idade e Tráfego, sendo as demais interações e a Pluviometria consideradas não importantes.

Variável dependente Irregularidade Longitudinal (IRI)

Devido à importância da irregularidade longitudinal, como indicativo do desempenho de pavimentos para a gestão em nível de rede, foi desenvolvido um modelo considerando os fatores Idade, Tráfego e Pluviometria (IRI_{BA}) e outros dois modelos, com subdivisão de acordo com o clima, de acordo com os níveis do fator pluviometria, sendo os trechos

pertencentes ao clima subúmido a úmido (IRI_{BAu}), os que aparecem no nível “+”, e os pertencentes ao clima semiárido a seco (IRI_{BAS}), os que aparecem no nível “-”.

A Tabela 5.8 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}) e foram obtidas da Tabela 4.8. A Tabela 5.9 apresenta o resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD sem atividades manutenção e reabilitação até 2004. As Figuras 5.19 a 5.24 apresentam os gráficos da Análise Exploratória de Dados.

Tabela 5.8 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal das seções em TSD

Idade (A)	Tráfego Acumulado (B)			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	3,24	3,52	4,53	5,21
	3,16	3,25	4,17	4,80
Média aritmética	3,20	3,39	4,35	5,00
id ₂	4,03	4,39	5,41	7,63
	3,80	4,14	5,03	6,57
Média aritmética	3,92	4,27	5,22	7,10

Tabela 5.9 – Resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

	1	2	3	12	13	23	123
	ID	TA	PL	ID*TA	ID*PL	TA*PL	ID*TA*PL
Y (+)	5,125	5,418	4,938	4,726	4,728	4,804	4,687
Y (-)	3,985	3,692	4,171	4,384	4,381	4,305	4,423
E	1,140	1,726	0,767	0,342	0,348	0,499	0,264

Figura 5.19 – Gráfico de Dispersão dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

Figura 5.20 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

Figura 5.21 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

Figura 5.22 – Gráfico de Youden dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

Figura 5.23 – Gráfico de Efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

Figura 5.24 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD

De acordo com a análise dos gráficos das Figuras 5.19 a 5.24 obteve-se a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Tráfego, Idade do Pavimento, Pluviometria e a interação entre os fatores Tráfego e Pluviometria, sendo as demais interações consideradas não importantes.

Variável dependente Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAS}) clima semiárido a seco

A Tabela 5.10 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 4 combinações de fatores para a variável resposta Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco e foram obtidas da Tabela 4.8, para os valores que pertencem ao nível “-“ do fator Pluviometria.

A Tabela 5.11 apresenta o resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004. As Figuras 5.25 a 5.30 apresentam os gráficos da Análise Exploratória de Dados.

Tabela 5.10 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco das seções em TSD

Idade (A)	<i>Tráfego Acumulado (B)</i>	
	ta ₁	ta ₂
id ₁	3,24	4,53
	3,16	4,17
id ₂	4,03	5,41
	3,80	5,03

Tabela 5.11– Cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>I2</i>
	ID	TA	ID*TA
Y (+)	4,568	4,785	4,210
Y (-)	3,775	3,558	4,132
E	0,793	1,227	0,078

Figura 5.25 – Gráfico de Dispersão dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD

Figura 5.26 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco em trechos com TSD

Figura 5.27 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD

Figura 5.28 – Gráfico de Youden dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD

Figura 5.29 – Gráfico de Efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco nos trechos em TSD

Figura 5.30 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco em trechos com TSD

De acordo com a análise dos gráficos das Figuras 5.25 a 5.30 obteve-se a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Tráfego e Idade do Pavimento, sendo a interação entre os fatores Tráfego e Idade considerada não importante.

Variável dependente Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) clima subúmido a úmido

A Tabela 5.12 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 4 combinações de fatores para a variável resposta Irregularidade Longitudinal para o clima úmido a subúmido que foram obtidas da Tabela 4.8, para os valores que pertencem ao nível “+” do fator Pluviometria.

A Tabela 5.13 apresenta o resumo do cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004. As Figuras 5.31 a 5.36 apresentam os gráficos da Análise Exploratória de Dados.

Tabela 5.12 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido das seções em TSD

Idade (A)	<i>Tráfego Acumulado (B)</i>	
	ta_1	ta_2
id_1	3,52	5,21
	3,25	4,80
id_2	4,39	7,63
	4,14	6,57

Tabela 5.13 – Cálculo de efeitos estimados dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD

	<i>I</i>	<i>2</i>	<i>I2</i>
	ID	TA	ID*TA
Y (+)	5,682	6,050	5,241
Y (-)	4,194	3,826	4,635
E	1,488	2,224	0,606

Figura 5.31 – Gráfico de Dispersão dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, em trechos com TSD

Figura 5.32 – Gráfico de Dispersão dos valores médios dos níveis dos fatores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD

Figura 5.33 – Matriz de Interação de efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD

Figura 5.34 – Gráfico de Youden dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD

Figura 5.35 – Gráfico de Efeitos dos valores da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, em trechos com TSD

Figura 5.36 – Gráfico de distribuição de probabilidade semi-normal dos valores da Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, nos trechos em TSD

De acordo com a análise dos gráficos das Figuras 5.31 a 5.36 obteve-se a hierarquização, em ordem decrescente de importância, dos fatores e interações: Tráfego e Idade do Pavimento, sendo a interação entre os fatores Tráfego e Idade considerada não importante.

5.2 ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA)

Análise da Variância (ANOVA) é um teste estatístico que visa verificar se existe uma diferença significativa entre as médias provenientes de amostras distintas e se os fatores (ID, TA e PL) exercem influência no modelo. A distribuição F é utilizada pela ANOVA na decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese de igualdade entre grupos de dados (hipótese nula).

Uma hipótese estatística é uma suposição ou afirmação que pode ou não ser verdadeira, relativa a uma ou mais populações. A veracidade ou a falsidade de uma hipótese estatística nunca é conhecida com certeza, a menos que se examine toda a população, o que é impraticável na maior parte das situações.

Dessa forma, toma-se uma amostra aleatória da população de interesse e, com base nessa amostra, é estabelecido se a hipótese é provavelmente verdadeira ou provavelmente falsa. A decisão de que a hipótese é provavelmente verdadeira ou falsa é tomada com base em distribuições de probabilidades denominadas de distribuições amostrais.

Em estatística trabalha-se com dois tipos de hipóteses. A hipótese nula H_0 é a hipótese de igualdade entre as médias dos grupos ou entre os efeitos dos fatores. A hipótese nula é normalmente formulada com o objetivo de ser rejeitada. A rejeição da hipótese nula envolve a aceitação de outra hipótese denominada de alternativa H_1 .

Para poder aceitar ou rejeitar H_0 e, como consequência, rejeitar ou aceitar H_1 , é necessário estabelecer uma regra de decisão, isto é, é necessário estabelecer para que valores da variável em estudo vai-se rejeitar H_0 , ou seja, afirmar H_1 , e para que valores da mesma variável vai-se aceitar H_0 , ou seja, nessa situação particular, afirmar H_1 . Evidentemente, a regra permitirá decidir sobre H_0 , mas está sujeita a erros.

A probabilidade de se cometer um erro pode ser controlada pela seleção do nível de significância do teste de hipóteses (α), pois o nível de significância do teste é, na realidade, a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula, quando ela é verdadeira, sendo então a

probabilidade de se cometer um erro. Dessa forma, se o nível de significância escolhido for 1%, há uma confiança de 99% de não se estar cometendo um erro. Isso significa dizer que a probabilidade de erro seria 1%.

Na ANOVA o objetivo do teste é obter o valor de $F_{\text{observado}}$ dado pela relação entre a variância entre grupos e a variância dentro de grupos. Se o $F_{\text{observado}}$ for maior que o $F_{\text{crítico}}$, para um dado nível de significância α (5% utilizado neste trabalho), então a hipótese nula é rejeitada.

A Tabela 5.14 apresenta a análise da variância, considerando-se que os fatores ID, TA e PL, sejam respectivamente A, B e C. Nota-se que são necessárias ao menos duas réplicas para calcular a soma quadrática do erro. O teste F a respeito dos efeitos principais e de interações é diretamente proveniente dos valores esperados das médias quadráticas.

Tabela 5.14 – Tabela de Análise da Variância para modelo com três fatores

<i>Análise de Variância</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>F₀</i>
A	SQ_A	$(a-1)$	MQ_A	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
B	SQ_B	$(b-1)$	MQ_B	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
C	SQ_C	$(c-1)$	MQ_C	$\frac{MQ_C}{MQ_E}$
AB	SQ_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MQ_{AB}	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
AC	SQ_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MQ_{AC}	$\frac{MQ_{AC}}{MQ_E}$
BC	SQ_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MQ_{BC}	$\frac{MQ_{BC}}{MQ_E}$
ABC	SQ_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MQ_{ABC}	$\frac{MQ_{ABC}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$abc(n-1)$	MQ_E	
Total	SQ_T	$abcn-1$		

As equações computacionais para as somas quadráticas na Tabela 5.13 são apresentadas nas Equações 5.2 a 5.10:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (5.2)$$

$$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2 \dots}{bcn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (5.3)$$

$$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y^2 \dots_{j\cdot\cdot}}{acn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (5.4)$$

$$SQ_C = \sum_{k=1}^c \frac{y^2 \dots_{\cdot\cdot K\cdot}}{abn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (5.5)$$

$$SQ_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij\cdot\cdot}^2}{cn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SQ_A - SQ_B \quad (5.6)$$

$$SQ_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y^2_{i\cdot k\cdot}}{bn} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SQ_A - SQ_C \quad (5.7)$$

$$SQ_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y^2_{\cdot jk\cdot}}{an} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SQ_B - SQ_C \quad (5.8)$$

$$SQ_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y^2_{ijk\cdot}}{n} - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC} \quad (5.9)$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC} - SQ_{ABC} \quad (5.10)$$

As equações computacionais para as médias quadráticas na Tabela 5.13 são apresentadas nas Equações 5.11 a 5.17:

$$MQ_A = \frac{SQ_A}{(a-1)} \quad (5.11)$$

$$MQ_B = \frac{SQ_B}{(b-1)} \quad (5.12)$$

$$MQ_C = \frac{SQ_C}{(c-1)} \quad (5.13)$$

$$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a-1)(b-1)} \quad (5.14)$$

$$MQ_{AC} = \frac{SQ_{AC}}{(a-1)(c-1)} \quad (5.15)$$

$$MQ_{BC} = \frac{SQ_{BC}}{(b-1)(c-1)} \quad (5.16)$$

$$MQ_{ABC} = \frac{SQ_{ABC}}{(a-1)(b-1)(c-1)} \quad (5.17)$$

em que:

- a : número de níveis do fator A;
- b : número de níveis do fator B;
- c : número de níveis do fator C;
- n : número de réplicas;
- $y_{....}$: é a representação do total global de todas as observações;
- y_{ijkl} : é a observação na ijk -ésima célula para a l -ésima réplica na matriz fatorial;
- $y_{i....}$: é a representação do total das observações obtidas no i -ésimo nível do fator A;
- $y_{.j..}$: é a representação do total das observações obtidas no j -ésimo nível do fator B;
- $y_{..k.}$: é a representação do total das observações obtidas no k -ésimo nível do fator C;
- $y_{ij...}$: é representação do total das observações obtidas na ij -ésima célula da matriz fatorial;
- $y_{i.k.}$: é representação do total das observações obtidas na ik -ésima célula da matriz fatorial;
- $y_{.jk.}$: é representação do total das observações obtidas na jk -ésima célula da matriz fatorial;
- $y_{ijk.}$: é representação do total das observações obtidas na ijk -ésima célula da matriz fatorial.

Além dos elementos calculados na Tabela 5.13 também foram incluídos os efeitos dos fatores e suas interações e os coeficientes de regressão. Os efeitos já foram calculados, como

apresentado na seção 5.1, que trata da Análise Exploratória de Dados. O coeficiente de regressão para cada efeito principal e suas interações é a metade da estimativa de cada efeito, visto que os coeficientes de regressão medem o efeito de uma variação unitária em x_i sobre a média de Y e a estimativa do efeito está baseada na variação de duas unidades de +1 a -1 para um experimento fatorial 2^k .

De modo geral, os coeficientes estimados em um modelo linear podem ser calculados como na forma $\frac{\Delta y}{\Delta x}$, onde Δy é a mudança na variável resposta (ou efeito) e Δx é a mudança no nível dos fatores, sendo $\Delta x = (+1) - (-1) = 2$. Então, pode-se mostrar na Equação 5.18 que:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta y}{2} = \frac{1}{2} \Delta y \quad (5.18)$$

Para o caso mais simples com $k=1$, o modelo tem a forma apresentada na Equação 5.19:

$$y = \mu + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot x_1 \quad (5.19)$$

E substituindo 5.18 em 5.19, tem-se a Equação 5.20:

$$y = \mu + \frac{1}{2} \cdot \Delta y \cdot x_1 \quad (5.20)$$

em que: μ : é a média global;

Δy : é o efeito na variável resposta y devido ao fator 1.

5.2.1 ANOVA para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Índice de condição do pavimento flexível (ICPF)

A Tabela 5.15 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Índice de Condição do Pavimento Flexível e que foram obtidas no ANEXO C, Tabela C.1. A Tabela 5.16 apresenta o resumo do

cálculo da Análise da Variância dos fatores e interações sobre a variável dependente ICPF para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.

Tabela 5.15 – Matriz fatorial do ICPF das seções em CBUQ (ANOVA)

Idade (A)	<i>Tráfego Acumulado (B)</i>			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	4,50	3,17	2,37	2,00
	3,50	2,75	2,20	1,75
id ₂	3,00	2,70	2,00	1,50
	2,00	2,10	1,80	1,00

Tabela 5.16 – Resumo da ANOVA para o planejamento fatorial do ICPF

<i>Fator</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>F_o</i>	<i>Significativo</i>	<i>Valor P</i>
A	2,352	1	2,352	-0,767	-0,383	12,911	SIM	0,007
B	5,176	1	5,176	-1,138	-0,569	28,415	SIM	0,001
C	1,210	1	1,210	-0,550	-0,275	6,643	SIM	0,033
AB	0,276	1	0,276	0,263	0,131	1,513	NÃO	0,254
AC	0,123	1	0,123	0,175	0,088	0,673	NÃO	0,436
BC	0,002	1	0,002	0,021	0,010	0,009	NÃO	0,925
ABC	0,350	1	0,350	-0,296	-0,148	1,921	NÃO	0,203
Erro	1,457	8	0,182					
Total	10,944	15			2,396			

Área total de trincas (A_{TT})

A Tabela 5.17 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Área Total de Trincas e que foram obtidas da no ANEXO C, Tabela C.2. A Tabela 5.18 apresenta o resumo do cálculo da Análise da Variância dos fatores e interações sobre a variável dependente A_{TT} para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.

Tabela 5.17 – Matriz fatorial da A_{TT} das seções em CBUQ (ANOVA)

Idade (A)	<i>Tráfego Acumulado (B)</i>			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	16,50	27,78	57,00	38,75
	8,75	9,29	25,39	35,00
id ₂	63,75	20,00	65,00	85,00
	55,00	5,00	58,00	71,00

Tabela 5.18 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da A_{TT}

<i>Fator</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Fo</i>	<i>Significativo</i>	<i>Valor P</i>
A	2608,681	1	2608,681	25,538	12,769	21,272	SIM	0,002
B	3279,595	1	3279,595	28,634	14,317	26,743	SIM	0,001
C	207,151	1	207,151	-7,196	-3,598	1,689	NÃO	0,230
AB	107,273	1	107,273	5,179	2,589	0,875	NÃO	0,377
AC	255,432	1	255,432	-7,991	-3,996	2,083	NÃO	0,187
BC	706,244	1	706,244	13,288	6,644	5,759	SIM	0,043
ABC	1354,222	1	1354,222	18,400	9,200	11,043	SIM	0,010
Erro	981,075	8	122,634					
Total	9499,673	15			40,075			

5.2.2 ANOVA para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Área de desgaste (A_{Desg})

A Tabela 5.19 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Área de Desgaste e que foram obtidas da no ANEXO C, Tabela C.3. A Tabela 5.20 apresenta o resumo do cálculo da Análise da Variância dos fatores e interações sobre a variável dependente Área de Desgaste para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.

Tabela 5.19 – Matriz fatorial da Área de Desgaste das seções em TSD (ANOVA)

Idade (A)	Tráfego Acumulado (B)			
	ta ₁		ta ₂	
	Pluviometria (C)		Pluviometria (C)	
	pl ₁	pl ₂	pl ₁	pl ₂
id ₁	15,52	25,00	25,00	25,00
	5,00	13,00	16,43	21,92
id ₂	37,50	34,09	66,18	75,00
	25,00	18,75	38,25	61,00

Tabela 5.20 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Área de Desgaste

<i>Fator</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Fo</i>	<i>Significativo</i>	<i>Valor P</i>
A	2727,398	1	2727,398	26,112	13,056	25,594	SIM	0,001
B	1500,013	1	1500,013	19,365	9,683	14,076	SIM	0,006
C	125,956	1	125,956	5,612	2,806	1,182	NÃO	0,309
AB	567,035	1	567,035	11,906	5,953	5,321	SIM	0,050
AC	0,070	1	0,070	-0,133	-0,066	0,001	NÃO	0,980
BC	53,451	1	53,451	3,656	1,828	0,502	NÃO	0,499
ABC	177,036	1	177,036	6,653	3,326	1,661	NÃO	0,233
Erro	852,498	8	106,562					
Total	6003,457	15			31,415			

Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})

A Tabela 5.21 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 8 combinações de fatores para a variável resposta Irregularidade Longitudinal e que foram obtidas da Tabela 4.8. A Tabela 5.22 apresenta o resumo do cálculo da Análise da Variância dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.

Tabela 5.21 – Matriz fatorial da Irregularidade Longitudinal das seções em TSD (ANOVA)

<i>Tráfego Acumulado (B)</i>				
<i>Idade (A)</i>	<i>ta₁</i>		<i>ta₂</i>	
	<i>Pluviometria (C)</i>		<i>Pluviometria (C)</i>	
	<i>pl₁</i>	<i>pl₂</i>	<i>pl₁</i>	<i>pl₂</i>
id ₁	3,24	3,52	4,53	5,21
	3,16	3,25	4,17	4,80
id ₂	4,03	4,39	5,41	7,63
	3,80	4,14	5,03	6,57

Tabela 5.22 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Irregularidade Longitudinal

<i>Fator</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Fo</i>	<i>Significativo</i>	<i>Valor P</i>
A	5,200	1	5,200	1,140	0,570	47,117	SIM	0,00013
B	11,913	1	11,913	1,726	0,863	107,947	SIM	0,00001
C	2,353	1	2,353	0,767	0,383	21,321	SIM	0,00172
AB	0,467	1	0,467	0,342	0,171	4,233	NÃO	0,07366
AC	0,483	1	0,483	0,348	0,174	4,377	NÃO	0,06977
BC	0,994	1	0,994	0,499	0,249	9,009	SIM	0,01703
ABC	0,279	1	0,279	0,264	0,132	2,525	NÃO	0,15074
Erro	0,883	8	0,110					
Total	22,572	15			4,555			

Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAS}) clima semiárido a seco

A Tabela 5.23 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 4 combinações de fatores para a variável resposta Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco e que foram obtidas da Tabela 4.8. A Tabela 5.24 apresenta o resumo do cálculo da Análise da Variância dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.

Tabela 5.23 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco, das seções em TSD (ANOVA)

Idade (A)	Tráfego Acumulado (B)	
	ta ₁	ta ₂
id ₁	3,24	4,53
	3,16	4,17
id ₂	4,03	5,41
	3,80	5,03

Tabela 5.24 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco, das seções em TSD

<i>Fator</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Fo</i>	<i>Significativo</i>	<i>Valor P</i>
A	1,257	1	1,257	0,793	0,396	30,178	SIM	0,005
B	3,012	1	3,012	1,227	0,614	72,341	SIM	0,001
AB	0,012	1	0,012	0,078	0,039	0,291	NÃO	0,618
Erro	0,167	4	0,042					
Total	4,447	7			4,171			

Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAU}) clima subúmido a úmido

A Tabela 5.25 apresenta a matriz fatorial que representa as amostras do experimento de 4 combinações de fatores para a variável resposta Irregularidade Longitudinal (clima subúmido a úmido) e que foram obtidas da Tabela 4.8. A Tabela 5.26 apresenta o resumo do cálculo da Análise da Variância dos fatores e interações sobre a variável dependente Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004.

Tabela 5.25 – Matriz fatorial da variável dependente Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, das seções em TSD (ANOVA)

Idade (A)	Tráfego Acumulado (B)	
	ta ₁	ta ₂
id ₁	3,52	5,21
	3,25	4,80
id ₂	4,39	7,63
	4,14	6,57

Tabela 5.26 – Resumo da ANOVA para o experimento fatorial da Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido, das seções em TSD

<i>Fator</i>	<i>Soma Quadrática</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Média Quadrática</i>	<i>Efeito</i>	<i>Coeficiente</i>	<i>Fo</i>	<i>Significativo</i>	<i>Valor P</i>
A	4,426	1	4,426	1,488	0,744	24,717	SIM	0,0076
B	9,895	1	9,895	2,224	1,112	55,255	SIM	0,0017
AB	0,734	1	0,734	0,606	0,303	4,097	NÃO	0,1130
Erro	0,716	4	0,179					
Total	15,771	7			4,938			

5.3 ANÁLISE DE REGRESSÃO

A análise de regressão é uma técnica estatística utilizada para encontrar as estimativas dos parâmetros no modelo de regressão. O modelo de regressão é uma equação ajustada utilizada na previsão de observações futuras da variável resposta Y ou para estimar a resposta média em um nível particular da variável independente.

O modelo de regressão polinomial linear para o experimento fatorial 2³, para os fatores Idade do Pavimento, Tráfego e Pluviometria, é apresentado na Equação 5.21:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_a P(A) + \alpha_b P(B) + \alpha_c P(C) + \alpha_{ab} P(A)P(B) + \alpha_{ac} P(A)P(C) + \alpha_{bc} P(B)P(C) + \alpha_{abc} P(A)P(B)P(C) \quad (5.21)$$

em que: Y : variável resposta;

A: fator correspondente a Idade do Pavimento;

B: fator correspondente ao Tráfego acumulado;

C: fator correspondente à Pluviometria;

α_0 : média global das observações;

α_a : coeficiente de regressão correspondente ao fator A;

α_b : coeficiente de regressão correspondente ao fator B;

α_c : coeficiente de regressão correspondente ao fator C;

α_{ab} : coeficiente de regressão correspondente à interação AB;

α_{ac} : coeficiente de regressão correspondente à interação AC;

α_{bc} : coeficiente de regressão correspondente à interação BC;

α_{abc} : coeficiente de regressão correspondente à interação ABC;

$P(A)$: equação polinomial correspondente ao fator A;

$P(B)$: equação polinomial correspondente ao fator B;

$P(C)$: equação polinomial correspondente ao fator C.

As equações polinomiais lineares de um fator quantitativo x podem ser expressas em sua forma geral pela Equação 5.22:

$$P(x) = \lambda_l \left[\frac{(x - \bar{x})}{d} \right] \quad (5.22)$$

em que: λ_l : 1;

x : valor do fator quantitativo;

d : distância entre os níveis do fator x .

As equações polinomiais correspondentes aos fatores Idade do Pavimento, Tráfego e Pluviometria, para as variáveis dependentes em estudo são apresentadas no Quadro 5.1. Também são apresentados os modelos estatísticos (Equações 5.24 a 5.29) obtidos pela análise de regressão com seus respectivos coeficientes de determinação.

O coeficiente de determinação R^2 representa a quantidade de variabilidade nos dados explicada ou considerada no modelo. O R^2 é calculado como sendo a divisão entre a soma dos quadrados dos fatores e interações significativos pela soma dos quadrados total, conforme a Equação 5.23:

$$R^2 = \frac{SQ_{Modelo}}{SQ_{Total}} \quad (5.23)$$

<i>Variável Dependente</i>	<i>Equações Polinomiais</i>	<i>Modelos</i>	<i>Coeficiente de Determinação</i>
Seções em CBUQ sem atividade de manutenção e reabilitação até 2004			
Índice de Condição do Pavimento Flexível	$P(ID) = \frac{ID - 23}{15}; P(TA) = \frac{TA - 2 \times 10^6}{3,5 \times 10^6}; P(PL) = \frac{PL - 948}{840}$	$ICPF = 2,39 - 0,39P(ID) - 0,57P(TA) - 0,28P(PL)$ (5.24)	$R^2 = 0,79$
Área Total de Trincas	$P(ID) = \frac{ID - 26}{13}; P(TA) = \frac{TA - 2,4 \times 10^6}{3,43 \times 10^6}; P(PL) = \frac{PL - 965}{842}$	$A_{TT} = 40,1 + 12,7P(ID) + 14,3P(TA) + 6,6P(TA)P(PL) + 9,2P(ID)P(TA)P(PL)$ (5.25)	$R^2 = 0,83$
Seções em TSD sem atividade de manutenção e reabilitação até 2004			
Área de Desgaste	$P(ID) = \frac{ID - 21}{17}; P(TA) = \frac{TA - 9,5 \times 10^5}{2,2 \times 10^6}$	$A_{DESG} = 31,4 + 13,1P(ID) + 9,7P(TA) + 5,9P(ID)P(TA)$ (5.26)	$R^2 = 0,80$
Irregularidade Longitudinal	$P(ID) = \frac{ID - 22}{14}; P(TA) = \frac{TA - 1,1 \times 10^6}{1,6 \times 10^6}; P(PL) = \frac{PL - 505}{222}$	$IRI_{BA} = 4,5 + 0,57P(ID) + 0,86P(TA) + 0,38P(PL) + 0,25P(TA)P(PL)$ (5.27)	$R^2 = 0,90$
Irregularidade Longitudinal (clima seco)	$P(ID) = \frac{ID - 22}{11}; P(TA) = \frac{TA - 1,02 \times 10^6}{1,39 \times 10^6}$	$IRI_{BA_s} = 4,2 + 0,4P(ID) + 0,61P(TA)$ (5.28)	$R^2 = 0,95$
Irregularidade Longitudinal (clima úmido)	$P(ID) = \frac{ID - 22}{18}; P(TA) = \frac{TA - 1,24 \times 10^6}{1,81 \times 10^6}$	$IRI_{BA_u} = 4,9 + 0,74P(ID) + 1,1P(TA)$ (5.29)	$R^2 = 0,91$

Quadro 5.1 – Quadro resumo das equações polinomiais, modelos estatísticos e R^2

5.4 VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Para a verificação da adequação dos modelos estatísticos utilizou-se a análise de resíduos, o coeficiente de correlação (r) e o coeficiente de determinação R^2 (já calculado anteriormente). Os resíduos de um modelo de regressão são calculados de forma geral como apresentado na Equação 5.30:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.30)$$

em que: e_i : é o erro;

y_i : é uma observação real;

$\hat{y}_i$: é o valor ajustado correspondente, proveniente do modelo de regressão;

i : 1,2,...n.

A análise de resíduos é freqüentemente utilizada na verificação da suposição de que os erros sejam distribuídos de forma aproximadamente normal, com variância constante. Uma verificação aproximada da normalidade pode ser realizada por meio de gráficos de probabilidade normal dos resíduos. Também são utilizados gráficos onde são plotados os resíduos contra os valores de $\hat{y}_i$ para verificar se existe uma distribuição aleatória dos resíduos em torno de zero.

O coeficiente de correlação (r) mede o grau de dispersão dos valores observados em relação aos valores previstos, variando numericamente de -1 a +1 e com valores próximos de zero indicando que os valores observados e previstos apresentam um ajuste ruim.

Faz-se a verificação do ajuste do modelo de regressão linear simples ao conjunto de pares de pontos observados e previstos (X_i , Y_i) através da análise de variância da regressão (Equação 5.31):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i + e_i \quad (5.31)$$

em que: β_0 : coeficiente intercepto;

β_1 : coeficiente de inclinação da reta;

Y_i : valor previsto pela equação de regressão, com $i = 1, 2, \dots, n$;

X_i : valor observado pela equação de regressão, com $i = 1, 2, \dots, n$.

Também é realizada análise para verificação de presença de erro sistemático, que pode ocasionar uma superestimação ou subestimação da predição, por meio da determinação de outra reta de regressão simples, com $\beta_0 = 0$, pois a não ocorrência do erro sistemático se dará quando e somente quando o intercepto β_0 for nulo, a inclinação β_1 for igual a 1 e a soma dos erros e_i for nula. As tabelas com os cálculos dos parâmetros e dos testes estatísticos das retas de regressão são apresentadas no ANEXO E.

5.4.1 Modelo de desempenho do Índice de condição do pavimento Flexível (ICPF)

A Tabela 5.27 apresenta os valores observados, os previstos e os resíduos da variável dependente ICPF, para os trechos contidos no ANEXO C, Tabela C.1 que não foram utilizados no desenvolvimento do modelo. Os valores previstos foram calculados por meio da Equação 5.24. As Figuras 5.37, 5.38 e 5.39 apresentam, respectivamente, a equação de correlação linear com o coeficiente de correlação, o gráfico de resíduos e o gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

Tabela 5.27 – Valores de ICPF observados e previstos pela Equação 5.24

<i>CÓDIGO DO DERBA</i>	<i>ICPF (observado)</i>	<i>ICPF (previsto)</i>	<i>Resíduos</i>
001EBA0185	3,00	2,56	0,44
001EBA0190	2,83	2,56	0,27
001EBA0195	4,07	2,56	1,51
001EBA0200	3,98	2,56	1,41
001EBA0205	3,93	2,56	1,37
120EBA0125	3,50	2,62	0,88
120EBA0135	2,50	2,38	0,12
130EBA0235	2,00	2,27	-0,27
210EBA0015	4,38	3,25	1,12
210EBA0015	3,30	3,25	0,05
233EBA0070	3,10	3,05	0,05
262EBA0125	2,17	2,19	-0,02
262EBA0135	3,00	2,19	0,81
262EBA0135	3,81	2,19	1,62
263EBA0030	2,95	2,19	0,77
270EBA0020	1,83	2,39	-0,56
270EBA0030	3,50	2,39	1,11
512EBA0015	2,30	1,42	0,88
652EBA0005	3,50	2,81	0,69
AREMBEPE	2,50	1,77	0,73
PRAIA DO FORTE	1,90	1,77	0,13
P. DE SAUÍPE	1,30	1,77	-0,47

Figura 5.37 – Correlação dos valores observados do ICPF com os valores previstos

Figura 5.38 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho do ICPF obtido

Figura 5.39 – Gráfico de distribuição de probabilidade dos resíduos do ICPF

Pela análise da Figura 5.37 pode-se perceber que a reta de regressão linear do ICPF apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,64$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre a tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores observados de ICPF. A Figura 5.38 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 5.39 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta.

5.4.2 Modelo de desempenho da Área Total de Trincas (A_{TT})

A Tabela 5.28 apresenta os valores observados, os previstos e os resíduos da variável dependente Área Total de Trincas (%) para os trechos contidos no ANEXO C, Tabela C.2, que não foram utilizados no desenvolvimento do modelo. Os valores previstos foram calculados por meio da Equação 5.25.

Tabela 5.28 – Valores da Área Total de Trincas observados e previstos pela Equação 5.25

<i>CÓDIGO DO DERBA</i>	<i>ATT (%) (observado)</i>	<i>ATT (%) (previsto)</i>	<i>Resíduos</i>
001EBA0185	5,00	26,36	-21,36
120EBA0125	75,00	32,72	42,28
130EBA0235	30,00	39,65	-9,65
220EBA0065	30,00	45,52	-15,52
233EBA0095	20,00	15,98	4,02
262EBA0125	45,00	42,22	2,78
262EBA0135	30,00	42,22	-12,22
262EBA0135	75,00	42,22	32,78
270EBA0025	33,33	26,80	6,53
270EBA0030	30,00	26,80	3,20
274EBA0005	5,00	33,44	-28,44
275EBA0025	32,67	32,88	-0,21
499EBA0020	75,00	36,79	38,21
512EBA0015	78,00	65,22	12,78
535EBA0005	57,50	49,85	7,65
535EBA0020	65,00	49,85	15,15
AREMBEPE	75,00	49,85	25,15
PRAIA DO FORTE	60,00	49,85	10,15
P. DE SAUÍPE	62,00	49,85	12,15
SÃO FRANCISCO DO CONDE	65,00	53,45	11,55

As Figuras 5.40, 5.41 e 5.42 apresentam, respectivamente, a equação de correlação linear com o coeficiente de correlação, o gráfico de resíduos e o gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

Figura 5.40 – Correlação dos valores observados da Área Total de Trincas com os valores previstos pela Equação 5.25

Figura 5.41 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho da Área Total de Trincas obtido

Figura 5.42 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos

Pela análise da Figura 5.40 pode-se perceber que a reta de regressão linear da A_{TT} apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,65$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre a tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores

observados de A_{TT} . A Figura 5.41 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 5.42 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta.

5.4.3 Modelo de desempenho da Área de Desgaste (A_{Desg})

A Tabela 5.29 apresenta os valores observados, os previstos e os resíduos da variável dependente Área de Desgaste (%) para os trechos contidos no ANEXO C – Tabela C.3, que não foram utilizados no desenvolvimento do modelo. Os valores previstos foram calculados por meio da Equação 5.26.

As Figuras 5.43, 5.44 e 5.45 apresentam, respectivamente, a equação de correlação linear com o coeficiente de correlação, o gráfico de resíduos e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

Figura 5.43 – Correlação dos valores observados da Área de Desgaste com os valores previstos pela Equação 5.26

Tabela 5.29 – Valores da Área de desgaste observados e previstos pela Equação 5.26

<i>CÓDIGO DO DERBA</i>	<i>ADESG % (observado)</i>	<i>ADESG % (previsto)</i>	<i>Resíduos</i>
030BBA0310-1	40,0	30,37	9,63
030BBA0310-2	71,0	30,37	40,63
030BBA0330-3	72,4	30,58	41,83
122BBA0500-2	68,3	40,76	27,57
349BBA0410-1	5,0	20,69	-15,69
349BBA0434-2	9,3	21,16	-11,81
410BBA0010-1	53,7	41,54	12,14
410BBA0010-2	75,0	41,54	33,46
052EBA0040	25,0	35,87	-10,87
052EBA0100	70,8	39,68	31,15
052EBA0110	35,7	39,68	-3,97
052EBA0130	25,0	36,12	-11,12
052EBA0135	51,1	36,12	14,97
052EBA0145	25,0	36,12	-11,12
052EBA0155	21,6	36,12	-14,52
084EBA0020	25,0	23,14	1,86
084EBA0120	25,0	28,37	-3,37
084EBA0120	25,0	28,37	-3,37
084EBA0125	25,0	27,82	-2,82
120EBA0050	36,1	27,67	8,44
120EBA0050	28,7	27,67	1,03
120EBA0095	25,0	34,51	-9,51
120EBA0240	25,0	28,36	-3,36
130EBA0015	56,3	27,93	28,32
142EBA0065	5,0	18,69	-13,69
142EBA0070	19,5	20,02	-0,49
142EBA0075	24,5	20,02	4,48
142EBA0075	12,2	20,02	-7,83
152EBA0030	5,0	21,21	-16,21
160EBA0040	23,0	26,44	-3,44
161EBA0040	5,0	25,63	-20,63
161EBA0045	5,0	25,63	-20,63
172EBA0030	5,0	20,36	-15,36
172EBA0040	5,0	20,36	-15,36
210EBA0005	25,4	31,57	-6,16
210EBA0080	31,3	40,93	-9,68
210EBA0095	25,0	35,34	-10,34
220EBA0020	23,3	24,19	-0,86
220EBA0045	43,2	39,64	3,54
220EBA0045	25,0	39,64	-14,64
262EBA0140	50,0	48,91	1,09
262EBA0140	75,0	48,91	26,09
262EBA0145	75,0	45,79	29,21
262EBA0150	55,0	45,79	9,21
262EBA0155	75,0	45,79	29,21
262EBA0160	68,3	45,79	22,54
368EBA0020	75,0	40,21	34,79
390EBA0005	25,0	32,82	-7,82

Tabela 5.29 – Valores da Área de desgaste observados e previstos pela Equação 5.26 (Continuação)

<i>CÓDIGO DO DERBA</i>	<i>ADESG % (observado)</i>	<i>ADESG % (previsto)</i>	<i>Resíduos</i>
390EBA0010	25,0	32,82	-7,82
460EBA0010	21,2	26,54	-5,35
652EBA0015	25,0	21,18	3,82
652EBA0020	25,0	21,18	3,82
693EBA0010	10,0	23,15	-13,15
ANGUERA	25,0	33,84	-8,84

Figura 5.44 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho da Área de Desgaste obtido

Figura 5.45 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos

Pela análise da Figura 5.43 pode-se perceber que a reta de regressão linear da A_{Desg} apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,74$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre a tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores observados de A_{Desg} . A Figura 5.44 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 5.45 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta.

5.4.4 Modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})

A Tabela 5.30 apresenta os valores observados, os previstos e os resíduos da variável dependente Irregularidade Longitudinal (m/km) para os trechos contidos na Tabela 4.9. Os valores previstos foram calculados por meio da Equação 5.27.

Tabela 5.30 – Valores de Irregularidade Longitudinal observados e previstos pela Equação 5.27

CÓDIGO DO DERBA	IRI (m/km) (observado)	IRI_{BA} (m/km) (previsto)	Resíduos
161EBA0065	3,43	3,84	-0,42
161EBA0065	3,37	3,84	-0,47
030BBA0250	3,60	4,14	-0,55
030BBA0250	4,11	4,14	-0,04
148EBA0125	4,86	4,21	0,65
148EBA0130	4,71	4,62	0,09
148EBA0140	5,01	4,62	0,39
122BBA0500-2	5,41	5,14	0,27
026EBA0150	5,02	4,61	0,41
650EBA0020	4,20	3,63	0,57
884EBA0005	4,82	3,97	0,85
120EBA0050	4,29	4,46	-0,17
120EBA0050	4,01	4,46	-0,45
262EBA0115	4,29	4,41	-0,12
262EBA0115	4,88	4,41	0,48
409EBA0015	5,86	6,13	-0,27
409EBA0015	6,15	6,13	0,02
410BBA0010-2	5,00	5,39	-0,38

As Figuras 5.46, 5.47 e 5.48 apresentam, respectivamente, a equação de correlação linear com o coeficiente de correlação, o gráfico de resíduos e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

Figura 5.46 – Correlação dos valores observados da Irregularidade Longitudinal com os valores previstos pela Equação 4.27

Figura 5.47 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal

Figura 5.48 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos da Irregularidade Longitudinal

Pela análise da Figura 5.46 pode-se perceber que a reta de regressão linear do IRI_{BA} apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,83$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre uma pequena tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores observados de IRI_{BA} , mas quando se distanciam de valores extremos, os valores estimados pelo modelo de IRI_{BA} convergem aos valores observados. A Figura 5.47 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 5.48 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta. Pode-se concluir, portanto pela adequação do modelo de Irregularidade Longitudinal IRI_{BA} obtido.

5.4.5 Modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA} s) para clima semiárido a seco

A Tabela 5.31 apresenta os valores observados, os previstos e os resíduos da variável dependente Irregularidade Longitudinal (m/km), para o clima semiárido a seco, considerando os trechos contidos na tabela 4.9, para aqueles valores que pertencem ao nível “-“ do fator Pluviometria. Os valores previstos foram calculados por meio da Equação 5.28.

Tabela 5.31 – Valores da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco, observados e previstos pela Equação 5.28

CÓDIGO DO DERBA	IRI (m/km) (observado)	IRI_{BA s} (m/km) (previsto)	Resíduos
161EBA0065	3,43	3,72	-0,30
161EBA0070	3,37	3,72	-0,35
030BBA0250	3,60	3,98	-0,38
030BBA0252	4,11	3,98	0,13
148EBA0125	4,86	4,03	0,83
148EBA0130	4,71	4,41	0,30
148EBA0140	5,01	4,41	0,60
122BBA0500-2	5,41	4,88	0,53
026EBA0150	5,02	4,40	0,62

As Figuras 5.49, 5.50 e 5.51 apresentam, respectivamente, a equação de correlação linear com o coeficiente de correlação, o gráfico de resíduos e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

Figura 5.49 – Correlação dos valores observados da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco com, os valores previstos pela Equação 5.28

Figura 5.50 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco

Figura 5.51 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos da Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco

Pela análise da Figura 5.49 pode-se perceber que a reta de regressão linear do IRI_{BAS} apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,90$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre pequena tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores observados de IRI_{BAS} . A Figura 5.50 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 5.51 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta. Pode-se concluir, portanto pela adequação do modelo de Irregularidade Longitudinal IRI_{BAS} obtido.

5.4.6 Modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) para clima subúmido a úmido

A Tabela 5.32 apresenta os valores observados, os previstos e os resíduos da variável dependente Irregularidade Longitudinal (m/km), para o clima subúmido a úmido, considerando os trechos contidos na tabela 4.9, para aqueles valores que pertencem ao nível “+” do fator Pluviometria. Os valores previstos foram calculados por meio da Equação 5.29.

Tabela 5.32 – Valores da Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido observados e previstos pela Equação 5.29

CÓDIGO DO DERBA	IRI (m/km) (observado)	IRI_{BAu} (m/km) (previsto)	Resíduos
650EBA0020	4,20	3,81	0,39
884EBA0005	4,82	4,16	0,66
120EBA0050	4,29	4,52	-0,22
120EBA0050	4,01	4,52	-0,51
262EBA0110	4,29	4,75	-0,46
262EBA0115	4,88	4,75	0,13
409EBA0015	5,86	6,08	-0,22
409EBA0015	6,15	6,08	0,08
410BBA0010-1	5,00	5,79	-0,79

As Figuras 5.52, 5.53 e 5.54 apresentam, respectivamente, a equação de correlação linear com o coeficiente de correlação, o gráfico de resíduos e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

Figura 5.52 – Correlação dos valores observados da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido com os valores previstos pela Equação 5.29

Figura 5.53 – Gráfico de resíduos do modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido

Figura 5.54 – Gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos da Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido

Pela análise da Figura 5.52 pode-se perceber que a reta de regressão linear do IRI_{BAu} apresentou bom ajuste ao conjunto de pares de pontos observados e previstos, com $r = 0,84$. Entretanto, a observação da reta de regressão com o intercepto igual a 0 indica que ocorre uma pequena tendência de superestimação para menores valores e subestimação para maiores valores observados de IRI_{BAu} , mas quando se distanciam de valores extremos, os valores estimados pelo modelo de IRI_{BAu} convergem aos valores observados. A Figura 5.53 mostra que existe uma distribuição aleatória em torno de zero, o que indica a igualdade entre as variâncias, enquanto que a Figura 5.54 indica a normalidade dos dados, pois os resíduos estão distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta. Pode-se concluir, portanto pela adequação do modelo de Irregularidade Longitudinal IRI_{BA} obtido.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MODELOS DE DESEMPENHO

Este capítulo apresenta uma análise dos efeitos dos fatores sobre o desempenho dos pavimentos em CBUQ e TSD da malha rodoviária do Estado da Bahia e um estudo comparativo dos modelos de desempenho desenvolvidos neste trabalho com modelos de desempenho empíricos, utilizados em programas de gerência de pavimentos por organismos rodoviários do Brasil e do exterior, e com modelos de desempenho desenvolvidos por outros pesquisadores brasileiros ou com dados coletados no Brasil.

Os efeitos dos fatores (Idade, Tráfego e Pluviometria) são analisados com base nos resultados da Análise Exploratória de Dados e nos resultados da Análise de Variância. Também foram desenvolvidos gráficos em três dimensões, com os quais é possível analisar o comportamento da variável resposta em função da variação de dois fatores simultaneamente.

O estudo comparativo entre os modelos desenvolvidos e os já existentes é feito através da avaliação do ajuste dos valores previstos pelos mesmos aos valores observados em campo, tendo como base a sua evolução ao longo do tempo.

6.1 ANÁLISE DOS EFEITOS DOS FATORES

Na Análise da Variância (ANOVA), os efeitos dos fatores sobre a variável dependente são avaliados com base no teste F . Se $F_{\text{observado}}$ for maior que o $F_{\text{crítico}}$, para um dado nível de significância α (5% utilizado neste trabalho - $F_{\text{crítico}} = 5,32$), então a hipótese nula é rejeitada. Neste caso, existe a probabilidade de 5% de se cometer um erro.

Na Análise Exploratória de Dados (AED) os efeitos dos fatores são avaliados com base na utilização de técnicas gráficas, que se diferenciam no foco e na sensibilidade. A conclusão sobre a importância (ou não) dos efeitos dos fatores é baseada na redundância das conclusões obtidas pelas técnicas gráficas. As Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam um resumo comparativo entre os resultados obtidos pela Análise da Variância (ANOVA) e pela Análise Exploratória de Dados (AED).

Tabela 6.1 – Resumo comparativo entre os resultados da ANOVA e da AED para os efeitos dos fatores sobre as variáveis ICPF e A_{TT}

Fatores	ICPF				A _{TT}			
	ANOVA		AED		ANOVA		AED	
	Significância		Importância		Significância		Importância	
	F ₀	SIM/NÃO	E	SIM/NÃO	F ₀	SIM/NÃO	E	SIM/NÃO
ID	12,91	SIM	-0,77	SIM	21,27	SIM	25,54	SIM
TA	28,42	SIM	-1,14	SIM	26,74	SIM	28,63	SIM
PL	6,64	SIM	-0,55	SIM	1,69	NÃO	-7,20	NÃO
ID*TA	1,51	NÃO	0,26	NÃO	0,88	NÃO	5,18	NÃO
ID*PL	0,67	NÃO	0,18	NÃO	2,08	NÃO	-7,99	NÃO
TA*PL	0,01	NÃO	0,02	NÃO	5,76	SIM	13,29	SIM
ID*TA*PL	1,92	NÃO	-0,30	NÃO	11,04	SIM	18,40	SIM

Tabela 6.2 – Resumo comparativo entre os resultados da ANOVA e da AED para os efeitos dos fatores sobre as variáveis A_{DESG} e IRI_{BA}

Fatores	A _{DESG}				IRI _{BA}			
	ANOVA		AED		ANOVA		AED	
	Significância		Importância		Significância		Importância	
	F ₀	SIM/NÃO	E	SIM/NÃO	F ₀	SIM/NÃO	E	SIM/NÃO
ID	25,59	SIM	26,11	SIM	47,12	SIM	1,14	SIM
TA	14,08	SIM	19,37	SIM	107,95	SIM	1,73	SIM
PL	1,18	NÃO	5,61	NÃO	21,32	SIM	0,77	SIM
ID*TA	5,32	SIM	11,91	SIM	4,23	NÃO	0,34	NÃO
ID*PL	0,00	NÃO	-0,13	NÃO	4,38	NÃO	0,35	NÃO
TA*PL	0,50	NÃO	3,66	NÃO	9,01	SIM	0,50	SIM
ID*TA*PL	1,66	NÃO	6,65	NÃO	2,53	NÃO	0,26	NÃO

Tabela 6.3 – Resumo comparativo entre os resultados da ANOVA e da AED para os efeitos dos fatores sobre a variável IRI (clima semiárido a seco e clima subúmido a úmido)

Fatores	IRI _{BA_s} (semiárido a seco)				IRI _{BA_u} (subúmido a úmido)			
	ANOVA		AED		ANOVA		AED	
	Significância		Importância		Significância		Importância	
	F ₀	SIM/NÃO	E	SIM/NÃO	F ₀	SIM/NÃO	E	SIM/NÃO
ID	30,18	SIM	0,79	SIM	24,72	SIM	1,49	SIM
TA	72,34	SIM	1,23	SIM	55,26	SIM	2,22	SIM
ID*TA	0,29	NÃO	0,08	NÃO	4,10	NÃO	0,61	NÃO

Pela observação das Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 pode-se notar que os resultados da AED confirmam os resultados encontrados pela aplicação da ANOVA, sobre os efeitos das variáveis independentes Idade, Tráfego e Pluviometria e suas interações.

Os efeitos da Idade do pavimento e do Tráfego mostraram-se significativos e importantes para todas as variáveis dependentes, tanto para os pavimentos em CBUQ, quanto em TSD. O Tráfego apresentou o efeito mais significativo e importante, à exceção da variável

dependente A_{Desg} , que teve como efeito mais significativo e importante a Idade do Pavimento. Dentre os efeitos principais, a Pluviometria apresentou-se significativo e importante apenas para as variáveis dependentes ICPF e IRI.

O efeito da interação entre a Idade do pavimento e o Tráfego mostrou-se significativo e importante apenas para a variável dependente A_{Desg} . O efeito da interação entre o Tráfego e a pluviometria mostrou-se significativo e importante para as variáveis A_{TT} e IRI. O efeito da interação entre as três variáveis independentes mostrou-se significativo e importante apenas para a variável A_{TT} e a interação entre a Idade do pavimento e a Pluviometria não se mostrou significativa e importante para nenhuma variável dependente em estudo.

6.1.1 Análise dos efeitos dos fatores ID, TA e PL no comportamento dos modelos

Os efeitos dos fatores também foram avaliados em função da sua influência no comportamento dos modelos em gráficos em três dimensões, com os quais é possível analisar a resposta da variável dependente em função da variação de dois fatores simultaneamente. No eixo z é plotado a variável dependente e nos eixos x e y são plotados os pares de conjuntos de fatores ID e TA, ID e PL e TA e PL respectivamente, isto para os modelos desenvolvidos com três fatores.

Os gráficos são desenvolvidos para os modelos das equações 5.24 a 5.29. A utilização de dois fatores na construção dos gráficos implica na consideração de que o terceiro fator é constante e igual a zero. Desta forma é possível avaliar o comportamento de duas variáveis independentes, de forma simultânea, quando da sua variação do nível inferior (-1), para o nível superior (+1).

6.1.1.1 Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF)

As figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram os efeitos dos fatores Idade, Tráfego e Pluviometria sobre o Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF), com base no modelo da equação 5.24. Pela análise da figura 6.1 pode-se observar que o ICPF aumenta quando os fatores Idade e Tráfego mudam do nível superior (+1) para o nível inferior (-1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o da Idade do pavimento (maior inclinação no eixo y , no plano).

Figura 6.1 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre o ICPF

Analisando-se a figura 6.2 pode-se observar que o ICPF aumenta quando os fatores Idade e Pluviometria mudam do nível superior (+1) para o nível inferior (-1), sendo o efeito da Idade maior que o efeito da Pluviometria (maior inclinação no eixo x, no plano).

Figura 6.2 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre o ICPF

A figura 6.3 mostra que o ICPF aumenta quando os fatores Tráfego e Pluviometria mudam do nível superior (+1) para o nível inferior (-1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o efeito da Pluviometria (maior inclinação no eixo x, no plano).

Figura 6.3 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre o ICPF

6.1.1.2 Área Total de Trincas (A_{TT})

As figuras 6.4, 6.5 e 6.6 mostram os efeitos dos fatores Idade, Tráfego e Pluviometria sobre a Área Total de Trincas (A_{TT}), com base no modelo da equação 5.25. A figura 6.4 mostra que a A_{TT} aumenta quando os fatores Idade e Tráfego mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o efeito da Idade do pavimento.

Figura 6.4 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a A_{TT}

Analisando-se a figura 6.5 pode-se observar que a A_{TT} aumenta quando a Idade muda do nível inferior (-1) para o nível superior (+1). Entretanto, a A_{TT} mantém-se constante com variação da Pluviometria, o que significa que o efeito principal da Pluviometria não tem efeito sobre o modelo.

Figura 6.5 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre a A_{TT}

A figura 6.6 mostra que a A_{TT} aumenta quando o Tráfego muda do nível inferior (-1) para o nível superior (+1). Muito embora não haja influência do efeito principal da Pluviometria no modelo, a variação no eixo y indica o efeito da pluviometria na interação $TA*PL$.

Figura 6.6 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre a A_{TT}

6.1.1.3 Área de Desgaste (A_{Desg})

As figuras 6.7, 6.8 e 6.9 mostram os efeitos dos fatores Idade, Tráfego e Pluviometria sobre a área de desgaste (%) (A_{Desg}), com base no modelo da equação 5.26. Pela análise da

figura 6.7 pode-se observar que a A_{Desg} aumenta quando os fatores Idade e Tráfego mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo o efeito da Idade do pavimento maior do que o efeito do Tráfego.

Figura 6.7 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a A_{Desg}

Figura 6.8 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre a A_{Desg}

Analisando-se a figura 6.8 pode-se observar que a A_{Desg} aumenta quando a Idade muda do nível inferior (-1) para o nível superior (+1). De maneira semelhante, a Figura 6.9 mostra que a A_{Desg} aumenta quando o tráfego muda do nível inferior (-1) para o nível superior (+1). Entretanto, em ambos os casos, a A_{Desg} mantêm-se constante para a variável Pluviometria, o que significa que o efeito principal da pluviometria não tem efeito sobre o modelo.

Figura 6.9 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre a A_{DESG}

6.1.1.4 Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})

As Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 mostram os efeitos dos fatores Idade, Tráfego e Pluviometria sobre a Irregularidade Longitudinal (IRI), com base no modelo da equação 5.27. A Figura 6.10 mostra que a Irregularidade Longitudinal aumenta quando os fatores Idade e Tráfego mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o efeito da Idade do pavimento.

Analisando-se a Figura 6.11 pode-se observar que a Irregularidade Longitudinal aumenta quando os fatores Idade e Pluviometria mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito da Idade do pavimento do que o efeito da Pluviometria.

Figura 6.10 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal IRI_{BA}

Figura 6.11 – Efeitos dos fatores Idade e Pluviometria sobre a Irregularidade Longitudinal IRI_{BA}

A figura 6.12 mostra que a Irregularidade Longitudinal aumenta quando os fatores Tráfego e Pluviometria mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o efeito da Pluviometria.

Figura 6.12 – Efeitos dos fatores Tráfego e Pluviometria sobre a Irregularidade Longitudinal IRI_{BA}

6.1.1.5 Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_s}) clima semiárido a seco

A Figura 6.13, mostra os efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_s}) para o clima semiárido a seco, com base no modelo da equação 5.28. Pela análise da Figura 6.13 pode-se observar que a Irregularidade Longitudinal, para o clima semiárido a seco, aumenta quando os fatores Idade e Tráfego mudam do nível inferior (-1)

para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o efeito da Idade do pavimento.

Figura 6.13 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco

6.1.1.6 Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) clima subúmido a úmido

A Figura 6.14, mostra os efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) para o clima subúmido a úmido, com base no modelo da equação 5.29. Pela análise da Figura 6.14 pode-se observar que a Irregularidade Longitudinal, para o clima subúmido a úmido, aumenta quando os fatores Idade e Tráfego mudam do nível inferior (-1) para o nível superior (+1), sendo maior o efeito do Tráfego do que o efeito da Idade do Pavimento.

Figura 6.14 – Efeitos dos fatores Idade e Tráfego sobre a Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido

6.2 ANÁLISE COMPARATIVA COM MODELOS DE DESEMPENHO EXISTENTES

Os modelos desenvolvidos neste trabalho foram comparados com modelos desenvolvidos para outras redes rodoviárias, no Brasil e no exterior, mediante a utilização de dados dos trechos considerados para validação dos modelos desenvolvidos.

Os modelos de desempenho utilizados nas análises comparativas foram os de Área de trincamento (A_{TT}), para trechos em CBUQ, e os de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA} , IRI_{BAS} e IRI_{BAu}), para os trechos em TSD. Os modelos desenvolvidos para o ICPF, para trechos em CBUQ, e para a Área de Desgaste (A_{Desg}), para os trechos em TSD, não foram encontrados dentre os desenvolvidos nas principais pesquisas realizadas, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

6.2.1 Modelo de desempenho para a Área Total de Trincas (ATT) para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Os resultados previstos da variável resposta A_{TT} , para os trechos em CBUQ sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004, calculados pela equação 5.25, foram comparados com os resultados obtidos pela equação A.39, do ANEXO A, desenvolvida por Marcon (1996). Os resultados são apresentados na tabela 6.4. Os valores da área total de trincas foram em função da Idade dos pavimentos e as retas de ajuste para os modelos são apresentadas na Figura 6.15.

$$A_{TT} = 40,1 + 12,7P(ID) + 14,3P(TA) + 6,6P(TA)P(PL) + 9,2P(ID)P(TA)P(PL) \quad (5.25)$$

$$R^2 = 0,83$$

$$ATR = 1,5124 \times IDADE - 6,8923 \quad (A.39)$$

$$R^2 = 0,32$$

A Figura 6.15 mostra que as inclinações das retas do modelo para previsão da A_{TT} e do modelo desenvolvido por Marcon (1996), que apenas considera o fator Idade, são aproximadamente iguais, o que indica uma tendência de evolução da Área Total de Trincas semelhante ao longo do tempo. Também é possível observar um melhor resultado do modelo desenvolvido neste trabalho, devido ao melhor ajuste aos dados observados, que também apresentou melhor correlação ($r = 0,69$).

Tabela 6.4 – Valores observados e os previstos pelos modelos de desempenho de A_{TT} e de Marcon (1996)

Código do DERBA	A_{TT} (%) (observado)	Idade (anos)	Tráfego (N)	Pluviometria (mm/ano)	A_{TT} (%) (previsto)	
					Modelo	Marcon
001EBA0185	5,00	21,00	7,04E+05	1025	26,36	24,87
120EBA0125	75,00	27,00	2,77E+05	686	32,72	33,94
130EBA0235	30,00	23,00	3,62E+06	508	39,65	27,89
220EBA0065	30,00	36,00	4,82E+05	585	45,52	47,55
233EBA0095	20,00	10,00	1,23E+06	686	15,98	8,23
262EBA0125	45,00	25,00	3,87E+06	496	42,22	30,92
262EBA0135	30,00	25,00	3,87E+06	496	42,22	30,92
262EBA0135	75,00	25,00	3,87E+06	496	42,22	30,92
270EBA0025	33,33	22,00	7,22E+05	1377	26,80	26,38
270EBA0030	30,00	22,00	7,22E+05	1377	26,80	26,38
274EBA0005	5,00	29,00	8,28E+05	1377	33,44	36,97
275EBA0025	32,67	29,00	2,61E+05	1025	32,88	36,97
499EBA0020	75,00	29,00	7,75E+05	686	36,79	36,97
512EBA0015	78,00	40,00	4,71E+06	1184	65,22	53,60
535EBA0005	57,50	29,00	4,17E+06	1184	49,85	36,97
535EBA0020	65,00	29,00	4,17E+06	1184	49,85	36,97
AREMBEPE	75,00	29,00	4,17E+06	1184	49,85	36,97
PRAIA DO FORTE	60,00	29,00	4,17E+06	1184	49,85	36,97
P. DE SAUÍPE	62,00	29,00	4,17E+06	1184	49,85	36,97
SÃO F. DO CONDE	65,00	29,00	4,17E+06	1934	53,45	36,97

Figura 6.15 – Análise comparativa do modelo de desempenho de A_{TT} com modelo de Marcon (1996)

6.2.2 Modelos de desempenho para a Irregularidade Longitudinal para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Os modelos de Irregularidade Longitudinal desenvolvidos nesta pesquisa (equações 5.27, 5.28 e 5.29) foram comparados com modelos desenvolvidos por Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007), representados respectivamente, pelas equações A.37, A.50 e A.81, do ANEXO A.

$$QI = 18,318 + 1,1635 \times IDADE \quad (A.37)$$

$$R^2 = 0,29$$

$$IRI = 2,8 + 0,38I + 0,31N - 0,16SNC + 0,09I \times N - 0,08I \times SNC \quad (A.50)$$

$$R^2 = 0,75$$

$$IRI = 3,331663 + \exp(-0,69160 - 0,18754C - 1,15811S + 0,837915N) \quad (A.81)$$

$$R^2 = 0,80$$

Apesar de os modelos de Marcon (1996) e Yshiba (2003) terem sido desenvolvidos para trechos em CBUQ e o modelo de Yshiba (1996) considerar a variável independente número estrutural corrigido do pavimento (SNC), que não foi considerada nos modelos desenvolvidos nesta pesquisa, resolveu-se compará-los da mesma forma, para verificar se existe uma tendência semelhante de deterioração entre os pavimentos construídos em CBUQ e os construídos em TSD. O modelo de Albuquerque (2007) foi desenvolvido para trechos em TSD e também considera a variável independente SNC.

Para aplicação do modelo de Marcon (1996), os valores de Irregularidade Longitudinal, em QI (contagens/km), foram transformados em IRI (m/km), com a utilização da Equação 2.7.

$$IRI = \frac{QI}{13} \quad (2.7)$$

O número estrutural corrigido do pavimento (SNC), que representa a capacidade estrutural dos trechos, foi determinado pela aplicação da Equação 6.1, que leva em conta a resistência do subleito, conforme apresentado por Queiroz (1981).

$$SNC = SN + 3,51 \log CBR - 0,85 \log (CBR)^2 - 1,43 \quad (6.1)$$

em que: SN: número estrutural;
CBR: Índice de Suporte Califórnia do subleito.

O número estrutural (SN) segue o conceito desenvolvido na pista experimental da AASHO (AASHTO, 1986), sendo definido por uma relação empírica em que a espessura h_i e o coeficiente estrutural a_i de cada camada do pavimento são combinados e somados:

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i h_i \quad (6.2)$$

em que: a_i : coeficiente estrutural da camada i ;
 h_i : espessura da camada i , em pol.

Os coeficientes estruturais das camadas foram adotados de acordo com o apresentado nos estudos desenvolvidos por QUEIROZ (1981) e que estão no Procedimento do DNER PRO 159/85. Os valores dos coeficientes estruturais a_i dos materiais das camadas de pavimentos, utilizados neste trabalho, são:

a) revestimento em tratamento superficial:

$$a_1 = 0,10$$

b) camadas de base granular:

$$a_2 = (29,14 CBR - 0,1977 CBR^2 + 0,00045 CBR^3) \times 10^{-4} \quad (6.3)$$

em que: CBR: Índice de Suporte Califórnia da camada de base granular.

c) camadas de sub-base granular:

$$a_3 = 0,01 + 0,065 \log CBR \quad (6.4)$$

em que: CBR: Índice de Suporte Califórnia da camada de sub-base granular.

Para o cálculo do SNC dos trechos utilizados na validação dos modelos foram solicitadas ao DERBA informações referentes às espessuras e ao CBR das camadas dos pavimentos, cujos valores são apresentados no ANEXO F, Tabela F.1. Os valores do número estrutural corrigido (SNC), calculados para os trechos de validação dos modelos de Irregularidade Longitudinal, são apresentados na Tabela 6.5.

Modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})

Os resultados previstos da variável resposta Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}), para os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004, calculados pela equação 5.27, foram comparados com os resultados obtidos pelas equações A.37, A.50 e A.81 (Tabela 6.5), desenvolvidas respectivamente por Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007). Os valores previstos da Irregularidade Longitudinal (IRI) foram plotados em função da Idade dos pavimentos (Figura 6.16).

Tabela 6.5 – Valores observados e previstos da Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})

Nº	Código do DERBA	IRI (m/km) (observado)	Idade	SNC	IRI (m/km) (previsto)			
					IRI_{BA}	Marcon	Ishiba	Albuquerque
1	161EBA0065	3,43	20,00	2,71	3,84	3,20	3,55	3,59
2	161EBA0065	3,37	20,00	2,81	3,84	3,20	3,54	3,58
3	030BBA0250	3,60	24,00	2,52	4,14	3,56	4,04	3,69
4	030BBA0250	4,11	24,00	2,52	4,14	3,56	4,04	3,69
5	148EBA0125	4,86	14,00	2,30	4,21	2,66	3,98	4,22
6	148EBA0130	4,71	20,00	2,52	4,62	3,20	4,78	4,31
7	148EBA0140	5,01	20,00	2,52	4,62	3,20	4,78	4,31
8	122BBA0500-2	5,41	34,00	2,98	5,14	4,45	6,00	3,98
9	026EBA0150	5,02	23,00	2,68	4,61	3,47	4,84	4,05
10	650EBA0020	4,20	11,00	2,54	3,63	2,39	2,96	3,62
11	884EBA0005	4,82	14,00	2,52	3,97	2,66	3,40	3,72
12	120EBA0050	4,29	24,00	2,12	4,46	3,56	4,09	3,82
13	120EBA0050	4,01	24,00	2,70	4,46	3,56	4,01	3,65
14	262EBA0115	4,29	14,00	2,10	4,41	2,66	4,05	4,43
15	262EBA0115	4,88	14,00	2,10	4,41	2,66	4,05	4,43
16	409EBA0015	5,86	31,00	2,46	6,13	4,18	6,64	5,10
17	409EBA0015	6,15	31,00	2,57	6,13	4,18	6,62	4,96
18	410BBA0010-2	5,00	34,00	1,69	5,39	4,45	6,40	5,21

Pela análise da Figura 6.16 pode-se concluir que o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados observados de Irregularidade Longitudinal foi o desenvolvido neste trabalho ($r = 0,83$). Observa-se, também, que a inclinação da reta do modelo desenvolvido neste trabalho é similar à da reta do modelo desenvolvido por Marcon (1996), que apenas considera o fator Idade, o que indica uma tendência de taxa de deterioração semelhante ao longo do tempo.

Figura 6.16 – Análise comparativa entre os modelos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA})

O modelo de Yshiba (2003), que considera além da Idade e o Tráfego, o número estrutural corrigido (SNC), apresentou uma maior taxa de progressão de Irregularidade Longitudinal, enquanto que o modelo de Albuquerque (2007), que considera o Tráfego, o número estrutural corrigido (SNC) e uma variável climática, apresentou uma taxa de progressão de Irregularidade Longitudinal menor.

Modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_s}) para clima semiárido a seco

Os resultados previstos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA_s}), para o clima semiárido a seco, considerando os trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004, calculados pela equação 5.28, foram comparados com os resultados obtidos pelas equações A.37, A.50 e A.81 (Tabela 6.6). Os valores previstos de Irregularidade Longitudinal para o clima semiárido a seco foram plotados em função da Idade dos pavimentos (Figura 6.17).

Tabela 6.6 – Valores observados e previstos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAS}) para o clima semiárido a seco

Código do DERBA	IRI (m/km) (observado)	Idade	SNC	IRI (m/km) (previsto)			
				IRI_{BAS}	Marcon	Yshiba	Albuquerque
161EBA0065	3,43	20,00	2,71	3,72	3,20	3,55	3,59
161EBA0065	3,37	20,00	2,81	3,72	3,20	3,54	3,58
030BBA0250	3,60	24,00	2,52	3,98	3,56	4,04	3,69
030BBA0252	4,11	24,00	2,52	3,98	3,56	4,04	3,69
148EBA0125	4,86	14,00	2,30	4,03	2,66	3,98	4,22
148EBA0130	4,71	20,00	2,52	4,41	3,20	4,78	4,31
148EBA0140	5,01	20,00	2,52	4,41	3,20	4,78	4,31
122BBA0500-2	5,41	34,00	2,98	4,88	4,45	6,00	3,98
026EBA0150	5,02	23,00	2,68	4,40	3,47	4,84	4,05

Figura 6.17– Análise comparativa do modelo de desempenho de IRI_{BAS} , para o clima semiárido a seco com os modelos de Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007)

A Figura 6.17 mostra que o modelo de Marcon (1996) e o modelo de Yshiba (2003) apresentam taxa de deterioração maior do que a do modelo de Irregularidade Longitudinal desenvolvido neste trabalho para a região de clima semiárido a seco.

O modelo de Albuquerque (2007) apresentou uma taxa de deterioração inversa a do modelo de Irregularidade Longitudinal desenvolvido para a região de clima semiárido a seco e

às dos modelos de Marcon (1996) e Yshiba (2003). O modelo desenvolvido neste trabalho apresentou bom ajuste aos dados observados de Irregularidade Longitudinal para a região de clima semiárido a seco, com $r = 0,90$.

Modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) para clima subúmido a úmido

Os resultados previstos da variável resposta Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}), para o clima subúmido a úmido, considerando trechos em TSD sem atividades de manutenção e reabilitação até 2004, calculados pela equação 5.29, foram comparados com os resultados obtidos pelas equações A.37, A.50 e A.81 (Tabela 6.7). Os valores previstos de Irregularidade Longitudinal para o clima subúmido a úmido foram plotados em função da Idade dos pavimentos (Figura 6.18).

Tabela 6.7 – Valores observados e previstos de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) para o clima subúmido a úmido

<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km) (observado)</i>	<i>Idade</i>	<i>SNC</i>	<i>IRI (m/km) (previsto)</i>			
				IRI_{BAu}	Marcon	Yshiba	Albuquerque
650EBA0020	4,20	11,00	2,54	3,81	2,39	2,96	3,68
884EBA0005	4,82	14,00	2,52	4,16	2,66	3,40	3,81
120EBA0050	4,29	24,00	2,12	4,52	3,56	4,09	3,92
120EBA0050	4,01	24,00	2,70	4,52	3,56	4,01	3,71
262EBA0110	4,29	14,00	2,10	4,75	2,66	4,05	4,66
262EBA0115	4,88	14,00	2,10	4,75	2,66	4,05	4,66
409EBA0015	5,86	31,00	2,46	6,08	4,18	6,64	5,47
409EBA0015	6,15	31,00	2,57	6,08	4,18	6,62	5,30
410BBA0010-1	5,00	34,00	1,69	5,79	4,45	6,40	5,60

Pela análise da Figura 6.18 nota-se que as inclinações das retas do modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) desenvolvido neste trabalho para a região de clima subúmido a úmido e do modelo desenvolvido por Marcon (1996) mostraram tendência de taxa de deterioração semelhante ao longo do tempo, sendo menores do que a taxa de progressão de deterioração do modelo desenvolvido por Yshiba (2003).

O modelo de Albuquerque (2007) apresentou uma taxa de progressão de deterioração menor do que a do modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BAu}) desenvolvido neste trabalho para a região de clima subúmido a úmido, que apresentou melhor ajuste aos dados observados de Irregularidade Longitudinal ($r = 0,84$).

Figura 6.18 – Análise comparativa do modelo de desempenho do IRI_{BAu} para o clima subúmido a úmido com os modelos de Marcon (1996), Yshiba (2003) e Albuquerque (2007)

6.2.3 Análise comparativa com estudo realizado pelo DERBA

O banco de dados de rodovias do DERBA (2004), utilizado neste trabalho, faz parte dos estudos desenvolvidos pela equipe técnica do Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia – DERBA, cujo objetivo era dar subsídios técnicos e econômicos para o planejamento de obras de reabilitação e serviços de manutenção nas rodovias estaduais, através de contratos do tipo CREMA do Banco Mundial (BIRD) (DERBA, 2005).

Como parte desse estudo foi desenvolvida a equação 6.5, para o cálculo da Irregularidade Longitudinal, com base em avaliação de 545 km de rodovias pavimentadas de pista simples, no sentido predominante de tráfego, em intervalos integrados a cada 200 m.

$$IRI = 2,0 + 0,217104 \cdot IES + 0,61216 |ICPF - 5| \quad (6.5)$$

$$R^2 = 0,55$$

em que: IRI: Irregularidade longitudinal em m/km;

IES: Índice de Estado de Superfície;

ICPF: Índice de Condição do Pavimento Flexível.

A definição dos segmentos levantados foi realizada com base em gráficos estatísticos de trincamento, IES, IGGE e ICPF da malha total em análise e de cada residência de conservação separadamente, a fim de se obter a residência mais representativa da malha. Através dessa comparação entre os gráficos, o estudo concluiu que a residência cujos pavimentos mais se assemelhavam à malha como um todo era a residência do município de Jequié (DERBA, 2005). Os dados de Irregularidade Longitudinal foram coletados na residência do município de Jequié e abrangeram pavimentos em TSD, TSS, TCP, CBUQ, AF e CA, tinham eles sofrido ou não atividades de manutenção e reabilitação.

O modelo de Irregularidade Longitudinal desenvolvido neste trabalho, para a rede pavimentada em TSD da malha viária da Bahia (IRI_{BA} - Equação 5.27), foi comparado com a equação desenvolvida no estudo do DERBA (2005) (Equação 6.5). Primeiro foram calculados os valores previstos para a Irregularidade Longitudinal, para os trechos utilizados para a validação do modelo desenvolvido nessa pesquisa, e os resultados são apresentados na Tabela 6.8. Os valores previstos de Irregularidade Longitudinal foram plotados em função da Idade dos pavimentos (Figura 6.19).

Tabela 6.8 – Valores de Irregularidade Longitudinal, observados e previstos pelas equações 5.27 e 6.5, para os dados de levantamentos realizados nesta pesquisa

<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km) (observado)</i>	<i>IRI_{BA} (m/km)</i>	<i>IES</i>	<i>ICPF</i>	<i>IRI DERBA (2005)</i>
161EBA0065	3,43	3,63	4,00	3,00	4,09
161EBA0065	3,37	3,63	1,00	1,00	4,67
030BBA0250	3,60	3,92	1,00	3,00	3,44
030BBA0250	4,11	3,92	2,00	3,00	3,66
148EBA0125	4,86	3,68	4,00	4,00	3,48
148EBA0130	4,71	4,28	0,76	3,80	2,90
148EBA0140	5,01	4,28	0,75	3,40	3,14
122BBA0500-2	5,41	5,23	1,40	3,50	3,22
026EBA0150	5,02	4,32	0,00	4,00	2,61
650EBA0020	4,20	3,69	2,80	2,70	4,02
884EBA0005	4,82	3,69	1,14	3,50	3,17
120EBA0050	4,29	4,23	1,44	3,30	3,35
120EBA0050	4,01	4,23	1,00	3,10	3,38
262EBA0115	4,29	4,07	0,60	4,00	2,74
262EBA0115	4,88	3,98	0,63	3,50	3,06
409EBA0015	5,86	5,80	5,00	1,70	5,11
409EBA0015	6,15	5,80	1,00	3,00	3,44
410BBA0010-2	5,00	5,30	1,00	2,80	3,56

Figura 6.19 – Análise comparativa do modelo para previsão do IRI_{BA} e a Equação 6.5 desenvolvida no estudo do DERBA (2005), para os trechos coletados nesta pesquisa

Pela análise da Figura 6.19 pode-se concluir que o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados observados de Irregularidade Longitudinal foi o desenvolvido neste trabalho ($r = 0,80$). Também, pode-se observar que as inclinações das retas do modelo de Irregularidade Longitudinal e da equação desenvolvida no estudo do DERBA (2005), que considera o IES e o ICPF como variáveis independentes, apresentam diferentes tendências de taxas e deterioração ao longo do tempo.

Em seguida, os valores previstos de Irregularidade Longitudinal foram calculados para os trechos em TSD utilizados no desenvolvimento da Equação 6.5 no estudo do DERBA (2005) (Tabela 6.9), apresentados na tabela 5.6 e na figura 5.23. Os valores previstos de Irregularidade Longitudinal foram plotados em função da Idade dos pavimentos (Figura 6.20).

Tabela 6.9 – Valores de Irregularidade Longitudinal, observados e previstos pelas equações 5.27 e 6.5, para os dados de levantamentos realizados na pesquisa DERBA (2005)

<i>Código do DERBA</i>	<i>IRI (m/km) (observado)</i>	<i>IRI_{BA} (m/km)</i>	<i>IES</i>	<i>ICPF</i>	<i>IRI (DERBA)</i>
030BBA0382-2	3,68	4,05	2,06	3,59	3,31
084EBA0020	5,12	4,87	5,00	2,00	4,92
120EBA0215	3,66	3,96	8,00	0,50	6,49
120EBA0240	4,60	3,96	1,00	3,00	3,75
547EBA0005	5,13	3,87	0,00	4,41	2,36
650EBA0020	3,37	3,29	2,80	2,65	4,35
652EBA0020	3,75	3,47	1,20	2,10	4,04

Figura 6.20– Análise comparativa do modelo para previsão do IRI_{BA} e a Equação 6.5, para dados de levantamentos realizados na pesquisa DERBA (2005)

Pela análise da Figura 6.20 pode-se concluir que o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados observados de Irregularidade Longitudinal foi o desenvolvido neste trabalho ($r = 0,66$). Deve-se destacar que, as inclinações das retas do modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}) e da Equação 6.5 desenvolvida no estudo do DERBA (2005) apresentam tendências inversas de taxa de deterioração ao longo do tempo.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Nesta tese de doutorado foram desenvolvidos modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos considerando dados da malha rodoviária do Estado da Bahia disponíveis no banco de dados de gerência de rodovias do DERBA, coletados em 2004, e dados complementares de irregularidade longitudinal coletados em 2009, após o desenvolvimento de um planejamento fatorial específico para essa finalidade.

As variáveis dependentes e independentes foram escolhidas com base na disponibilidade de informações no banco de dados de rodovias do DERBA e, também, de acordo com o apresentado na revisão bibliográfica, que analisou os principais estudos desenvolvidos no Brasil e no exterior. Foram levados em consideração critérios que permitiram estruturar o gerenciamento de informações, de forma a atender as necessidades da pesquisa, que teve por objetivo o desenvolvimento de modelos de desempenho visando a sua utilização em gerência de pavimentos em nível de rede.

O planejamento fatorial foi útil para o arranjo dos dados disponíveis, em matrizes fatoriais, para análise estatística e verificação do efeito dos fatores Idade do pavimento, Tráfego, Pluviometria e suas interações, nas variáveis Índice de Condição do Pavimento Flexível e Área Total de Trincas, para os trechos em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), e nas variáveis Área de Desgaste e Irregularidade Longitudinal, para os trechos em tratamento superficial duplo (TSD), ambos sem atividades de manutenção e reabilitação até o ano de 2004.

Foram utilizadas duas formas de análise estatística dos dados para avaliar a significância dos fatores e definir os parâmetros dos modelos de desempenho, a Análise Exploratória de Dados (AED) e a Análise da Variância (ANOVA). A primeira mostrou-se simples e eficaz na determinação dos efeitos dos fatores e suas interações, tratando-se de uma técnica de apresentação de dados em gráficos com interpretação visual, cujos resultados corroboraram os resultados obtidos através da Análise de Variância, tanto em relação aos efeitos dos fatores como das interações.

Os modelos de desempenho do Índice de Condição de Pavimento Flexível (ICPF) e da Área Total de Trincas (A_{TT}), para os pavimentos em CBUQ, e da Área de Desgaste, para os trechos em TSD, desenvolvidos a partir de informações diretas do banco de dados do DERBA, apresentaram boa correlação e bom ajuste aos dados observados.

Os modelos de desempenho desenvolvidos para a Irregularidade Longitudinal (IRI), considerando trechos em tratamento superficial duplo, apresentaram uma melhor correlação e ajuste aos dados observados, quando comparados aos demais modelos desenvolvidos nesta pesquisa, evidenciando a importância do planejamento para a coleta de dados, o que foi feito com base em fatores que têm efeito direto sobre o desempenho dos pavimentos. No caso das informações sobre as variáveis Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF), Área Total de Trincas (A_{TT}) e a Área de Desgaste (A_{Desg}), houve apenas a aplicação de estatística de experimentos fatoriais a um banco de dados pré-existente.

Os efeitos dos fatores Idade do pavimento, Tráfego e Pluviometria foram avaliados em função da sua influência no comportamento dos modelos de desempenho, através de gráficos em três dimensões, de forma que foi possível analisar a resposta da variável dependente em função da variação de dois fatores simultaneamente. O Tráfego e a Idade do pavimento mostraram-se como os fatores que têm maior influência no comportamento dos modelos de desempenho.

O modelo de desempenho para a Área Total de Trinca (A_{TT}) foi comparado com o modelo desenvolvido por Marcon (1996), que apenas considera o fator Idade, e apresentou melhor resultado, com melhor ajuste aos dados observados e maior correlação. Ambos os modelos apresentaram taxa de evolução da Área Total de Trincas semelhante ao longo do tempo.

Os modelos desenvolvidos para o Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) e para a Área de Desgaste (A_{Desg}), para os trechos em TSD, não foram comparados com outros modelos, pois estes não foram encontrados na revisão bibliográfica. Os modelos de desempenho para a Irregularidade Longitudinal foram comparados com modelos desenvolvidos por Marcon (1996), Ishiba (2003) e Albuquerque (2007) e podem-se tirar as seguintes conclusões:

- O modelo de desempenho de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}) desenvolvido para a malha rodoviária do Estado da Bahia apresentou melhor resultado, com melhor ajuste aos dados observados e maior correlação;
- Quando comparado com o modelo desenvolvido por Marcon (1996), que apenas considera o fator Idade e foi desenvolvido para pavimentos em CBUQ, constatou-se que a inclinação da reta do modelo de desempenho desenvolvido neste trabalho é similar à da reta do modelo desenvolvido por Marcon (1996) e, quando comparado com o modelo de Ishiba (2003), que

considera além da Idade e o Tráfego, o número estrutural corrigido (SNC), apresentou uma maior taxa de progressão de Irregularidade Longitudinal, ao longo do tempo. O modelo de Albuquerque (2007), que considera o Tráfego, o número estrutural corrigido (SNC) e uma variável climática, apresentou uma taxa de progressão de Irregularidade Longitudinal menor do que a do modelo de Irregularidade Longitudinal desenvolvido neste trabalho

- O modelo de Irregularidade Longitudinal desenvolvido para a região de clima subúmido a úmido (IRI_{BAu}) apresentou uma maior taxa de progressão de deterioração, quando comparado com o modelo de Irregularidade Longitudinal desenvolvido para a região de clima semiárido a seco ($IRI_{BA s}$), o que evidencia o efeito da Pluviometria no desempenho dos pavimentos em tratamento superficial duplo da rede de rodovias do Estado da Bahia;
- Os modelos de Irregularidade Longitudinal desenvolvidos por Parterson (1987) não apresentaram boa correlação com os valores observados de Irregularidade Longitudinal e não havia informações sobre as deflexões recuperáveis obtidas com viga Benkelman, para a aplicação do modelo desenvolvido por Queiroz (1981).

Em comparação com os estudos desenvolvidos pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia – DERBA, o modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}) para a rede de rodovias em tratamento superficial duplo desenvolvido nessa pesquisa apresentou melhores resultados. Isso baseia-se no fato de que o modelo de Irregularidade Longitudinal (IRI_{BA}) desenvolvido nesta pesquisa relaciona a Irregularidade Longitudinal às variáveis Idade do pavimento, Tráfego e Pluviometria, que são apontadas, sempre, como causas principais da deterioração dos pavimentos, enquanto que o estudo realizado pelo DERBA (2005) relaciona a Irregularidade Longitudinal às variáveis Índice de Estado de Superfície (IES) e Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF), que são índices obtidos a partir do levantamento de defeitos da superfície dos pavimentos, como panelas, trincas etc. Além disso, o estudo do DERBA não foi desenvolvido para uma família específica de pavimentos.

Para que se obtenham melhores resultados para a previsão do desempenho dos pavimentos da rede de rodovias pavimentadas do Estado da Bahia é necessário que sejam realizados novos levantamentos para alimentação do banco de dados, de forma que se possa melhorar a precisão e acurácia dos modelos desenvolvidos.

Há a necessidade de estudos complementares, que incluam fatores que não puderam ser considerados neste trabalho, como a capacidade estrutural do pavimento e informações relacionadas à drenagem, por exemplo. Para tanto, o método utilizado, baseado no

planejamento fatorial, na Análise Exploratória de Dados e na Análise de Variância, poderá ser repetido, pois se mostrou capaz de definir as quantidades dos dados coletados para a realização do experimento em campo, com redução de custos e sem comprometer a precisão e acurácia dos modelos de desempenho obtidos.

Sugere-se a comparação dos modelos de desempenho desenvolvidos neste trabalho com os modelos de deterioração do HDM-4, por meio da aplicação do banco de dados do DERBA e dos levantamentos complementares de irregularidade longitudinal. É necessário, também, que sejam desenvolvidos fatores de calibração a serem incluídos nos modelos de deterioração do HDM-4, considerando as características da malha rodoviária pavimentada do Estado da Bahia e de forma que possam utilizar os resultados obtidos com os modelos de previsão de desempenho desenvolvidos nesta pesquisa.

Para que se possam determinar fatores de veículos característicos e próprios para o tráfego da malha rodoviária do Estado da Bahia é necessário que sejam desenvolvidos programas de pesagens que contemplem, além de contagens volumétricas e classificatórias, pesagens por eixo dos veículos que transitam nas rodovias estaduais.

Sugere-se o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho subjetivos, com base nas matrizes de probabilidade de transição de Markov, e tendo por referência a experiência e o conhecimento adquirido pelos responsáveis pela gerência dessa rede de rodovias, de maneira que possam ser comparados com os modelos desenvolvidos nessa pesquisa e, eventualmente, utilizados em locais onde não há série histórica de levantamentos da condição dos pavimentos.

São necessários, também, mais incentivos e esforços para o desenvolvimento de modelos empírico-mecanísticos, pois os modelos de deterioração empíricos representam condições restritas de materiais e estruturas, com base nas quais foram desenvolvidos.

Outro fato que não pode ser ignorado é a restrição de recursos para a coleta de dados e informações necessários para o gerenciamento de uma rede de rodovias no Brasil. Por ser um país de grande área territorial e dependente de extensa malha rodoviária, necessita de mudanças no sentido de se incentivar as pesquisas, os investimentos e também a cultura de coleta e manutenção das informações necessárias para o gerenciamento de suas rodovias.

REFERÊNCIAS¹

AASHTO **Guide for Design of Pavement Structures**, Washington, DC, 1986.

ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de gerência de pavimentos para departamentos de estradas do nordeste brasileiro**. 2007. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (1982). ASTM E867-82A – **Standard definition of terms relating to traveled surface characteristics**. In: Annual Book of ASTM Standards Philadelphia, v. 01. 05.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (1997). ASTM E1170–**Standard practices for simulating vehicular response to longitudinal profiles of traveled surfaces**. Philadelphia, USA, 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (1996). ASTM E1777-996 (Reapproved 2002) – **Standard Guide for Prioritization of Data Needs for Pavement Management**. Philadelphia, USA, 09 p.

ARB (1978). **Catálogo dos defeitos dos revestimentos dos pavimentos**. Associação Rodoviária Brasileira. Trad. Por Hugo Alves Pequeno, São Paulo.

BENEVIDES, S. A. S. **Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará**. 2006. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BENNETT, C. R. *Evaluation of high speed transverse profile logger*. In: 4th Internacional Conference on Managing Pavements, South África, 1995

BENNETT, C. R.; PATERSON, W. D. O. **A guide to calibration and adaptation (Highway Development and Management - HDM-4)**. Birmingham, United Kingdom. Highway Development and Management Series, Version 1.0, v.5, 2000. 229p.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006. 501 p.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building**. EUA: John Wiley & Sons, 1978. 653 p.

BURNS, J. C. Roughness and roadway safety. **Transportation Research Record**, Washington, n. 836, p. 08-20, 1981.

¹ De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BUTT, A. A.; SHAHIN, M. Y.; FEIGHAN, K. J.; CARPENTER, H. C. Pavement performance prediction model using Markov process. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1123, p. 12-19, 1987.

CAREY, W. N. & IRICK, P. E. **The Pavement Serviceability – Performance Concepts**. Highway Research Bulletin 250, 1960.

CHANDRAN, S.; ISAAC, K. P.; VEERARAGAVAN, A. Prioritization of low-volume pavement sections for maintenance by using fuzzy logic. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1989, p. 53-60, 2007.

CHONG, C. J.; PHANG, W. N.; IRICK, P. E. **Manual for condition rating of flexible pavement-distress identification**. Ministry of Transportation and Communications of Ontario, 1989.

DARTER, M. I. Requirements for reliable predictive pavement models. **Transportation Research Record**, Washington, n. 766, p. 25-31, 1980.

DERBA – Departamento de Infraestrutura de Transportes da Bahia - Sugestões Técnicas para Implementação do Programa de Restauração e Manutenção Rodoviária– CREMA – DERBA - BIRD -**Volume I a V**. Salvador, Bahia, 2005.

DEWAN, S. A.; SMITH, R. E. Estimating IRI from pavement distress to calculate vehicle operate costs for the cities and counties of San Francisco Bay. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1989, p. 53-60, 2002.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**- DNER-PRO 10-79 – 1979.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - **Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos** - DNER-PRO 159-85 – 1985.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – **Método de nível e mira para a calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta**- DNER-ES 173-86 - 1986.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos** – 2ª Ed. – Rio de Janeiro, 2006. 310p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. **Manual de estudos de tráfego** – Rio de Janeiro, 2006. 384p.

DNIT – 005/2003 – TER. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. Terminologia. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro/ RJ.

DNIT – 006/2003 – PRO. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro/ RJ.

DNIT – 007/2003 – PRO. **Levantamento para a avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para a gerência de pavimentos e estudos e projetos.** Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro/ RJ.

DNIT – 008/2003 – PRO. **Levantamento visual contínuo para a avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.** Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro/ RJ.

DOMINGUES, F. A. A. **Manual para identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos.** São Paulo. LDTT/PTR/USP.

FERNANDES Jr., J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos.** 1994. 293 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

FERNANDES Jr., J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F. **Defeitos e atividades de manutenção e reabilitação em pavimentos asfálticos.** 101 f. (Material de apoio didático) – Gráfica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV.** 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Pesquisa sobre o inter-relacionamento dos custos de construção, conservação e utilização de rodovias.** Brasília – DF, Ministério dos Transportes, 12 v., 1981.

GISLLEPIE, T. D.; SAYERS, M. W.; HAGAN, M. R. **Methodology for road roughness profiling and rut depth measurements.** Ann Arbor: University of Michigan, Transportation Research Institute, 1987. 50p.

GISLLEPIE, T. D.; SAYERS, M. W.; SEGEL, L. **Calibration of response type road roughness measuring system.** National Cooperative Highway Research Program Report 228. Transportation Research Board, 1980.

GUARATNEHUANG, M.; CHAMEU, J. L.; ALTSCHAEFFL, A. G. Introduction to fuzzy sets in pavement evaluation. **Transportation Research Record**, Washington, n. 985, p. 22-24, 1984.

HASS, R.; HUDSON, W. R. **Pavement management systems.** United States of America: McGraw-Hill Book Company, 1978. 457 p.

HASS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern pavement management.** Flórida: Krieger Publishing Company, 1994. 581 p.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design.** New Jersey-USA: Prentice Hall, 1993. 805p.

HUANG, Y. H.; MOORE, R. K. **Roughness level probability prediction using artificial neural networks**. Transportation Research Record, Washington, n. 1592, p. 89-97, 1997.

HUDSON, W. R. *Serviceability performance and design considerations* – HRB – Workshop on structural design of asphalt pavement systems – SR 126 – The University of Texas – Austin – pp. 140-149 – 1971.

HUDSON, W. R. Road roughness: its elements of measurement. **Transportation Research Record**, Washington, n. 836, p. 1-7, 1980.

HVEEM, F.N. e SHERMAN, G.B. - **California Method for the Structural Design of Flexible Pavements** - International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - Ann Arbor - Michigan – 1962.

IBGE – 2007. **Manual técnico de pedologia**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2 ed. Rio de Janeiro/ RJ.

KARAMIHAS, S. M. **Critical profiler accuracy requirements**. University of Michigan, Transportation Research Institute, 2005. 115p.

LEE, Y.; MHOSANI, A.; DARTER, M. Simplified pavement performance models. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1397, p. 7-14, 1993.

LIVNEH, M. Deterioration modeling for unlaid and overlaid pavements. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1524, p. 177-184, 1996.

LYTTON, R. L.; DARTER, M. I.; SHAHIN, M. Y.; RAUHUT, J. B. Interactive State-level pavement monitoring program. **Transportation Research Record**, Washington, n. 846, p. 15-23, 1982.

LYTTON, R. L. Concepts of Pavement Performance Prediction and Modeling. *Proc., 2nd North American Conference on Managing Pavements*, Toronto, Ontário, Canadá, 1987.

MARCON, F. M. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 1996. 398 f. Tese (Doutorado em Infra-estrutura de Transportes) – Centro Técnico aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, 1996.

MARKOV, M. J. Simulating pavement performance under various moisture conditions. **Transportation Research Record**, Washington, n. 849, p. 24-31, 1982.

MEDINA, J. E MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005. 570 p.

NASCIMENTO, D. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis obtidos a partir de análise do banco de dados do LTPP-FHWA. **Programa Nacional de Pesquisa em Transportes**, Recife, p. 1494-1504, 2005.

NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods. Disponível em: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>. Acesso em: 10 abr. 2008.

ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. **Analytical framework and model descriptions (Highway Development and Management - HDM-4)**. Birmingham, United Kingdom. Highway Development and Management Series, Version 1.0, v.4, 2000. 1184p.

PATERSON, W. D. O. **Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management**. Published for the World Bank, Washington, D.C., 1987. 454 p.

PATERSON, W. D. O. A transferable causal model for predicting roughness progression in flexible pavements. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1215, p. 70-84, 1989.

PEDIGO, R. D.; HUDSON, W. R.; ROBERTS, F. L. Pavement performance modeling for pavement management. **Transportation Research Record**, Washington, n. 814, p. 14-21, 1981.

Pesquisa rodoviária 2006: relatório gerencial. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2006. 156 p.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance prediction models for pavement management in Brazil**. Dissertation for Degree of Doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin, Texas, 317 p. 1981.

PREVITERA FILHO, J. *Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1974.

QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de previsão de desempenho para a gestão de pavimentos no Brasil**. Brasília: GEIPOT, 1984. 366 p.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. **The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles**. Ann Arbor: University of Michigan, Transportation Research Institute, 1998. 100p.

SAYERS, M. W., T. D., GILLESPIE, AND W. D. PATERSON. **Guidelines for the Conduct and Calibration of Road Roughness Measurements**. World Bank Technical Paper No. 46, The World Bank, Washington, D.C., 1986.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V. **International experiment to establish correlation and standard calibration methods for road roughness measurements**. World Bank Technical Paper No. 46, The World Bank, Washington, D.C., 1984.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V. The international road roughness experiment. **Transportation Research Record**. Technical Paper 45. The World Bank, Washington, D. C., 1986.

SOUZA, M.L. - **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis** - DNER – 1981.

SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Bahia em números**. Salvador: SEI, 1997.

SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Bahia em números**. Salvador: SEI, 1998.

SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Bahia em números 2006-2008**. Salvador: SEI, edição bilíngüe, v8, 2009.

SHAHIN, M. Y. **Pavement management for airports, roads and parking lots**. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1994. 448 p.

SHAHIN, M. Y.; WALTER, J. A. **Pavement maintenance management for roads and streets using PAVER system**. Construction Engineering Research Laboratory, United States Cospr of Engineers. (Technical Report M-90/05), 280p.

SILVA, B. C. N.; NASCIMENTO, D. M.; PEREIRA, G. C. **Atlas escolar Bahia**. João Pessoa: Grafset, 2000.

SMEATON, W. K.; SENGUPTA, S. S.; HASS, R. Interactive pavement behavior modeling: a clue to the distress-performance problem. **Transportation Research Record**, Washington, n. 766, p. 17-25, 1980.

TREYBIG, H.G. e VON QUINTUS, A. - **Equivalency Factor Analysis and Prediction for Triple Axles** - Report BR-2/1 - Austin Research Engineers – 1976.

Tukey, J., **Exploratory Data Analysis**, Addison-Wesley, 1977.

TURNBULL, W.J.; FOSTER, C.R. e AHLVIN, R.G. - **Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume** - International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - The University of Michigan - Ann Arbor – 1962.

UZAN, J. and LYTTON, R. L. Structural design of flexible pavements: a simple predictive system. **Transportation Research Record**, Washington, n. 888, p. 56-62, 1982.

WANG, K. C. P.; ZANIEWSKI, J.; WAY, G.; DELTON, J. Revision to Arizona Dot Pavement Management System. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1397, p. 68-76, 1993.

WATANADA, T.; PATERSON, W.; BHANDI, A.; HARRAL, C.; DHARESHWAR, A. M.; TSUNOKAWA, K. **The highway design and maintenance standards model. Volume 1. Description of de HDM III model**. Baltimore. The World Bank. John Hopkins University Press, 1987.

WIGHTMAN, D. C.; STANNARD, E. E.; DAKIN, J. M. **HDM-4 – Highway Development & Management**: software user guide, Vol. three. France: PIARC, 2000. 139 p.

YODER, E. J. E WITCZAK, M.W. **Principles of Pavement Design**. United States of America: 2nd edition – John Wiley & Sons, 1975. 711 p.

YSHIBA, J. K. **Modelos de previsão de desempenho: estudos de rodovias do estado do Paraná**. 2003. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ZHANG, Z.; SINGH N.; HUDSON, W. R. Comprehensive ranking index for flexible pavements using fuzzy sets model. **Transportation Research Record**, Washington, n. 1397, p. 96-102, 1993.

ANEXO A – MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO

- Modelos desenvolvidos por Queiroz (1984):

a) Modelos empíricos para a estimativa do quociente de irregularidade (QI) e da evolução do trincamento dos pavimentos (CR):

$$QI = 12,63 - 5,16ER + 3,31TR + 0,393A + 8,66\left(\frac{\log N}{SNC}\right) + 7,17 \times 10^{-5} (\log B \times \log N)^2 \quad R^2=0,52 \quad (A.1)$$

$$CR = -18,53 + 0,04568 \log N + 0,005018B \times A \times \log N \quad R^2=0,64 \quad (A.2)$$

em que: A – idade do pavimento desde a construção ou recapeamento, em anos;

B – deflexão pela viga Benkelman (0,01mm);

ER – variável indicadora do estado de restauração (0 como construído e 1 se recapeado);

N – número equivalente de operações do eixo padrão de 80 kN;

TR – variável indicadora do tipo de revestimento (0 para concreto asfáltico e 1 para tratamento superficial);

SNC – número estrutural corrigido;

B) Modelos empírico-mecanísticos para a estimativa do quociente de irregularidade (QI) e da evolução do trincamento dos pavimentos (CR):

$$\log(QI) = 1,297 + 9,22 \times 10^{-3} A + 9,08 \times 10^{-2} TR - 7,03 \times 10^{-2} ER + 5,57 \times 10^{-4} (SEN1 \times \log N) \quad R^2=0,51 \quad (A.3)$$

$$CR = -8,70 + 0,258 HST1 \times \log N + 1,006 \times 10^{-6} HST1 \times N \quad R^2=0,50 \quad (A.4)$$

em que: QI – quociente de irregularidade, em contagens/km;

$SEN1$ – energia específica de compressão vertical no topo do subleito, em 10^{-4} x kgf.cm;

TR – variável indicadora do tipo de revestimento (0 para concreto asfáltico e 1 para tratamento superficial duplo);

CR – porcentagem de área trincada;

HST – tensão horizontal de tração na face inferior do revestimento, em kgf/cm^2 .

- Modelos desenvolvidos por Paterson (1987):

a) Estimativa do trincamento em pavimentos asfálticos sobre bases granulares:

$$TYCRA = K_{ci} (F_c \times RELIC \times CRT) \quad (A.5)$$

$$TYCRA = K_{ci} (F_c \times RELIA \times CRT) \quad (A.6)$$

$$RELIC = 4,21^{\left(0,14 \times SNC - 17,1 \frac{YE4}{SNC}\right)} \quad (A.7)$$

$$RELIA = 13,2^{\left[-20,7(1+CQ) \frac{YE4}{SNC^2}\right]} \quad (A.8)$$

em que: $RELIC$ – pavimentos de concreto asfáltico sobre bases granulares;

$RELIA$ – pavimentos com tratamentos superficiais sobre bases granulares;

$TYCRA$ – número médio de anos para o aparecimento de trincas;

K_{ci} – fator de deterioração para início do trincamento, calculado pela relação entre a idade esperada do revestimento e a idade prevista pelo modelo HDM – III, para o mesmo volume de tráfego;

F_c – fator de distribuição de ocorrência para início do trincamento, cujos valores recomendados se encontram no modelo HDM – III para diferentes classes de climas;

CRT – tempo estimado de retardamento do início do trincamento devido à realização dos serviços de manutenção, em anos;

$YE4$ – número de operações do eixo equivalente de 80 kN para o ano de análise, calculado pelo método da AASHTO, em milhões por faixa de tráfego;

SNC – número estrutural corrigido;

CQ – indicador qualitativo da construção da camada de revestimento asfáltico, sendo $CQ = 1$ se o revestimento tem falha construtiva, caso contrário, $CQ = 0$.

b) Progressão da área do trincamento da camada de revestimento de concreto asfáltico:

$$\Delta ACRA_d = K_{cp} \times CRP \times Z_a \left[(Z_a \times a_i \times b_i \times \Delta TCRA + SCRA_a)^b \right]^{1/b} - SCRA_a \quad (A.9)$$

$$CRP = 1 - 0,12CRT \quad (A.10)$$

$$\Delta TCRA = (AGE2 - TYCRA) \text{ se } (AGE2 - 1) < TYCRA \leq AGE2 \text{ e } ACRA_a = 0 \quad (A.11)$$

em que: $\Delta ACRA_d$ – mudança prevista na área de trincamento. Durante o ano de análise, devido à deterioração, em porcentagem da área total do revestimento;

K_{ep} – fator de deterioração para progressão do trincamento;

$Z_a = 1$, se $ACRA < 50$ e $Z_a = -1$ caso contrário;

a_i e b_i – coeficientes determinados em função do tipo de revestimento ($a = 1,84$ e $b = 0,45$ para concreto asfáltico);

$\Delta TCRA = 1$ se $TYCRA \leq (AGE2 - 1)$ ou $ACRA_a > 0$;

$AGE2$ – idade do pavimento desde a construção, execução de camada selante, reabilitação ou reconstrução, em anos;

$SCRA_a$ – mínimo ($ACRA_a$, $100 - ACRA_a$);

$SCRA_a$ – máximo ($SCRA_a$ 0,5) se $ACRA_a > 0,5$;

$ACRA_a$ – porcentagem de área de trincamento do pavimento igual a: $ACRA_a = 0$, se $\Delta TCRA = 0$; : $ACRA_a = 0,5$ se $0 < \Delta TCRA < 1$; : $ACRA_a = ACRA$.

c) Estimativa da profundidade média das trilhas de roda:

$$RDM = K_{rp} \frac{39800(YE4 \times 10^{-6})^{ERM}}{(SNC^{0,502})(COMP^{2,3})} \quad (A.12)$$

em que: RDM_a – profundidade média da trilha de roda em ambas as trilhas, em mm;

K_{rp} – fator de deterioração especificado pelo usuário para a progressão da profundidade média das trilhas de roda;

$YE4$ – número de operações do eixo padrão equivalente a 80 kN para o ano de análise, calculado pelo método da *AASHTO*, em milhões por faixa;

SNC – número estrutural corrigido;

$COMP$ – compactação relativa das camadas de base, sub-base e do subleito selecionado, em porcentagem;

No primeiro ano, quando $RDM_a = 0$, a equação acima é usada diretamente para estimar ΔRDM_d , porém, subsequentemente, o incremento na profundidade média das trilhas de roda provocada pela deterioração durante o ano de análise é derivado de:

$$\Delta RDM_d = K_{rp} \left\{ \frac{0,166 + ERM}{AGE3} + \left[0,021119 \times MMP \times \Delta CRX_d \times \ln[máx(1; AGE3 \times YE4)] \right] \right\} \times RDM_a \quad (A.13)$$

Se $RDM_a > 0$;

em que:

ΔRDM_d – mudança da profundidade média da trilha de roda durante o ano de análise devido à deterioração, em mm;

ERM – valor do expoente que é função das características da superfície do pavimento e precipitação, dado por:

$$ERM = 0,09 - 0,0009RH + 0,0384 + 0,00158MMP \times CRX_a \quad (A.14)$$

em que:

CRX_d – área de trincamento indexado no início do ano de análise, dado por:

$$CRX_a = 0,62ACRA_a + 0,39ACRW_a \quad (A.15)$$

ΔCRX_d é a mudança de área do trincamento indexado provocado pela deterioração, dado por:

$$\Delta CRX_d = 0,62(ACRA_b - ACRA_a) + 0,39(ACRW_b - ACRW_a) \quad (A.16)$$

MMP – precipitação média mensal, em mm/mês;

$AGE3$ – idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos;

d) Progressão da Irregularidade:

$$\Delta QI_d = 13K_{gp} \left[\frac{134 \times EMT(SNC + 1)^{-5,0} \times YE4 + 0,114(RDS_b - RDS_a)}{0,0066\Delta CRX_d + 0,42\Delta APOT_d} + 0,023K_{gp} \times QI_a \right] \quad (A.17)$$

em que: ΔQI_d – aumento previsto na irregularidade durante o ano de análise, provocado pela deterioração, em contagem/km;

K_{gp} – fator de deterioração para a progressão da irregularidade;

K_{ge} – fator de deterioração relativo ao meio ambiente;

$EMT = \exp(0,023K_{ge} \times AGE3)$;

$AGE3$ – idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos;

$YE4$ – número de operações do eixo padrão equivalente a 80 kN para o ano de análise, calculado pelo método da *AASHTO*, em milhões por faixa;

RDS_b e RDS_a – variação do desvio padrão da profundidade média da deformação permanente (em ambas as trilhas de roda) durante o ano de análise, em mm;

ΔCRX_d – variação prevista do trincamento indexado, devido à deterioração, durante o ano de análise, em porcentagem;

$\Delta APOT_d$ - variação prevista da área de painéis devido à deterioração, durante o ano de análise, em porcentagem;

$SNCK$ – número estrutural modificado, ajustado ao efeito do trincamento, dado por:

$$ANCK = \text{MÁX}(1,5; SNC - \Delta SNK); \quad (A.18)$$

ΔSNK - redução estimada no número estrutural devido ao trincamento do revestimento, dado por:

$$\Delta SNK = 0,0000758(CRX_a \times HSNEW + ECR \times HSOLD) \quad (A.19)$$

$$CRX_a = \text{MIN}(63; CRX_a) \quad (A.20)$$

em que: CRX_a - área de trincamento, em porcentagem;

$HSNEW$ – espessura do revestimento, em mm;

ECR – trincamento previsto além da quantidade que existia no antigo revestimento, isto é, em pavimentos reabilitados:

$$ECR = \max[\min(CRX_a - PCRX; 40); 0]; \quad (A.21)$$

$PCRX$ – trincamento indexado nas antigas camadas de revestimento e base, em porcentagem, dado por:

$$PCRX = 0,62PCRA + 0,39PCRW ;$$

$PCRA$ – trincamento total ocorrido antes da última reabilitação, em porcentagem;

$PCRW$ – trincas de classe 2 e 3 ocorridas antes da última reabilitação, em porcentagem;

$HSOLD$ – espessura total do revestimento antigo, em mm.

e) Estimativa da irregularidade longitudinal:

$$QI = [QI_0 + 0,725(1 + SNC)^{-4,99} \times YE4] \times e^{0,0153AGE^3} \quad R^2 = 0,75 \quad (A.22)$$

Em que: QI_0 – quociente de irregularidade inicial, em m/km.

- Modelos desenvolvidos por Marcon (1996):

a) Região 1:

$$DEFM = 60,235 \times IDADE^{0,2002} \quad R^2 = 0,14 \quad (A.23)$$

$$DEFM = 26,097 \times NA^{0,0954} \quad R^2 = 0,19 \quad (A.24)$$

$$IGG = 0,51 \times IDADE^2 - 3,24 \times IDADE + 16,86 \quad R^2 = 0,54 \quad (A.25)$$

$$IGG = 0,0082 \times NA^{0,6011} \quad R^2 = 0,44 \quad (A.26)$$

$$QI = 21,891 \times E^{0,0339 \times IDADE} \quad R^2 = 0,43 \quad (A.27)$$

$$QI = 25,798 + 6 \times 10^{-6} \times NA - 3 \times 10^{-13} \times NA^2 \quad R^2 = 0,69 \quad (A.28)$$

$$ATR = 0,039 \times IDADE^{3,1215} \quad R^2 = 0,48 \quad (A.29)$$

$$ATR = 3 \times 10^{-8} \times NA^{1,3981} \quad R^2 = 0,53 \quad (A.30)$$

$$TRI = 1,5739 + 0,1766 \times IDADE \quad R^2 = 0,24 \quad (A.31)$$

$$TRI = 0,1262 \times NA^{0,2397} \quad R^2 = 0,28 \quad (A.32)$$

b) Região 2:

$$DEFM = 24,288 + 3,5458 \times IDADE \quad R^2 = 0,37 \quad (A.33)$$

$$DEFM = 44,928 + 1,0 \times 10^{-5} \times NA \quad R^2 = 0,50 \quad (A.34)$$

$$IGG = -20,91 + 5,01 \times IDADE \quad R^2 = 0,52 \quad (A.35)$$

$$IGG = 8,7647 + 2,0 \times 10^{-5} \times NA - 1,0 \times 10^{-12} \times NA^2 \quad R^2 = 0,61 \quad (A.36)$$

$$QI = 18,318 + 1,1635 \times IDADE \quad R^2 = 0,29 \quad (A.37)$$

$$QI = 25,783 + 4,0 \times 10^{-6} \times NA - 5,0 \times 10^{-14} \times NA^2 \quad R^2 = 0,32 \quad (A.38)$$

$$ATR = 1,5124 \times IDADE - 6,8923 \quad R^2 = 0,32 \quad (A.39)$$

$$ATR = 1,4532 + 4 \times 10^{-6} \times NA \quad R^2 = 0,55 \quad (A.40)$$

$$TRI = 1,828 + 0,2325 \times IDADE \quad R^2 = 0,28 \quad (A.41)$$

$$TRI = 3,3051 + 5 \times 10^{-7} \times NA \quad R^2 = 0,26 \quad (A.42)$$

B) Região 3:

$$IGG = 4,9677 \times IDADE^{0,7113} \quad R^2 = 0,23 \quad (A.43)$$

$$IGG = 0,0544 \times NA^{0,4586} \quad R^2 = 0,30 \quad (A.44)$$

$$QI = 24,426 \times e^{0,017 \times IDADE} \quad R^2 = 0,11 \quad (A.45)$$

$$QI = 25,449 \times e^{0,0000002 \times NA} \quad R^2 = 0,17 \quad (A.46)$$

$$ATR = 0,0023 \times NA^{0,5297} \quad R^2 = 0,12 \quad (A.47)$$

$$TRI = 1,3601 \times IDADE^{0,44582} \quad R^2 = 0,32 \quad (A.48)$$

$$TRI = 0,0618 \times NA^{0,3117} \quad R^2 = 0,47 \quad (A.49)$$

em que: *DEFM* – deflexão máxima média, em 0,01 mm;

IGG – Índice de Gravidade Global;

QI – quociente de irregularidade (contagens/km);

ATR – percentual de área do pavimento com trincamento total;

TRI – profundidade de trilha de roda, em mm;

IDADE – idade do pavimento desde a construção, em anos;

NA – número equivalente de operações do eixo padrão.

- Modelos desenvolvidos por Yshiba (2003):

a) Modelos de regressão para pavimentos não reabilitados e avaliados em 1995:

$$IRI = 2,8 + 0,38I + 0,31N - 0,16SNC + 0,09I \times N - 0,08I \times SNC \quad R^2 = 0,75 \quad (A.50)$$

$$DEF = 56,0 + 8,7I + 4,25N - 4,75SNC + 1,81I \times SNC \quad R^2 = 0,62 \quad (A.51)$$

b) Modelos de regressão para pavimentos não reabilitados e avaliados em 1998:

$$IRI = 2,91 + 0,43I + 0,24N - 0,21SNC + 0,12I \times N \quad R^2 = 0,69 \quad (A.52)$$

$$DEF = 57,6 + 7,9I + 5,13N - 3,54SNC \quad R^2 = 0,60 \quad (A.53)$$

c) Modelos de Regressão para pavimentos reabilitados e avaliados em 1995:

$$IRI = 2,37 + 0,12I + 0,22N - 0,14SNC \quad R^2 = 0,81 \quad (A.54)$$

$$DEF = 47,2 + 2,2I + 3,81N - 2,7SNC + 1,44N \times SNC \quad R^2 = 0,83 \quad (A.55)$$

d) Modelos de regressão para pavimentos reabilitados e avaliados em 1998:

$$IRI = 2,5 + 0,10I + 0,15N - 0,15SNC - 0,03I \times SNC + 0,03N \times SNC \quad R^2 = 0,80 \quad (A.56)$$

$$DEF = 47,38 + 2,25I + 3,63N - 2,88SNC + 1,63N \times SNC \quad R^2 = 0,81 \quad (A.57)$$

em que: IRI – irregularidade longitudinal do pavimento;

DEF – deflexão máxima recuperável (DEF , em 0,01 mm);

$IDADE$ – idade do pavimento (desde a construção original ou desde o último recapeamento);

N – tráfego expresso pelo número de solicitações equivalentes do eixo padrão, obtido a partir do volume médio diário, dos fatores de equivalência de carga e das taxas de crescimento;

SNC – número estrutural corrigido do pavimento.

- Modelos desenvolvidos por Benevides (2006):

a) modelos de correlação entre os valores do ICP e o IRI médio confiabilidade de 95% em função do F:

- Sensor na posição normal para os 72 trechos:

$$IRI = -0,1191ICP + 12,993 \quad R^2 = 0,84 \quad F = 369,38 \quad F_{crit} = 3,84 \quad (A.58)$$

- Sensor localizado no lado direito para 42 trechos com revestimento em CBUQ:

$$IRI = -0,1215ICP + 12,926 \quad R^2 = 0,89 \quad F = 327,019 \quad F_{crit} = 4,08 \quad (A.59)$$

- Sensor localizado no lado esquerdo para 42 trechos com revestimento em CBUQ:

$$IRI = -0,0883ICP + 10,155 \quad R^2 = 0,83 \quad F = 202,224 \quad F_{crit} = 4,08 \quad (A.60)$$

- Média das três posições de sensor para 42 trechos com revestimento em CBUQ:

$$IRI = -0,1183ICP + 12,737 \quad R^2 = 0,94 \quad F = 639,048 \quad F_{crit} = 4,08 \quad (A.61)$$

b) Modelos de correlação entre os valores do IRI médio confiabilidade de 95% e dos defeitos/severidades em função do F nos 72 trechos:

$$IRI = 0,0462TF + 2,9642 \quad R^2 = 0,46 \quad F = 59,620 \quad F_{crit} = 3,84 \text{ (A.62)}$$

$$IRI = 0,1227REM + 3,1515 \quad R^2 = 0,34 \quad F = 35,868 \quad F_{crit} = 3,84 \text{ (A.63)}$$

$$IRI = 0,4195AF + 3,3592 \quad R^2 = 0,07 \quad F = 5,763 \quad F_{crit} = 3,84 \text{ (A.64)}$$

$$IRI = 0,1661DES + 3,3461 \quad R^2 = 0,08 \quad F = 6,043 \quad F_{crit} = 3,84 \text{ (A.65)}$$

$$IRI = 0,0365(TF + TB) + 2,9484 \quad R^2 = 0,34 \quad F = 35,54 \quad F_{crit} = 3,84 \text{ (A.66)}$$

c) Modelos de correlação entre os valores do IRI médio confiabilidade de 95% e dos defeitos/severidades em função do F nos 42 trechos com revestimento em CBUQ:

$$IRI = 0,1102TF + 2,6743 \quad R^2 = 0,22 \quad F = 11,26 \quad F_{crit} = 4,08 \text{ (A.67)}$$

$$IRI = 0,4871REM + 2,7013 \quad R^2 = 0,73 \quad F = 109,52 \quad F_{crit} = 4,08 \text{ (A.68)}$$

$$IRI = 0,1226(TF + TB) + 2,4192 \quad R^2 = 0,29 \quad F = 59,620 \quad F_{crit} = 4,08 \text{ (A.69)}$$

d) Modelos de correlação entre os valores do IRI médio confiabilidade de 95% e dos defeitos/severidades em função do F nos 20 trechos com revestimento em TSD:

$$IRI = 0,0344TF + 3,506 \quad R^2 = 0,60 \quad F = 26,84 \quad F_{crit} = 4,39 \text{ (A.70)}$$

$$IRI = 0,068REM + 3,5914 \quad R^2 = 0,57 \quad F = 23,74 \quad F_{crit} = 4,39 \text{ (A.71)}$$

$$IRI = 0,3626AF + 3,8158 \quad R^2 = 0,36 \quad F = 10,31 \quad F_{crit} = 4,39 \text{ (A.72)}$$

$$IRI = 0,1503DES + 3,7912 \quad R^2 = 0,40 \quad F = 11,96 \quad F_{crit} = 4,39 \text{ (A.73)}$$

$$IRI = 0,0337(TF + TB) + 3,5016 \quad R^2 = 0,59 \quad F = 26,60 \quad F_{crit} = 4,39 \text{ (A.74)}$$

e) Modelos de correlação entre os valores do IRI médio confiabilidade de 95% e dos defeitos/severidades em função do F nos 10 trechos com revestimento em AAUQ:

$$IRI = 0,1186TF + 2,7413 \quad R^2 = 0,78 \quad F = 28,58 \quad F_{crit} = 5,12 \quad (A.75)$$

$$IRI = 0,0952(TF + TB) + 2,3859 \quad R^2 = 0,55 \quad F = 7,43 \quad F_{crit} = 5,12 \quad (A.76)$$

f) Modelos de correlação entre os valores do IRI médio confiabilidade de 95%, com a DEF e o NEC em função do F nos 72 trechos:

$$IRI = 0,0462DEF + 1,4591 \quad R^2 = 0,34 \quad F = 35,33 \quad F_{crit} = 3,84 \quad (A.77)$$

$$IRI = -0,5209NEC + 6,3593 \quad R^2 = 0,33 \quad F = 32,46 \quad F_{crit} = 3,84 \quad (A.78)$$

f) Modelos de regressão múltipla para os valores do IRI médio confiabilidade de 95%:

$$IRI = -0,14ICP - 0,0211DEF - 0,00641TF + 15,636 \quad R^2 = 0,86 \quad (A.79)$$

$$IRI = -8,303ICP + 0,812NEC - 0,0050TF + 101,844 \quad R^2 = 0,93 \quad (A.80)$$

em que: TF – porcentagem da área com ocorrência de trincas por fadiga;

TB - porcentagem da área com ocorrência de trincas em bloco;

REM – porcentagem da área que sofreu remendos profundos;

AF – porcentagem da área com ocorrência afundamento nas trilhas de roda;

DES – porcentagem da área com ocorrência desgaste;

DEF – deflexão máxima recuperável (DEF , em 0,01 mm);

NEC – número estrutural corrigido.

- Modelos desenvolvidos por Albuquerque et al. (2007):

a) Modelos de previsão de desempenho para a irregularidade longitudinal:

$$IRI = 3,31663 + EXP(-0,69160 - 0,18754 \cdot C - 1,15811 \cdot S + 0,837915 \cdot N) \quad (A.81)$$

$$R^2 = 0,80$$

b) Modelos de previsão de desempenho para deflexão com FWD:

$$D_{FWD} = -1041,17 + EXP(6,9935 + 0,005063 \cdot C - 0,01349 \cdot S + 0,006726 \cdot N) \quad (A.82)$$

$$R^2 = 0,67$$

c) Modelos de previsão de desempenho para deflexão com viga Benkelman:

$$D_{VB} = 1,39775 + EXP(3,955109 + 0,091079 \cdot C - 0,04641 \cdot S + 0,210858 \cdot N) \quad (A.83)$$

$$R^2 = 0,65$$

em que: C: código utilizado para a classificação climática do trecho analisado, variando de -1 para clima úmido a +1 para clima árido;
 S: número estrutural corrigido do pavimento;
 N: Tráfego expresso pelo número de solicitações equivalentes do eixo padrão.

ANEXO B – MODELO DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DO HDM-4

No modelo de irregularidade do HDM-4 são considerados a contribuição de cinco componentes (estrutural, trincamento, deformações permanentes nas trilhas de rodas, painéis e o meio ambiente) para a progressão de irregularidades. O incremento total de irregularidade é a somatória desses cinco componentes.

a) Componente estrutural - representa a deformação sofrida pelos materiais componentes do pavimento devido às tensões cisalhantes impostas pela aplicação das cargas do tráfego:

$$\Delta RI_s = a_0 \exp(mK_{gm} AGE3)(1 + SNPK_b)^{-5} YE4 \quad (B.1)$$

$$SNPK_b = \max[(SNP_a - dSNPK), 1,5] \quad (B.2)$$

$$dSNPK = K_{snpk} a_0 \{ \min(a_1, ACX_a) HSNEW + \max[\min(ACX_a - PACX, a_2), 0] HSOLD \} \quad (B.33)$$

em que: ΔRI_s – mudança na irregularidade devido a deterioração estrutural durante o ano de análise (IRI m/km);

$dSNPK$ – redução do número estrutural ajustado do pavimento devido ao trincamento;

$SNPK_b$ – número estrutural ajustado do pavimento devido ao trincamento no final do ano de análise;

SNP_a – número estrutural ajustado do pavimento no início do ano de análise;

ACX_a – área de trincamento indexada no início do ano de análise (porcentagem da área total da seção analisada);

$PACX$ – área de trincamento indexada da superfície de rolamento antiga (porcentagem da área total da seção analisada);

$HSNEW$ – espessura do revestimento mais recente (mm);

$HSOLD$ – espessura total das camadas de revestimento subjacentes anteriores (mm);

AGE3 – idade do pavimento desde o último recapeamento, reconstrução ou nova construção (anos);

YE4 - número de operações do eixo padrão equivalente a 80 kN para o ano de análise, calculado pelo método da *AASHTO*, em milhões por faixa;

m – coeficiente devido a fatores ambientais;

K_{gm} - fator de calibração para o coeficiente ambiental;

K_{snpk} – fator de calibração para o *SNPK*.

b) Componente do trincamento - representa o incremento da mudança na irregularidade devido ao trincamento:

$$\Delta RI_c = a_0 \Delta ACRA \quad (B. 4)$$

em que: ΔRI_c = incremento na irregularidade devido ao trincamento durante o ano em análise (IRI em m/km);

$\Delta ACRA$ – incremento na área total de trincas durante o ano de análise (porcentagem da área total da seção analisada).

c) Componente das deformações permanentes nas trilhas de rodas - representa o incremento da mudança na irregularidade devido às deformações permanentes nas trilhas de rodas:

$$\Delta RI_r = a_0 \Delta RDS \quad (B. 5)$$

em que: ΔRI_r - incremento na irregularidade devido às deformações permanentes nas trilhas de rodas durante o ano em análise (IRI em m/km);

ΔRDS – incremento no desvio padrão das deformações permanentes nas trilhas de rodas durante o ano de análise (mm) ($= RDS_b - RDS_a$);

RDS_b – desvio padrão dos afundamentos nas trilhas de rodas no final do ano em análise (mm);

RDS_a – desvio padrão dos afundamentos nas trilhas de rodas no início do ano em análise (mm).

d) Componente de painéis - o efeito das painéis na irregularidade depende do número de veículos que atingem as painéis, o qual depende do volume de tráfego e da liberdade que os motoristas têm para realizar manobras de desvio:

$$FM = (\max\{\min[0,25(CW - 3),1],0\}) \left\{ \max \left[\left(1 - \frac{AADT}{500} \right), 0 \right] \right\} \quad (B.6)$$

O incremento na irregularidade é calculado da seguinte forma e depende da política de realização de operações tapa-buracos:

- se não há operações tapa-buracos ($TFL = 1$) ou há execução de 100% de políticas de operações tapa-buracos:

$$\Delta RI_t = a_0(a_1 - FM) \left[\left(NPT_a \times TFL + \frac{\Delta NPT \times TFL}{2} \right)^{a_2} - NPT_a^{a_2} \right] \quad (B.7)$$

- em caso de políticas intermediárias:

$$\Delta RI_t = a_0(a_1 - FM) \times \Delta NPT \times \left(NPT_a + \frac{\Delta npt}{2} \right)^{a_2} \quad (B.8)$$

em que: FM – liberdade de execução de manobras;

CW – largura da faixa de tráfego;

$AADT$ – volume médio diário anual (veíc/dia);

ΔRI_t – incremento na irregularidade devido a presença de painéis durante o ano de análise (IRI m/km);

ΔNPT – incremento no número de painéis por km durante o ano de análise;

NPT_a – número de painéis por km no início do ano de análise;

TFL – fator referente ao intervalo de tempo entre as execuções de operações tapa-buracos (tabelado).

e) Componente ambiental – devido a fatores que incluem temperatura e variações no teor de umidade e os movimentos de subleito (subsistência, por exemplo):

$$\Delta RI_e = m \times K_{gm} RI_a \quad (B.9)$$

em que: ΔRI_e - incremento na irregularidade devido ao meio ambiente durante o ano em análise (IRI em m/km);

RI_a – o valor da irregularidade no início do ano de análise (IRI em m/km);

M – coeficiente ambiental (tabelado);

K_{gm} – fator de calibração para a componente ambiental.

f) Equação geral do cálculo de irregularidade:

$$\Delta RI = K_{gp} [\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t] + \Delta RI_e \quad (B.10)$$

em que: ΔRI – incremento total na irregularidade durante o ano de análise (IRI m/km);

K_{gp} – fator de calibração para a progressão da irregularidade (tabelado).

O valor da irregularidade do pavimento no final do período de análise é dado por:

$$RI_b = \min[(RI_a + \Delta RI), a_0] \quad (B.11)$$

em que: RI_b – valor da irregularidade do pavimento no final do ano de análise (IRI m/km);

RI_a – valor da irregularidade do pavimento no início do ano de análise (IRI m/km);

a_0 – valor limite de irregularidade do pavimento admitida pelo operador do sistema (*default* = 16 IRI m/km).

ANEXO C – TABELAS DE VALORES DOS PARÂMETROS DOS TRECHOS

Tabela C.1 – Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) para os trechos em CBUQ que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	Caminhão Leve	Caminhão Médio	VMDA			Reboque	N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	ICPF
						Caminhão Pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3					
1	001EBA0185	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,04E+05	21	3,0
2	001EBA0190	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,04E+05	21	2,8
3	001EBA0195	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,04E+05	21	4,1
4	001EBA0200	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,04E+05	21	4,0
5	001EBA0205	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,04E+05	21	3,9
6	084EBA0080	457	63	32	26	20	0	1	0	1,61E+04	2,13E+05	21	3,5
7	120EBA0125	686	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,77E+05	27	3,5
8	120EBA0135	1290	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,77E+05	27	2,5
9	120EBA0315	1377	455	263	231	360	8	124	44	2,60E+05	2,80E+06	15	1,8
10	130EBA0235	508	455	263	231	360	8	124	44	2,60E+05	3,62E+06	23	2,0
11	148EBA0025	383	132	49	24	135	3	9	3	5,90E+04	3,98E+05	8	4,5
12	210EBA0015	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	3,50E+04	6	4,4
13	210EBA0015	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	3,50E+04	6	3,3
14	220EBA0065	585	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	4,82E+05	36	3,0
15	233EBA0070	686	63	32	26	20	0	1	0	1,61E+04	1,29E+05	10	3,1
16	262EBA0120	496	112	54	137	152	1	74	75	1,43E+05	2,08E+06	25	2,2
17	262EBA0125	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25	2,2
18	262EBA0135	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25	3,0
19	262EBA0135	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25	3,8
20	263EBA0030	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25	2,4
21	263EBA0030	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25	3,0
22	270EBA0010	1377	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,22E+05	22	2,8
23	270EBA0020	1377	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,22E+05	22	1,8
24	270EBA0025	1377	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,22E+05	22	3,2
25	270EBA0030	1377	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	7,22E+05	22	3,5
26	274EBA0005	1377	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	8,28E+05	29	2,7

Tabela C.1 – Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) para os trechos em CBUQ que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004 (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	Caminhão Leve	Caminhão Médio	VMDA			Reboque	N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	ICPF
						Caminhão Pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3					
27	275EBA0025	1025	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	2,61E+05	29	2,1
28	499EBA0020	686	48	132	76	97	1	26	0	4,97E+04	7,75E+05	29	2,0
29	501EBA0005	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	1,8
30	501EBA0010	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	2,0
31	502EBA0035	1934	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26	2,0
32	512EBA0015	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,71E+06	40	2,3
33	652EBA0005	1290	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10	3,5
34	AREMBEPE	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	2,5
35	PRAIA F.	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	1,9
36	P. SAUÍPE	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	1,3
37	S F CONDE	1934	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	1,5
38	MAPELE	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29	1,0

Tabela C.2 - Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	Caminhão Leve	VMDA				Reboque	N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	Área total de trinca (%)
					Caminhão Médio	Caminhão Pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3					
1	001EBA0185	1025,0	216,2	161,0	58,7	80,5	0,0	0,0	0,0	5,3E+04	7,0E+05	21,0	5,0
2	001EBA0190	1025,0	216,2	161,0	58,7	80,5	0,0	0,0	0,0	5,3E+04	7,0E+05	21,0	9,3
3	052EBA0070	382,5	15,0	25,3	50,6	98,9	5,8	31,1	0,0	4,8E+04	7,7E+05	30,0	63,8
4	120EBA0125	685,5	26,5	18,4	21,9	38,0	1,2	6,9	0,0	1,8E+04	2,8E+05	27,0	75,0
5	120EBA0315	1376,5	455,4	263,4	231,2	360,0	8,1	124,2	43,7	2,6E+05	2,8E+06	15,0	38,8
6	130EBA0235	507,8	455,4	263,4	231,2	360,0	8,1	124,2	43,7	2,6E+05	3,6E+06	23,0	30,0
7	210EBA0015	457,1	2,3	21,9	6,9	17,3	0,0	1,2	2,3	6,6E+03	3,5E+04	6,0	8,8
8	220EBA0065	584,7	39,1	49,5	89,7	46,0	2,3	6,9	0,0	2,8E+04	4,8E+05	36,0	30,0
9	233EBA0095	685,5	70,2	101,2	139,2	258,8	11,5	115,0	9,2	1,5E+05	1,2E+06	10,0	20,0
10	262EBA0120	496,2	111,6	54,1	136,9	151,8	1,2	73,6	74,8	1,4E+05	2,1E+06	25,0	16,5
11	262EBA0125	496,2	171,4	115,0	373,8	411,7	4,6	110,4	101,2	2,7E+05	3,9E+06	25,0	45,0
12	262EBA0135	496,2	171,4	115,0	373,8	411,7	4,6	110,4	101,2	2,7E+05	3,9E+06	25,0	30,0
13	262EBA0135	496,2	171,4	115,0	373,8	411,7	4,6	110,4	101,2	2,7E+05	3,9E+06	25,0	25,4
14	262EBA0135	496,2	171,4	115,0	373,8	411,7	4,6	110,4	101,2	2,7E+05	3,9E+06	25,0	75,0
15	263EBA0030	496,2	171,4	115,0	373,8	411,7	4,6	110,4	101,2	2,7E+05	3,9E+06	25,0	57,0
16	270EBA0025	1376,5	216,2	161,0	58,7	80,5	0,0	0,0	0,0	5,3E+04	7,2E+05	22,0	33,3
17	270EBA0030	1376,5	216,2	161,0	58,7	80,5	0,0	0,0	0,0	5,3E+04	7,2E+05	22,0	30,0
18	274EBA0005	1376,5	216,2	161,0	58,7	80,5	0,0	0,0	0,0	5,3E+04	8,3E+05	29,0	5,0
19	275EBA0025	1025,0	16,1	23,0	17,3	39,1	0,0	8,1	0,0	1,7E+04	2,6E+05	29,0	32,7
20	499EBA0020	685,5	48,3	132,3	75,9	96,6	1,2	26,5	0,0	5,0E+04	7,8E+05	29,0	75,0
21	501EBA0010	685,5	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	58,0
22	502EBA0035	1933,8	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,0E+06	26,0	35,0
23	512EBA0015	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,7E+06	40,0	78,0
24	535EBA0005	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	57,5
25	535EBA0015	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	71,0
26	535EBA0020	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	65,0

Tabela C.2 - Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Área Total de Trincas para os trechos em CBUQ que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004 (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	Caminhão Leve	VMDA				Reboque	N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	Área total de trinca (%)
					Caminhão Médio	Caminhão Pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3					
27	635EBA0005	507,8	111,6	54,1	136,9	151,8	1,2	73,6	74,8	1,4E+05	2,2E+06	29,0	55,0
28	652EBA0005	1290,3	34,5	44,9	34,5	23,0	1,2	3,5	1,2	1,6E+04	1,3E+05	10,0	27,8
29	678EBA0010	1376,5	16,1	23,0	17,3	39,1	0,0	8,1	0,0	1,7E+04	2,6E+05	29,0	5,0
30	885EBA0005	1296,0	48,3	132,3	75,9	96,6	1,2	26,5	0,0	5,0E+04	7,8E+05	29,0	20,0
31	AREMBEPE	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	75,0
32	PRAIA FORT	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	60,0
33	P. DE SAUÍPE	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	62,0
34	AEROP.FEIR	685,5	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	65,0
35	S F CONDE	1933,8	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	65,0
36	MAPELE	1184,0	269,1	185,2	113,9	314,0	16,1	254,2	3,5	2,7E+05	4,2E+06	29,0	85,0

Tabela C.3 - Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Área de Desgaste para os trechos em TSD que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004

N º	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	VMDA						N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	Área de desgaste (%)
				Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque				
1	030BBA0310-1	420,5	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,43E+06	17,0	40,0
2	030BBA0310-2	420,5	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,43E+06	17,0	71,0
3	030BBA0330-3	420,5	79	94	94	213	3	58	10	1,05E+05	1,27E+06	18,0	72,4
4	122BBA0500-2	420,5	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	1,54E+06	29,0	68,3
5	135BBA0590	398,2	86	46	62	105	5	23	12	6,19E+04	6,68E+05	15,0	16,4
6	349BBA0410-1	303,0	14	5	22	44	1	20	0	2,48E+04	1,84E+05	9,0	5,0
7	349BBA0434-2	398,2	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9,0	9,3
8	410BBA0010-1	457,1	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,68E+06	29,0	53,7
9	410BBA0010-2	457,1	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,68E+06	29,0	75,0
10	052EBA0040	562,0	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	5,30E+05	30,0	25,0
11	052EBA0050	663,2	6	13	14	35	0	1	0	1,02E+04	1,61E+05	30,0	34,1
12	052EBA0070	382,5	15	25	51	99	6	31	0	4,84E+04	7,66E+05	30,0	66,2
13	052EBA0100	382,5	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30,0	70,8
14	052EBA0110	382,5	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30,0	35,7
15	052EBA0130	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	25,0
16	052EBA0135	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	51,1
17	052EBA0140	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	25,0
18	052EBA0145	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	25,0
19	052EBA0150	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	37,5
20	052EBA0155	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	21,6
21	052EBA0160	382,5	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30,0	25,0
22	084EBA0020	1111,4	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	8,65E+05	10,0	25,0
23	084EBA0120	457,1	63	32	26	20	0	1	0	1,61E+04	2,13E+05	21,0	25,0
24	084EBA0120	457,1	63	32	26	20	0	1	0	1,61E+04	2,13E+05	21,0	25,0
25	084EBA0125	457,1	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	8,75E+04	21,0	25,0
26	120EBA0050	685,5	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19,0	36,1
27	120EBA0050	685,5	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19,0	28,7

Tabela C.3 - Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Área de Desgaste para os trechos em TSD que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004 (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	Caminhão leve	VMDA				Reboque	N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	Área de desgaste (%)
					Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3					
28	120EBA0095	685,5	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,91E+05	30,0	25,0
29	120EBA0240	448,9	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	2,13E+05	21,0	25,0
30	130EBA0015	663,2	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	4,19E+05	19,0	56,3
31	142EBA0065	303,0	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,29E+05	6,0	5,0
32	142EBA0070	303,0	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8,0	19,5
33	142EBA0075	303,0	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8,0	24,5
34	142EBA0075	303,0	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8,0	12,2
35	152EBA0030	303,0	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	3,88E+05	9,0	5,0
36	160EBA0040	382,5	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14,0	23,0
37	160EBA0040	382,5	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14,0	25,0
38	161EBA0040	749,4	69	155	99	104	0	10	3	4,85E+04	5,23E+05	15,0	5,0
39	161EBA0045	749,4	69	155	99	104	0	10	3	4,85E+04	5,23E+05	15,0	5,0
40	161EBA0070	398,2	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15,0	15,5
41	172EBA0030	398,2	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8,0	5,0
42	172EBA0035	398,2	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8,0	5,0
43	172EBA0040	398,2	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8,0	5,0
44	210EBA0005	457,1	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	9,97E+04	27,0	25,4
45	210EBA0025	457,1	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	9,97E+04	27,0	18,8
46	210EBA0080	322,6	129	248	89	143	5	36	1	7,97E+04	1,28E+06	31,0	31,3
47	210EBA0095	322,6	62	47	47	28	0	2	0	2,01E+04	3,23E+05	31,0	25,0
48	220EBA0020	457,1	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	2,92E+05	14,0	13,0
49	220EBA0020	457,1	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	2,92E+05	14,0	23,3
50	220EBA0045	584,7	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	4,82E+05	36,0	43,2
51	220EBA0045	584,7	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	4,82E+05	36,0	25,0
52	262EBA0140	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25,0	50,0
53	262EBA0140	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25,0	75,0
54	262EBA0145	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23,0	75,0

Tabela C.3 - Valores dos parâmetros Idade, Tráfego Acumulado, Pluviometria e Área de Desgaste para os trechos em TSD que não sofreram atividades de manutenção e reabilitação até 2004 (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	VMDA			Reboque	N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)	Área de desgaste (%)
						Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3					
28	120EBA0095	685,5	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,91E+05	30,0	25,0
55	262EBA0150	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23,0	55,0
56	262EBA0155	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23,0	61,0
57	262EBA0155	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23,0	75,0
58	262EBA0160	496,2	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23,0	68,3
59	262EBA0165	420,5	95	45	130	253	8	91	93	1,86E+05	2,71E+06	25,0	38,3
60	368EBA0020	663,2	43	21	54	107	6	94	100	1,44E+05	2,10E+06	25,0	75,0
61	368EBA0025	663,2	25	46	44	118	8	8	2	4,34E+04	6,32E+05	25,0	75,0
62	390EBA0005	457,1	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	1,03E+05	29,0	25,0
63	390EBA0010	457,1	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	1,03E+05	29,0	25,0
64	460EBA0005	749,4	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	2,14E+06	10,0	21,9
65	460EBA0010	749,4	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	2,14E+06	10,0	21,2
66	652EBA0015	448,9	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10,0	25,0
67	652EBA0020	448,9	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10,0	25,0
68	652EBA0020	448,9	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10,0	25,0
69	693EBA0010	1025,0	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,64E+05	13,0	10,0
70	ANGUERA	685,5	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,86E+05	29,0	25,0

ANEXO D – TRECHOS EM TSD SEM ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO ATÉ O ANO DE 2004, UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO FATORIAL DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
1	030BBA0242	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
2	030BBA0244	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
3	030BBA0250	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
4	030BBA0250	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
5	030BBA0250	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
6	030BBA0252	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
7	030BBA0252	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
8	030BBA0254	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,65E+05	19
9	030BBA0270	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,53E+06	19
10	030BBA0310-1	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,43E+06	17
11	030BBA0310-2	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,43E+06	17
12	030BBA0330-1	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,43E+06	17
13	030BBA0330-2	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,43E+06	17
14	030BBA0330-3	421	79	94	94	213	3	58	10	1,05E+05	1,27E+06	18
15	030BBA0330-4	421	79	94	94	213	3	58	10	1,05E+05	1,27E+06	18
16	030BBA0330-4	421	79	94	94	213	3	58	10	1,05E+05	1,27E+06	18
17	030BBA0382-2	449	53	86	47	158	0	25	38	8,08E+04	8,72E+05	15
18	122BBA0450-2	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	6,99E+05	12
19	122BBA0452	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	6,99E+05	12
20	122BBA0460	383	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	7,30E+05	9
21	122BBA0463	303	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	9,62E+05	13
22	122BBA0464	303	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	9,62E+05	13
23	122BBA0466	303	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	9,62E+05	13
24	122BBA0500-2	421	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	1,54E+06	29
25	122BBA0510-2	421	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	1,54E+06	29

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
26	135BBA0590	398	86	46	62	105	5	23	12	6,19E+04	6,68E+05	15
27	135BBA0610-3	398	86	46	62	105	5	23	12	6,19E+04	9,67E+05	29
28	135BBA0610-4	398	86	46	62	105	5	23	12	6,19E+04	9,67E+05	29
29	135BBA0630-1	398	86	46	62	105	5	23	12	6,19E+04	9,67E+05	29
30	135BBA0630-1	398	86	46	62	105	5	23	12	6,19E+04	9,67E+05	29
31	349BBA0410-1	303	14	5	22	44	1	20	0	2,48E+04	1,84E+05	9
32	349BBA0410-2	303	14	5	22	44	1	20	0	2,48E+04	1,84E+05	9
33	349BBA0430	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	5,22E+05	9
34	349BBA0432	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
35	349BBA0432	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
36	349BBA0434-1	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
37	349BBA0434-2	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
38	349BBA0450-1	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
39	349BBA0450-2	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
40	349BBA0470-1	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
41	349BBA0470-2	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
42	349BBA0470-3	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
43	349BBA0480	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
44	349BBA0480	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
45	349BBA0480	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
46	349BBA0490	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
47	349BBA0490	398	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	1,79E+06	8
48	410BBA0010-1	457	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,68E+06	29
49	410BBA0010-2	457	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,68E+06	29
50	420BBA0132-1	1934	48	132	76	97	1	26	0	4,97E+04	7,87E+05	30

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
51	420BBA0132-2	1934	48	132	76	97	1	26	0	4,97E+04	7,87E+05	30
52	430BBA0120	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,59E+05	15
53	430BBA0120	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,59E+05	15
54	430BBA0130-1	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,59E+05	15
55	430BBA0130-2	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,59E+05	15
56	430BBA0130-2	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,59E+05	15
57	001EBA0220	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	4,59E+05	11
58	001EBA0225	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	4,89E+05	12
59	026EBA0150	421	79	94	94	213	3	58	10	1,05E+05	1,27E+06	18
60	026EBA0165	421	79	94	94	213	3	58	10	1,05E+05	1,27E+06	18
61	052EBA0035	562	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,86E+05	29
62	052EBA0040	562	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	5,30E+05	30
63	052EBA0045	663	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	5,30E+05	30
64	052EBA0050	663	6	13	14	35	0	1	0	1,02E+04	1,61E+05	30
65	052EBA0050	663	6	13	14	35	0	1	0	1,02E+04	1,61E+05	30
66	052EBA0070	383	15	25	51	99	6	31	0	4,84E+04	7,66E+05	30
67	052EBA0075	383	15	25	51	99	6	31	0	4,84E+04	7,66E+05	30
68	052EBA0080	383	15	25	51	99	6	31	0	4,84E+04	7,66E+05	30
69	052EBA0085	383	43	21	54	107	5	94	100	1,44E+05	2,28E+06	30
70	052EBA0090	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30
71	052EBA0095	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30
72	052EBA0100	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30
73	052EBA0105	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30
74	052EBA0110	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30
75	052EBA0115	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,20E+06	30
76	052EBA0120	383	132	49	24	135	3	9	3	5,90E+04	9,35E+05	30
77	052EBA0125	383	132	49	24	135	3	9	3	5,90E+04	9,35E+05	30

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
78	052EBA0130	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
79	052EBA0135	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
80	052EBA0140	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
81	052EBA0145	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
82	052EBA0145	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
83	052EBA0145	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
84	052EBA0150	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
85	052EBA0155	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
86	052EBA0160	383	18	33	72	76	0	17	2	3,62E+04	5,73E+05	30
87	084EBA0020	1111	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	8,65E+05	10
88	084EBA0120	457	63	32	26	20	0	1	0	1,61E+04	2,13E+05	21
89	084EBA0120	457	63	32	26	20	0	1	0	1,61E+04	2,13E+05	21
90	084EBA0125	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	8,75E+04	21
91	120EBA0050	686	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19
92	120EBA0050	686	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19
93	120EBA0050	686	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19
94	120EBA0095	686	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,91E+05	30
95	120EBA0215	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	2,13E+05	21
96	120EBA0240	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	2,13E+05	21
97	130EBA0005	663	25	46	44	118	8	8	2	4,34E+04	5,43E+05	19
98	130EBA0010	663	25	46	44	118	8	8	2	4,34E+04	5,43E+05	19
99	130EBA0015	663	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	4,19E+05	19
100	130EBA0015	663	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	4,19E+05	19
101	130EBA0020	663	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	4,19E+05	19
102	130EBA0025	663	21	20	33	37	2	10	23	3,35E+04	4,19E+05	19
103	130EBA0085	562	6	13	14	35	0	1	0	1,02E+04	1,51E+05	26
104	130EBA0265	508	112	54	137	152	1	74	75	1,43E+05	2,00E+06	23

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
105	131EBA0075	383	15	25	51	99	6	31	0	4,84E+04	4,73E+05	13
106	142EBA0065	303	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,29E+05	6
107	142EBA0070	303	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8
108	142EBA0075	303	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8
109	142EBA0075	303	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8
110	142EBA0080	303	14	5	22	41	1	20	0	2,43E+04	1,64E+05	8
111	142EBA0085	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	2,39E+05	8
112	142EBA0090	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	2,39E+05	8
113	142EBA0095	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	2,39E+05	8
114	142EBA0100	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	2,39E+05	8
115	142EBA0120	496	53	86	47	158	0	25	38	8,08E+04	6,51E+05	10
116	142EBA0125	496	53	86	47	158	0	25	38	8,08E+04	6,51E+05	10
117	142EBA0130	496	53	86	47	158	0	25	38	8,08E+04	6,51E+05	10
118	148EBA0025	383	132	49	24	135	3	9	3	5,90E+04	3,98E+05	8
119	148EBA0065	303	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	7,30E+05	9
120	148EBA0070	303	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	7,30E+05	9
121	148EBA0075	303	26	46	56	75	0	133	0	9,84E+04	1,06E+06	15
122	148EBA0080	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	3,82E+05	15
123	148EBA0085	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	3,82E+05	15
124	148EBA0090	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	3,82E+05	15
125	148EBA0095	303	22	28	54	66	2	17	5	3,54E+04	3,82E+05	15
126	148EBA0125	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	9,96E+05	9
127	148EBA0130	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	1,45E+06	15
128	148EBA0135	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	1,45E+06	15
129	148EBA0140	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	1,45E+06	15
130	152EBA0030	303	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	3,88E+05	9
131	152EBA0030	303	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	3,88E+05	9

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
132	152EBA0050	421	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	4,83E+05	12
133	152EBA0055	421	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	4,83E+05	12
134	152EBA0060	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	1,24E+06	12
135	152EBA0065	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	1,24E+06	12
136	152EBA0070	421	117	81	81	84	5	62	101	1,34E+05	1,24E+06	12
137	156EBA0050	421	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	5,64E+05	15
138	156EBA0055	421	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	4,21E+05	10
139	156EBA0065	421	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	4,21E+05	10
140	156EBA0070	421	55	24	37	47	0	32	24	5,23E+04	4,21E+05	10
141	156EBA0075	421	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	5,67E+05	10
142	160EBA0040	383	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14
143	160EBA0040	383	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14
144	160EBA0040	383	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14
145	160EBA0060	303	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14
146	160EBA0065	398	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14
147	160EBA0065	398	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	9,78E+05	14
148	160EBA0070	398	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,25E+05	14
149	160EBA0070	398	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,25E+05	14
150	160EBA0070	398	63	45	81	110	2	47	6	7,04E+04	7,25E+05	14
151	160EBA0080	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
152	160EBA0080	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
153	160EBA0080	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
154	160EBA0085	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
155	160EBA0085	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
156	160EBA0085	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
157	160EBA0095	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
158	161EBA0035	749	69	155	99	104	0	10	3	4,85E+04	2,57E+05	6

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
159	161EBA0040	749	69	155	99	104	0	10	3	4,85E+04	5,23E+05	15
160	161EBA0045	749	69	155	99	104	0	10	3	4,85E+04	5,23E+05	15
161	161EBA0050	749	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	1,02E+06	15
162	161EBA0055	749	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	1,02E+06	15
163	161EBA0060	398	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	1,02E+06	15
164	161EBA0065	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
165	161EBA0065	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
166	161EBA0065	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
167	161EBA0070	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
168	161EBA0075	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
169	161EBA0080	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
170	161EBA0080	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
171	161EBA0080	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
172	161EBA0090	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
173	161EBA0090	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
174	161EBA0095	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
175	161EBA0095	398	39	28	28	21	0	2	0	1,37E+04	1,47E+05	15
176	161EBA0100	398	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
177	172EBA0015	749	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	6,41E+05	8
178	172EBA0025	398	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	6,41E+05	8
179	172EBA0030	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
180	172EBA0030	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
181	172EBA0035	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
182	172EBA0035	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
183	172EBA0040	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
184	172EBA0045	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
185	172EBA0045	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
186	172EBA0050	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
187	172EBA0055	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
188	172EBA0060	398	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	3,07E+05	8
189	172EBA0065	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,36E+05	8
190	172EBA0070	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,36E+05	8
191	172EBA0080	398	41	29	55	84	1	29	8	4,99E+04	3,70E+05	9
192	210EBA0005	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	9,97E+04	27
193	210EBA0025	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	9,97E+04	27
194	210EBA0025	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	9,97E+04	27
195	210EBA0080	323	129	248	89	143	5	36	1	7,97E+04	1,28E+06	31
196	210EBA0080	323	129	248	89	143	5	36	1	7,97E+04	1,28E+06	31
197	210EBA0080	323	129	248	89	143	5	36	1	7,97E+04	1,28E+06	31
198	210EBA0085	323	129	248	89	143	5	36	1	7,97E+04	1,28E+06	31
199	210EBA0090	323	129	248	89	143	5	36	1	7,97E+04	1,28E+06	31
200	210EBA0095	323	62	47	47	28	0	2	0	2,01E+04	3,23E+05	31
201	210EBA0095	323	62	47	47	28	0	2	0	2,01E+04	3,23E+05	31
202	210EBA0095	323	62	47	47	28	0	2	0	2,01E+04	3,23E+05	31
203	220EBA0020	457	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	2,92E+05	14
204	220EBA0020	457	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	2,92E+05	14
205	220EBA0045	585	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	4,82E+05	36
206	220EBA0045	585	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	4,82E+05	36
207	220EBA0045	585	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	4,82E+05	36
208	220EBA0080	585	25	46	44	118	8	8	2	4,34E+04	7,38E+05	36
209	250EBA0005	1290	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	2,54E+05	30
210	262EBA0100	496	455	263	231	360	8	124	44	2,60E+05	1,93E+06	9
211	262EBA0110	496	112	54	137	152	1	74	75	1,43E+05	1,15E+06	10
212	262EBA0115	496	112	54	137	152	1	74	75	1,43E+05	1,06E+06	9

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
213	262EBA0115	496	112	54	137	152	1	74	75	1,43E+05	1,06E+06	9
214	262EBA0140	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
215	262EBA0140	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
216	262EBA0140	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
217	262EBA0140	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
218	262EBA0145	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23
219	262EBA0150	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23
220	262EBA0155	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23
221	262EBA0155	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23
222	262EBA0155	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23
223	262EBA0160	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,70E+06	23
224	262EBA0165	421	95	45	130	253	8	91	93	1,86E+05	2,71E+06	25
225	262EBA0165	421	95	45	130	253	8	91	93	1,86E+05	2,71E+06	25
226	263EBA0040	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
227	263EBA0045	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
228	263EBA0050	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
229	263EBA0050	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
230	263EBA0055	496	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	3,87E+06	25
231	270EBA0095	508	30	24	22	14	2	0	0	1,04E+04	1,41E+05	22
232	368EBA0010	663	13	16	29	59	1	5	0	2,03E+04	2,95E+05	25
233	368EBA0015	663	13	16	29	59	1	5	0	2,03E+04	2,95E+05	25
234	368EBA0020	663	43	21	54	107	6	94	100	1,44E+05	2,10E+06	25
235	368EBA0025	663	25	46	44	118	8	8	2	4,34E+04	6,32E+05	25
236	381EBA0015	585	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19
237	381EBA0015	585	39	49	90	46	2	7	0	2,83E+04	3,55E+05	19
238	390EBA0005	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	1,03E+05	29
239	390EBA0010	457	2	22	7	17	0	1	2	6,59E+03	1,03E+05	29

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
240	409EBA0005	686	70	101	139	259	12	115	9	1,53E+05	2,27E+06	26
241	409EBA0010	686	70	101	139	259	12	115	9	1,53E+05	2,27E+06	26
242	409EBA0015	686	70	101	139	259	12	115	9	1,53E+05	2,27E+06	26
243	409EBA0015	686	70	101	139	259	12	115	9	1,53E+05	2,27E+06	26
244	451EBA0005	749	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	1,48E+06	29
245	451EBA0005	749	55	41	59	54	0	98	30	9,50E+04	1,48E+06	29
246	459EBA0005	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	4,45E+05	13
247	459EBA0010	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	4,45E+05	13
248	459EBA0015	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	7,11E+05	29
249	459EBA0020	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	7,11E+05	29
250	460EBA0005	749	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	2,14E+06	10
251	460EBA0010	749	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	2,14E+06	10
252	460EBA0015	749	171	115	374	412	5	110	101	2,65E+05	2,14E+06	10
253	463EBA0020	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	7,11E+05	29
254	463EBA0025	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	7,11E+05	29
255	463EBA0030	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	7,11E+05	29
256	465EBA0010	749	74	35	77	55	1	22	7	4,55E+04	7,11E+05	29
257	502EBA0005	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26
258	502EBA0010	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26
259	502EBA0015	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26
260	502EBA0020	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26
261	502EBA0025	1934	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26
262	502EBA0030	1934	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	3,97E+06	26
263	505EBA0030	1184	89	44	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,26E+06	17
264	509EBA0005	686	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29
265	518EBA0005	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29
266	529EBA0010	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal
(Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
267	531EBA0005	1184	269	185	114	314	16	254	3	2,67E+05	4,17E+06	29
268	547EBA0005	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	2,01E+05	19
269	547EBA0010	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	2,01E+05	19
270	612EBA0005	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
271	612EBA0015	421	30	36	49	71	1	8	0	2,91E+04	3,14E+05	15
272	617EBA0005	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,32E+06	15
273	617EBA0010	421	69	64	99	183	30	76	10	1,22E+05	1,32E+06	15
274	623EBA0005	496	95	45	130	253	8	91	93	1,86E+05	2,90E+06	29
275	634EBA0005	496	112	54	137	152	1	74	75	1,43E+05	1,47E+06	14
276	650EBA0020	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	8,50E+04	6
277	652EBA0015	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10
278	652EBA0020	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10
279	652EBA0020	449	35	45	35	23	1	3	1	1,60E+04	1,29E+05	10
280	680EBA0005	508	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,01E+05	7
281	680EBA0010	508	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,01E+05	7
282	680EBA0015	508	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,01E+05	7
283	680EBA0015	508	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,01E+05	7
284	693EBA0005	1025	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,64E+05	13
285	693EBA0010	1025	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	1,64E+05	13
286	695EBA0005	1025	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	2,61E+05	29
287	695EBA0010	1025	16	23	17	39	0	8	0	1,67E+04	2,61E+05	29
288	784EBA0005	1934	89	41	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,68E+06	29
289	868EBA0005	1290	89	41	128	106	26	79	5	1,07E+05	1,68E+06	29
290	883EBA0005	1290	48	132	76	97	1	26	0	4,97E+04	4,00E+05	10
291	884EBA0005	1290	48	132	76	97	1	26	0	4,97E+04	3,68E+05	9
292	Anguera	686	26	18	22	38	1	7	0	1,83E+04	2,86E+05	29
293	Mira Serra	383	15	25	51	99	6	31	0	4,84E+04	7,55E+05	29

Tabela D.1 – Representação dos 295 trechos utilizados no planejamento fatorial para coleta de dados de Irregularidade Longitudinal (Continuação)

Nº	Código do DERBA	Pluviometria (mm/ano)	VMDA							N - 2004	N desde a abertura ao tráfego	Idade da construção (anos)
			Ônibus	Caminhão leve	Caminhão médio	Caminhão pesado	2S1 / 2S2	2S3 / 3S2 / 3S3	Reboque			
294	A. Dourada	383	43	76	81	148	12	37	7	7,58E+04	1,18E+06	29
295	A. de Caravelas	1025	216	161	59	81	0	0	0	5,30E+04	8,28E+05	29

Tabela D.2 – Representação dos trechos selecionados, conforme agrupamento em fatores e níveis, para realização dos levantamentos de dados de irregularidade longitudinal em campo.

CÓDIGO DO DERBA	INÍCIO DO TRECHO	FIM DO TRECHO	EXTENSÃO (km)	ID	TA	PL
161EBA0065	ENTR BA 470(P/PERNAMBUCO)	ENTR BA 840 (P/ GAMELEIRA DA LAPA)	6,0			
161EBA0070	ENTR BA 840 (P/ GAMELEIRA DA LAPA)	SÍTIO DO MATO	29,0			
172EBA0045	AC.SERRA DOURADA	ENTR BA 576 (P/SITIO DO MATO)	14,0			
172EBA0045	AC.SERRA DOURADA	ENTR BA 576 (P/SITIO DO MATO)	16,0			
030BBA0242	ENTR BR 342(B)(MALHADA/FIM DA TRV RIO SÃO FRANCISCO)	ENTR BA 160(A)(KM 86,3)	10,0			
030BBA0244	ENTR BA 160(A)(KM 86,3)	ENTR BA 160(B)(P/IUIU)	2,7			
030BBA0250	ENTR BA 160(B)(P/IUIU)	ENTR BA 263/ BA 574(PALMAS DE MONTE ALTO)	15,0			
030BBA0250	ENTR BA 160(B)(P/IUIU)	ENTR BA 263/ BA 574(PALMAS DE MONTE ALTO)	17,0	+1	-1	-1
030BBA0250	ENTR BA 160(B)(P/IUIU)	ENTR BA 263/ BA 574(PALMAS DE MONTE ALTO)	8,0			
030BBA0252	ENTR BA 263/ BA 574(PALMAS DE MONTE ALTO)	ENTR BA 612(P/MUTÃS)	13,0			
030BBA0252	ENTR BA 263/ BA 574(PALMAS DE MONTE ALTO)	ENTR BA 612(P/MUTÃS)	9,5			
148EBA0125	RIO DE CONTAS	ENTR BA 152 (LIVRAMENTO DO BRUMADO)	12,5			
148EBA0130	ENTR BA 152 (LIVRAMENTO DO BRUMADO)	AC. A DOM BASÍLIO	16,8			
148EBA0135	AC. A DOM BASÍLIO	ENTR BA 943 (P/ITAQUARAÍ)	31,0			
148EBA0140	ENTR BA 943 (P/ITAQUARAÍ)	ENTR BR 030(A)/ BA 026 (A) / BA 262 (BRUMADO)	19,9	-1	+1	-1
160EBA0060	ENTR BR 242 (A) (SÃO LOURENÇO)	ENTR BR 242 (B) (IBOTIRAMA)	4,0			
160EBA0065	ENTR BR 242 (B) (IBOTIRAMA)	ENTR BA 245/ BA 470(PARATINGA)	26,0			
160EBA0065	ENTR BR 242 (B) (IBOTIRAMA)	ENTR BA 245/ BA 470(PARATINGA)	37,0			
122BBA0500-2	ERICO CARDOSO	ENTR BA 152(PARAMIRIM)	15,0	+1	+1	-1
026EBA0150	ENTR BR 030 (B)(P/MALHADA DE PEDRAS)	ENTR BA 148(B) (MALHADA DE PEDRAS)	15,5			
220EBA0020	ENTR BA 084(B)(FÁTIMA)	ENTR BR 110 (CÍCERO DANTAS)	5,0			
220EBA0020	ENTR BA 084(B)(FÁTIMA)	ENTR BR 110 (CÍCERO DANTAS)	27,0	-1	-1	+1
650EBA0020	ENTR BR 330(IPIAÚ)	ENTR BA 558(P/AIQUARA)	10,0			
884EBA0005	ENTR BA 001(NILO PEÇANHA)	CAIRU	22,0			

Tabela D.2 – Representação dos trechos selecionados, conforme agrupamento em fatores e níveis, para realização dos levantamentos de dados de irregularidade longitudinal em campo.

CÓDIGO DO DERBA	INÍCIO DO TRECHO	FIM DO TRECHO	EXTENSÃO (km)	ID	TA	PL
120EBA0050	ENTR BA 413 (QUEIMADAS)	ENTR BA 383/ENTR BA 408(SANTALUZ)	9,0	+1	-1	+1
120EBA0050	ENTR BA 413 (QUEIMADAS)	ENTR BA 383/ENTR BA 408(SANTALUZ)	25,0			
120EBA0050	ENTR BA 413 (QUEIMADAS)	ENTR BA 383/ENTR BA 408(SANTALUZ)	7,5			
250EBA0005	PRAIA DE PRATEGI	ENTR BA 001(A)(P/ITUBERÁ)	20,0			
084EBA0020	ENTR BR324 (POSTO SÃO LUÍS)	ENTR BR 101	3,0	-1	+1	+1
262EBA0110	ENTR BA 645 (NOVA CANAÃ)	ENTR BA 643(BARAQUE)	29,0			
262EBA0115	ENTR BA 643(BARAQUE)	ENTR BR 116 (A)/ BA 640 (POÇÕES)	12,0			
262EBA0115	ENTR BA 643(BARAQUE)	ENTR BR 116 (A)/ BA 640 (POÇÕES)	5,0			
410BBA0010-1	ENTR BR 110/BA 394(RIBEIRA DO POMBAL)	ENTR BA 395(P/TUCANO)	33,8	+1	+1	+1
410BBA0010-2	ENTR BA 395(P/TUCANO)	ENTR BR 116(PROX. TUCANO)	2,9			
409EBA0005	ENTR BR 349/BA 120(CONCEIÇÃO DO COITÉ)	ENTR BA 411(A)(P/SALGADÁLIA)	0,5			
409EBA0010	ENTR BA 411(A)(P/SALGADÁLIA)	ENTR BA 411(B)(P/JOAZEIRO)	0,5			
409EBA0015	ENTR BA 411(B)(P/JOAZEIRO)	ENTR BA 233(P/RETIRO)	13,0			
409EBA0015	ENTR BA 411(B)(P/JOAZEIRO)	ENTR BA 233(P/RETIRO)	14,5			
420BBA0132-1	ENTR BA 502 (B) (SÃO FÉLIX)	ENTR BA 517 (P/OUTEIRO REDONDO)	15,0			

ANEXO E – TABELAS COM OS CÁLCULOS DOS COEFICIENTES E DOS TESTES ESTATÍSTICOS DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Tabela E.1 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o ICPF, $\beta_0 = 1,334$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,406051325
R-quadrado ajustado				0,376353891
Erro padrão				0,368262799
Observações				22
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	1,854290228	1,854290228	13,67294319
Resíduo	20	2,712349787	0,135617489	
Total	21	4,566640015		
				F crítico
				0,001424849
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	1,33409517	0,297676082	4,481700926	0,000228301
Variável X 1	0,35744632	0,096667353	3,697694307	0,001424849

Tabela E.2 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o ICPF, $\beta_0 = 0$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,9584529
R-quadrado ajustado				0,910833853
Erro padrão				0,508794761
Observações				22
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	125,4107077	125,4107077	484,4504421
Resíduo	21	5,43631429	0,258872109	
Total	22	130,847022		
				F crítico
				1,72221E-15
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	0,775339401	0,035226312	22,01023494	5,47948E-16

Tabela E.3 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para a A_{TT} , $\beta_0 = 25,589$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,423178569
R-quadrado ajustado				0,391132933
Erro padrão				9,144105262
Observações				20
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	1104,173235	1104,173235	13,20549796
Resíduo	18	1505,063899	83,61466105	
Total	19	2609,237134		F crítico
				0,001898305
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	25,58900181	4,60350765	5,558587875	2,81763E-05
Variável X 1	0,316039954	0,086969024	3,633936977	0,001898305

Tabela E.4 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para a A_{TT} , $\beta_0 = 0$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,884956427
R-quadrado ajustado				0,832324848
Erro padrão				14,66930426
Observações				20
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	31450,83359	31450,83359	146,154815
Resíduo	19	4088,581264	215,1884876	
Total	20	35539,41485		F crítico
				4,47741E-10
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	0,749163849	0,061968395	12,08945057	2,28523E-10

Tabela E.5 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para a A_{Desg} , $\beta_0 = 21,962$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,549884734
R-quadrado ajustado				0,541228671
Erro padrão				5,904991122
Observações				54
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	2215,081765	2215,081765	63,52596398
Resíduo	52	1813,183848	34,86892015	
Total	53	4028,265613		F crítico
				1,41831E-10
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	21,96183347	1,464594649	14,99516162	1,59483E-20
Variável X 1	0,287670731	0,036092756	7,970317684	1,41831E-10

Tabela E.6 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para a A_{Desg} , $\beta_0 = 0$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,834598936
R-quadrado ajustado				0,815731012
Erro padrão				13,49607241
Observações				54
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	48711,35355	48711,35355	267,4332477
Resíduo	53	9653,63043	182,1439704	
Total	54	58364,98398		F crítico
				3,81142E-22
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	0,740151836	0,045259851	16,35338643	2,32663E-22

Tabela E.7 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o IRI_{BA} , $\beta_0 = 1,018$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,692656783
R-quadrado ajustado				0,673447832
Erro padrão				0,40890548
Observações				18
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	6,02920851	6,029209	36,0590634
Resíduo	16	2,675259063	0,167204	
Total	17	8,704467572		F crítico
				1,83507E-05
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	1,018233559	0,598382614	1,701643	0,10817008
Variável X 1	0,768874557	0,128040768	6,00492	1,83507E-05

Tabela E.8 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o IRI_{BA} , $\beta_0 = 0$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,991766743
R-quadrado ajustado				0,932943214
Erro padrão				0,431100656
Observações				18
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	380,5784327	380,5784	2047,796541
Resíduo	17	3,15941219	0,185848	
Total	18	383,7378449		F crítico
				2,57173E-18
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	0,983909461	0,021742613	45,25259	3,66689E-19

Tabela E.9 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o IRI_{BAS} , $\beta_0 = 2,2368$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,804175059
R-quadrado ajustado				0,776200067
Erro padrão				0,180687934
Observações				9
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	0,938510071	0,938510071	28,74621274
Resíduo	7	0,228536905	0,032648129	
Total	8	1,167046977		F crítico
				0,001051033
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	2,236795294	0,365782423	6,115097819	0,000483836
Variável X 1	0,440510398	0,082161025	5,361549472	0,001051033

Tabela E.10 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o IRI_{BAS} , $\beta_0 = 0$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,990812442
R-quadrado ajustado				0,865812442
Erro padrão				0,425645805
Observações				9
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	156,3068718	156,3068718	862,7428264
Resíduo	8	1,449394809	0,181174351	
Total	9	157,7562666		F crítico
				1,36544E-08
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	0,936075322	0,031869123	29,37248417	1,95551E-09

Tabela E.11 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o IRI_{BAU} , $\beta_0 = 0,4085$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado				0,700447273
R-quadrado ajustado				0,657654026
Erro padrão				0,490415403
Observações				9
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	3,9366646	3,9366646	16,36817314
Resíduo	7	1,683550874	0,240507268	
Total	8	5,620215475		F crítico
				0,004897016
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0,408471209	1,131485442	0,361004388	0,728745255
Variável X 1	0,937152187	0,231638113	4,045759897	0,004897016

Tabela E.11 – Estatísticas de regressão linear e ANOVA para o IRI_{BAu} , $\beta_0 = 0$

<i>Estatística de regressão</i>				
R-Quadrado			0,992381266	
R-quadrado ajustado			0,867381266	
Erro padrão			0,462992276	
Observações			9	
ANOVA				
	gl	SQ	MQ	F
Regressão	1	223,3743175	223,3743175	1042,043254
Resíduo	8	1,714894784	0,214361848	
Total	9	225,0892123		F crítico
				7,08155E-09
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1,019897229	0,031594649	32,28069475	9,24096E-10

ANEXO F – VALORES DAS ESPESSURAS E DO CBR DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS DOS TRECHOS DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Tabela F.1 – Valores das espessuras das camadas, em cm, e do CBR, em %, dos trechos para cálculo do SNC

Trecho	CBR Subleito	CBR Base	Espessura Base	CBR SubBase	Espessura SubBase	Espessura do Revestimento	SNC	a ₁ (pol)	a ₁ (cm)	a ₂ (pol)	a ₂ (cm)	a ₃ (pol)	a ₃ (cm)
026EBA0150	34	60	15	0	0	1,5	2,68	0,10	0,04	0,113	0,045	0,000	0,000
120EBA0050	4	61	20	20	20	2,5	2,12	0,10	0,04	0,114	0,045	0,095	0,037
120EBA0050	20	61	20	0	0	2,5	2,70	0,10	0,04	0,114	0,045	0,000	0,000
148EBA0125	6	69	15	52	15	1,9	2,30	0,10	0,04	0,122	0,048	0,122	0,048
148EBA0130	6	60	20	20	20	2,5	2,52	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037
148EBA0140	6	60	20	20	20	2,5	2,52	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037
161EBA0065	10	50	15	25	20	2	2,71	0,10	0,04	0,102	0,040	0,101	0,040
161EBA0065	8	59	20	25	20	2	2,81	0,10	0,04	0,112	0,044	0,101	0,040
262EBA0115	6	53	12	51	15	2,5	2,10	0,10	0,04	0,106	0,042	0,121	0,048
262EBA0115	6	53	12	51	15	2,5	2,10	0,10	0,04	0,106	0,042	0,121	0,048
409EBA0015	5	75	20	21	20	2,5	2,46	0,10	0,04	0,126	0,050	0,096	0,038
409EBA0015	5	75	20	35	20	2,5	2,57	0,10	0,04	0,126	0,050	0,110	0,043
650EBA0020	6	60	20	20	20	3	2,54	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037
884EBA0005	6	60	20	20	20	2,5	2,52	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037
030BBA0250	6	60	20	20	20	2,5	2,52	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037
030BBA0250	6	60	20	20	20	2,5	2,52	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037
122BBA0500-2	9	91	20	39	15	2,5	2,98	0,10	0,04	0,135	0,053	0,113	0,045
410BBA0010-2	5	60	9,5	20	15	2,5	1,69	0,10	0,04	0,113	0,045	0,095	0,037