

**SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTO PARA  
DEPARTAMENTOS DE ESTRADAS  
DO NORDESTE BRASILEIRO**

**Fernando Silva Albuquerque**

Porto Alegre  
Dezembro 2007

**FERNANDO SILVA ALBUQUERQUE**

**SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTO PARA  
DEPARTAMENTOS DE ESTRADAS  
DO NORDESTE BRASILEIRO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Civil

Porto Alegre  
Dezembro 2007

ALBUQUERQUE, Fernando Silva Albuquerque

Sistema de gerência de pavimentos para departamentos de estradas do Nordeste brasileiro / Fernando Silva Albuquerque. – Porto alegre: PPGEC/UFRGS, 2007.

303 p.

Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Orientador: Washington Peres Núñez.

CCAA2

**FERNANDO SILVA ALBUQUERQUE**

**SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTO PARA  
DEPARTAMENTOS DE ESTRADAS  
DO NORDESTE BRASILEIRO**

Tese de Doutorado foi julgada adequada como parte das atividades para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 14 de Dezembro de 2007

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Márcio Muniz de Farias (UnB)**  
Pós-Doutorado pelo Nagoya Institute of Technology

**Prof. José Afonso Gonçalves de Macedo (UFCG)**  
Doutor (DSc.) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Profa. Carla Schwengber ten Caten (UFRGS)**  
Doutora (Dra.) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
Doutor (DSc.) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Profa. Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)**  
Doutora (Dra.) pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a todos os meus familiares, em especial a minha esposa, que, além do amor mútuo, é companheira em todas as horas, a minha mãe, pelo carinho e atenção em toda uma vida, ao meu sobrinho e afilhado Caio, para o qual tenho carinho especial, e ao meu pai, que está olhando por seus filhos de onde estiver  
*(in memoriam)*.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFRGS e a CONCEPA – Concessionária de Rodovias Osório-Porto Alegre S/A pela bolsa de estudos concedida, e pela oportunidade de aumentar o conhecimento prático em pavimentação interagindo com o setor privado.

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho, pela amizade construída e contribuição no aprendizado profissional.

Ao DER-PB, ao DERT-CE e a JBR Engenharia LTDA. pelo fornecimento de dados para a realização desta tese e para o desenvolvimento de metodologias aqui analisadas.

Agradeço a todas as amizades construídas em Porto Alegre, que ajudam a amenizar a saudade do meu Nordeste.

Agradeço em especial aos meus familiares (esposa, mãe, pai, irmãos, sobrinho e sogros) por estarem sempre presentes nas horas tranquilas e difíceis. Por serem aqueles que verdadeiramente acreditam no nosso potencial e que querem ver o crescimento dos seus.

Agradeço ao Nosso Senhor Jesus pela proteção e amor maior.

## RESUMO

ALBUQUERQUE, F.S. **Sistema de Gerência de Pavimento para Departamentos de Estradas do Nordeste Brasileiro**. 2007. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Um Sistema de Gerência de Pavimento (SGP) é capaz de coordenar um conjunto de atividades objetivando manter pavimentos em condições funcionais e estruturais adequadas às necessidades dos seus usuários, proporcionando uma estrutura para o desenvolvimento econômico e social. Esta tese teve como objetivo principal propor a estruturação necessária de um SGP apropriado aos Estados do Nordeste Brasileiro. Foram estudados os Estados do Ceará e da Paraíba, utilizando-se dados cadastrais das rodovias e de monitoramentos de IRI, IGG, PCR e Deflexão Máxima do pavimento (FWD e Viga Benkelman), fornecidos pelos Órgãos Rodoviários, para a avaliação das ferramentas propostas nesta tese. O diagnóstico da condição superficial dos pavimentos na data dos levantamentos, apontou conceito ruim para a malha da Paraíba e bom para a malha do Ceará. Foram estabelecidas Unidades de Amostragem, distribuídas por toda a malha rodoviária desses estados, utilizando ferramentas da Geoestatística para o seu dimensionamento, a qual permitiu determinar o espaçamento máximo entre amostras sem que se altere o perfil de desempenho dos trechos analisados. Constatou-se a possibilidade de reduzir a extensão de monitoramentos para 6,8% e 4,1% da malha, respectivamente para o Ceará e Paraíba. Foram ajustados modelos determinísticos por regressão para a previsão dos parâmetros de desempenho disponíveis, relacionando-os com o clima, a capacidade estrutural e solicitações de tráfego. A análise de consistência dos modelos confirmou as suas boas performances. As análises de priorização foram realizadas utilizando a Análise Multicriterial pelo Método PROMETHEE II, a partir de alternativas indicadas por Árvores de Decisão. Este método de análise, quando aplicado em nível de rede, permitiu avaliar como a consideração de várias óticas (financeira, técnica, sócio-econômica, ambiental e de tráfego) influenciam na tomada de decisão. A aplicação desta ferramenta em nível de projeto permitiu selecionar a estratégia de manutenção de pavimentos que reunisse em si as melhores condições de Custo do Ciclo Vida e serventia do pavimento para o cenário estabelecido.

Palavras-chave: pavimentos; gerência; desempenho; modelos; geoestatística; análise multicriterial; PROMETHEE II; Nordeste.

## ABSTRACT

ALBUQUERQUE, F.S. **Pavement Management System for Transportation Agencies of Brazilian Northeast**. 2007. Doctor Degree in Civil Engineering – Post-Graduation Program of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

A Pavement Management System (PMS) is capable of coordinating a set of activities with the purpose of keeping the pavement structural and functional in adequate levels, providing infrastructure for social and economic development. This thesis' objective was to develop a PMS structure suitable to the Brazilian Northeastern States. Data including IRI, PCR and deflection from road surveys and monitory of the States of Ceará and Paraíba were considered. Those data provided by the State Roads Departments, were used to evaluate same tools and procedures used in this thesis. The pavement surface condition of Paraíba Roads Network was evaluated as “poor”, while Ceará Roads Network was classified as “good”. Sampling Units, distributed along the State Roads Network, were established using Geostatistics tools allowing increasing lag spacing while keeping the performance of the analyzed sections. It was found that the length of surveyed sections may be reduced to 6.8% and 4.1% of Ceará and Paraíba State Roads Networks, respectively. Deterministic regression models were fitted to predict performance parameter based on regional climate, structural capacity and traffic loads. The models accuracy was proved. Priorization analysis was carried out based on the alternatives included in Decision Trees, using Multicriterial Analysis with PROMETHEE II Method. This analysis method, when applied in network level, allowed evaluating how taking into account several points-of-view (financial, technical, socio-economic, environmental and traffic) affects decision making. The application of this tool in project level allowed selecting pavement maintenance strategies with the lowest Life Cycle Cost and the highest pavement serviceability in a given scenario.

Key-words: pavements; management; performance; models; geostatistic; multicriterial analysis; PROMETHEE II; Northeast.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>16</b>
<b>SIGLAS</b> .....	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	21
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	24
1.3 ESTRUTURA DA TESE .....	25
<b>2 SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS</b> .....	<b>27</b>
2.1 HISTÓRICO .....	27
2.2 ESTRUTURAÇÃO DE SISTEMAS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS .....	29
2.2.1 Subsistemas do SGP .....	31
2.2.1.1 Banco de Dados .....	32
2.2.1.2 Subsistema de Pesquisa .....	35
2.2.1.3 Subsistema de Planejamento .....	37
2.2.1.4 Subsistema de Projeto .....	37
2.2.1.5 Subsistema de Construção e Manutenção .....	37
2.2.1.6 Subsistema de Avaliação e Monitoramento .....	38
2.2.2 Seleção de Alternativas .....	39
2.2.2.1 Priorização .....	41
<i>a) Classificação</i> .....	43
<i>b) Priorização Plurianual</i> .....	44
<i>c) Otimização</i> .....	45
2.2.3 Desenvolvimento de Estratégia .....	48
2.2.3.1 Ferramentas para Seleção de Estratégias de Intervenção .....	50
<i>a) Árvore de Decisão</i> .....	50
<i>b) Matriz de Decisão</i> .....	54
<i>c) Regras Programadas</i> .....	54
2.2.3.2 Indicação de Intervenção .....	54
2.2.3.3 Cálculo de Custos e Benefícios .....	55
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	59
<b>3 DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE AMOSTRAGEM</b> .....	<b>60</b>
3.1 CONCEITOS .....	60
3.2 ESTABELECIMENTO DE UNIDADES DE AMOSTRAGEM .....	62

3.3 GEORREFERENCIAMENTO DE RODOVIAS .....	64
3.4 OTIMIZAÇÃO DE AMOSTRAGENS .....	67
3.4.1 Krigagem .....	69
3.4.1.1 Variograma .....	70
3.4.1.2 Krigagem Ordinária .....	74
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	76
<b>4 PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>77</b>
4.1 DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS .....	78
4.1.1 Correção de Defeitos .....	80
4.1.2 Técnicas de Restauração .....	82
4.2 TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE DADOS .....	83
4.2.1 Irregularidade Longitudinal .....	84
4.2.2 Afundamento de Trilha de Roda .....	89
4.2.3 Inventário da Superfície do Pavimento .....	91
4.2.3.1 Índice de Gravidade Global .....	91
4.2.3.2 Índice de Condição do Pavimento .....	92
4.2.4 Levantamento de Deflexão .....	94
4.3 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS .....	98
4.3.1 Tipos de Modelos .....	100
4.3.2 Técnicas de Modelagem para Nível de Rede e Nível de Projeto .....	104
4.3.2.1 Modelos de Previsão de Desempenho em Nível de Rede .....	105
4.3.2.2 Modelos de Previsão de Desempenho em Nível de Projeto .....	107
<i>a) Número Estrutural Corrigido – SNC .....</i>	<i>108</i>
<i>b) Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão – <math>N_{acum}</math> .....</i>	<i>113</i>
4.3.3 ALGUNS MODELOS DE PREVISÃO DESENVOLVIDOS NO BRASIL .....	116
4.3.3.1 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Queiroz .....	117
4.3.3.2 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Paterson .....	118
4.3.3.3 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Marcon .....	120
4.3.3.4 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Yshiba .....	123
4.3.3.5 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Benevides .....	124
4.3.3.6 Modelo de Previsão de Redução da Irregularidade Desenvolvido por Lerch ....	125
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	126
<b>5 ANÁLISE MULTICRITÉRIAL: UMA FERRAMENTA PARA A TOMADA DE DECISÃO .....</b>	<b>127</b>
5.1 MÉTODO PROMETHEE .....	129

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	136
<b>6 METODOLOGIA PARA ESTRUTURAÇÃO DO SGP .....</b>	<b>137</b>
6.1 CASOS ESTUDADOS .....	138
6.1.1 Caso de Estudo – Ceará .....	138
6.1.2 Caso de Estudo – Paraíba .....	140
6.1.3 Classificação Pedológica da Região .....	142
6.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE .....	146
6.2.1 Dimensionamento de Unidades de Amostragem (UAs) .....	147
6.2.2 Elaboração de Modelos de Previsão de Desempenho .....	153
6.2.3 Elaboração de Árvores de Decisão .....	157
6.2.4 Priorização em Nível de Rede .....	160
6.2.4.1 Critérios Técnico-financeiros .....	162
6.2.4.2 Critérios Econômicos .....	163
6.2.4.3 Critérios Sociais .....	164
6.2.4.4 Critérios Ambientais .....	165
6.2.4.5 Critérios de Transporte .....	165
6.2.5 Priorização em Nível de Projeto .....	168
6.2.5.1 Critério Financeiro .....	168
6.2.5.2 Critérios Técnicos .....	169
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	169
<b>7 RESULTADOS E ANÁLISES DOS COMPONENTES TÉCNICOS DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS PROPOSTO .....</b>	<b>171</b>
7.1 DIAGNÓSTICO DAS MALHAS RODOVIÁRIAS .....	172
7.1.1 Diagnóstico da Malha da Paraíba .....	172
7.1.2 Diagnóstico da Malha do Ceará .....	178
7.2 DIMENSIONAMENTO DE UNIDADES DE AMOSTRAGEM .....	184
7.2.1 Dimensionamento de UA na Paraíba .....	185
7.2.2 Dimensionamento de UA no Ceará .....	190
7.3 PROPOSIÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA PAVIMENTOS DA MALHA RODOVIÁRIA DO NORDESTE .....	202
7.3.1 Modelos de Previsão de Desempenho Obtidos com Dados da Paraíba .....	204
7.3.2 Modelos de Previsão de Desempenho Obtidos com Dados do Ceará .....	213
7.3.3 Considerações Finais Sobre os Modelos de Previsão de Desempenho Elaborados com Dados da Paraíba e do Ceará .....	223
7.4 PRIORIZAÇÃO EM NÍVEL DE REDE .....	224

7.4.1 Priorização em Nível de Rede para a Malha Rodoviária da Paraíba .....	229
7.4.2 Priorização em Nível de Rede para a Malha Rodoviária do Ceará .....	231
7.5 OTIMIZAÇÃO EM NÍVEL DE PROJETO .....	233
7.5.1 Otimização em Nível de Projeto para Alguns Trechos da Malha Rodoviária da Paraíba .....	233
7.5.2 Otimização em Nível de Projeto para Alguns Trechos da Malha Rodoviária do Ceará .....	239
<b>8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>245</b>
8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	245
8.2 CONCLUSÕES .....	247
8.3 SUGESTÕES .....	250
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>252</b>
<b>APÊNDICE I</b>	
Variogramas dos Trechos Rodoviários analisados no Estado da Paraíba .....	262
<b>APÊNDICE II</b>	
Variogramas dos Trechos Rodoviários do Estado do Ceará .....	267
<b>APÊNDICE III</b>	
Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica no estado da Paraíba .....	281
<b>APÊNDICE IV</b>	
Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Tratamento Superficial no estado da Paraíba .....	284
<b>APÊNDICE V</b>	
Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica no estado do Ceará .....	288
<b>APÊNDICE VI</b>	
Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Tratamento Superficial no estado do Ceará .....	291
<b>APÊNDICE VII</b>	
Mapa Rodoviário do Estado da Paraíba .....	295
<b>APÊNDICE VIII</b>	
Mapa Rodoviário do Estado do Ceará .....	297
<b>APÊNDICE IX</b>	
Tabelas de Cálculo da Análise Multicriterial em Nível de Rede .....	299

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estágio de desenvolvimento e implantação de SGP em Departamentos de Estradas do Brasil .....	22
Figura 2: Hierarquia de um SGP .....	31
Figura 3: Macro-fluxo de um SGP .....	32
Figura 4: Atividades do SGP que interagem com o banco de dados .....	33
Figura 5: Recomendação de intervenções de acordo com o índice de condição .....	36
Figura 6: Ordem de aprimoramento das técnicas de suporte à decisão .....	43
Figura 7: Processo de classificação .....	44
Figura 8: Processo de priorização plurianual .....	45
Figura 9: Processo de otimização .....	45
Figura 10: Árvore de decisão de necessidade de manutenção .....	51
Figura 11: Seleção de medida de restauração .....	52
Figura 12: Seleção de medida de conservação .....	53
Figura 13: Forma de Cálculo do Benefício em estratégia de intervenção .....	58
Figura 14: Esquema gráfico da definição de Unidades de amostragem de acordo com a metodologia do DNIT .....	63
Figura 15: Comparação entre os métodos de Georreferenciamento Linear de Rodovias .....	66
Figura 16: Identificação espacial da BR-230/PB .....	67
Figura 17: Comparação entre médias de valores reais de parâmetros de desempenho e médias de bancos de dados reduzidos por ferramentas da Geoestatística .....	69
Figura 18: Exemplo de semivariograma .....	72
Figura 19: Tipos de modelagens de semivariogramas experimentais .....	73
Figura 20: Defeitos de superfície em pavimentos asfálticos .....	79
Figura 21: Conjunto de equipamentos dos medidores tipo resposta .....	85
Figura 22: Perfilômetro a laser – esquema do funcionamento dos sensores .....	86
Figura 23: Medidor de Irregularidade MERLIN .....	87
Figura 24: Treliça de alumínio .....	89
Figura 25: Sensores no levantamento de afundamento de trilha de roda .....	90
Figura 26: Classificação Funcional pelo <i>PCR</i> .....	94
Figura 27: Elementos constituintes da Viga Benkelman .....	95
Figura 28: Esquema do ensaio com a Viga Benkelman .....	96
Figura 29: Bacia de Deformação gerada por Defletômetro de Impacto .....	97

Figura 30: Exemplo ilustrativo da hierarquização resultante da aplicação do PROMETHEE I .....	134
Figura 31: Exemplo ilustrativo da hierarquização resultante da aplicação do PROMETHEE II .....	135
Figura 32: Mapa rodoviário do Estado do Ceará .....	139
Figura 33: Mapa rodoviário do Estado da Paraíba .....	141
Figura 34: Horizontes constitutivos de solos considerados no SiBCS .....	143
Figura 35: Mapa de Solos dos Estados da Paraíba e do Ceará .....	144
Figura 36: Alguns perfis típicos de solos da Paraíba e do Ceará .....	145
Figura 37: Macro-Fluxo de Atividades para Estruturação do SGP Proposto .....	147
Figura 38: Mapa de Classificação Climática em função do Índice de Aridez dos estados da Paraíba e do Ceará .....	150
Figura 39: Exemplo de Modelagem de Variograma de Dados de IGG .....	152
Figura 40: Árvore de Decisão para Análise de SGP em Nível de Rede .....	158
Figura 41: Árvore de Decisão para Análise de SGP em Nível de Projeto .....	159
Figura 42: Árvore de Decisão para Análise de Dimensionamento de Pavimento .....	161
Figura 43: Mapeamento do Potencial Agrícola dos Estados estudados .....	164
Figura 44: Mapeamento das Unidades de Proteção Ambiental nos Estados estudados ..	166
Figura 45: Critérios, Funções Preferência e Pesos para Priorização no SGP em Nível de Rede .....	167
Figura 46: Critérios, Funções Preferência e Pesos para Priorização no SGP em Nível de Projeto .....	170
Figura 47: Distribuição de frequência de deflexão na malha rodoviária do Estado da Paraíba .....	174
Figura 48: Distribuição de frequência de <i>IGG</i> na malha rodoviária do Estado da Paraíba .....	175
Figura 49: Trincamento de bloco, não associado às cargas de tráfego, no km 1+600 da PB-079 (revestimento em CBUQ) .....	177
Figura 50: Desgaste em TSD oxidado no km 1+500 da PB-054 .....	177
Figura 51: Distribuição de frequência de deflexão na malha rodoviária do Estado do Ceará .....	180
Figura 52: Distribuição de frequência de <i>IRI</i> na malha rodoviária do Estado do Ceará. ....	181
Figura 53: Distribuição de frequência de <i>PCR</i> na malha rodoviária do Estado do Ceará .....	182
Figura 54: Distribuição de frequência de defeitos predominantes em pavimentos do Ceará .....	183
Figura 55: Representação típica do <i>Nugget Effect</i> na variância de krigagem de <i>IGG</i> para rodovias da Paraíba (PB-238) .....	188

Figura 56: Representação típica do <i>Nugget Effect</i> na variância de krigagem para rodovias do Ceará (187ECE0210 a 187ECE0530) .....	200
Figura 57: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>IGG</i> para Mistura Asfáltica e observados em campo .....	211
Figura 58: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>Do<sub>VB</sub></i> para Mistura Asfáltica e observados em campo .....	211
Figura 59: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>IGG</i> para Tratamento Superficial e observados em campo .....	212
Figura 60: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>Do<sub>VB</sub></i> para Tratamento Superficial e observados em campo .....	212
Figura 61: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>PCR</i> para Mistura Asfáltica e observados em campo .....	220
Figura 62: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>IRI</i> para Mistura Asfáltica e observados em campo .....	220
Figura 63: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>Do<sub>FWD</sub></i> para Mistura Asfáltica e observados em campo .....	221
Figura 64: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>PCR</i> para Tratamento Superficial e observados em campo .....	221
Figura 65: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>IRI</i> para Tratamento Superficial e observados em campo .....	222
Figura 66: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de <i>Do<sub>FWD</sub></i> para Tratamento Superficial e observados em campo .....	222
Figura 67: Gráfico do <i>CCV</i> (período de análise de 10 anos) para estratégias elencadas em trechos rodoviários da Paraíba .....	236
Figura 68: Hierarquização para os trechos rodoviários da Paraíba (nível de projeto) ...	238
Figura 69: Gráfico do <i>CCV</i> (período de análise de 10 anos) para estratégias elencadas em trechos rodoviários do Ceará .....	242
Figura 70: Hierarquização para os trechos rodoviários da Paraíba (nível de projeto) ...	244

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados relevantes para criação de um banco de dados .....	34
Tabela 2: Tabela para Auxílio à Tomada de Decisão da AASHTO .....	48
Tabela 3: Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG .....	92
Tabela 4: Método de Cálculo do <i>PCR</i> .....	93
Tabela 5: Tipos de modelos de desempenho .....	101
Tabela 6: Requisitos estatísticos no estabelecimento de modelos de previsão de desempenho .....	103
Tabela 7: Equações para cálculo de fatores de equivalência .....	115
Tabela 8: Funções Preferência do Método PROMETHEE .....	131
Tabela 9: Dados da malha rodoviária do Estado do Ceará .....	138
Tabela 10: Dados da malha rodoviária do Estado da Paraíba .....	141
Tabela 11: Classificação Climática de acordo com a Temperatura .....	149
Tabela 12: Codificação para as variáveis independentes <i>S</i> e <i>N</i> .....	156
Tabela 13: Codificação para a variável independente <i>C</i> .....	156
Tabela 14: Custos de Alternativas em Nível de Rede para Pista Simples .....	162
Tabela 15: Diagnóstico da Malha Rodoviária da Paraíba .....	173
Tabela 16: Diagnóstico da Malha Rodoviária do Ceará .....	179
Tabela 17: Dimensionamento de UAs, em função do <i>IGG</i> , para Rodovias da Paraíba .	186
Tabela 18: Comparação de custos entre o plano de monitoramento tradicional e otimizado para as rodovias estudadas na Paraíba .....	190
Tabela 19: Dimensionamento de Unidades de Amostragem para Rodovias do Ceará ..	191
Tabela 20: Comparação de custos entre o plano de monitoramento tradicional e otimizado para a malha rodoviária estadual do Ceará .....	201
Tabela 21: Resumo dos dados utilizados em modelos de previsão de desempenho na Paraíba .....	206
Tabela 22: Parâmetros do Modelo de Previsão de <i>IGG</i> (Mistura Asfáltica) .....	206
Tabela 23: Parâmetros do Modelo de Previsão de <i>DO<sub>VB</sub></i> (Mistura Asfáltica) .....	206
Tabela 24: Parâmetros do Modelo de Previsão de <i>IGG</i> (Tratamento Superficial) .....	207
Tabela 25: Parâmetros do Modelo de Previsão de <i>DO<sub>VB</sub></i> (Tratamento Superficial) .....	207
Tabela 26: Codificação para as variáveis independentes <i>C</i> , <i>S</i> e <i>N</i> .....	208
Tabela 27: Resumo dos dados utilizados em modelos de previsão de desempenho no Ceará .....	215
Tabela 28: Parâmetros do Modelo de Previsão de <i>PCR</i> (Mistura Asfáltica) .....	216
Tabela 29: Parâmetros do Modelo de Previsão de <i>IRI</i> (Mistura Asfáltica) .....	216

Tabela 30: Parâmetros do Modelo de Previsão de $DO_{FWD}$ (Mistura Asfáltica) .....	216
Tabela 31: Parâmetros do Modelo de Previsão de $PCR$ (Tratamento Superficial) .....	217
Tabela 32: Parâmetros do Modelo de Previsão de $IRI$ (Tratamento Superficial) .....	217
Tabela 33: Parâmetros do Modelo de Previsão de $DO_{FWD}$ (Tratamento Superficial) .....	217
Tabela 34: Resumo do Efeito de Cada Variável Codificada nos Modelos de Previsão de Desempenho Elaborados com Dados da Paraíba e do Ceará .....	223
Tabela 35: Previsão de desempenho para os trechos analisados na priorização em nível de rede .....	225
Tabela 36: Planilha de Dados para Análise Multicriterial em Nível de Rede .....	227
Tabela 37: Comparativo de métodos de priorização em nível de rede na Paraíba .....	230
Tabela 38: Comparativo de métodos de priorização em nível de rede no Ceará .....	232
Tabela 39: Elenco de estratégias de manutenção em nível de projeto (estado da Paraíba) .....	234
Tabela 40: Detalhamento dos cálculos para previsão de desempenho na análise em nível de projeto (trechos rodoviários da Paraíba) .....	235
Tabela 41: Previsões realizadas para o trecho PB-073/001 e funções preferência .....	237
Tabela 42: Previsões realizadas para o trecho PB-004/007 e funções preferência .....	237
Tabela 43: Elenco de estratégias de manutenção em nível de projeto (estado do Ceará) .....	239
Tabela 44: Detalhamento dos cálculos para previsão de desempenho na análise em nível de projeto (trechos rodoviários do Ceará) .....	241
Tabela 45: Previsões realizadas para o trecho 354ECE0210 e funções preferência ...	243
Tabela 46: Previsões realizadas para o trecho 040ECE0030D e funções preferência ...	243

## SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

CNT: Confederação Nacional de Transportes

DER/PB: Departamento de Estradas de Rodagem da Paraíba

DETR/CE: Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Ceará

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (extinto)

DNIT: Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

IGG: Índice de Gravidade Global

IRI: *International Roughness Index*

N<sub>acum</sub>: Número Acumulado de Solicitações do Eixo Padrão pelo método da AASHTO

PCI: *Pavement Condition Index*

PCR: *Pavement Condition Rating*

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

QI: Quociente de Irregularidade

SH: Segmento Homogêneo

SNC: Número Estrutural Corrigido

SGP: Sistema de Gerência de Pavimento

ST: Segmento Testemunha

UA: Unidade de Amostragem

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VDM: Volume Diário Médio (veículos)

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os anos 1950, o sistema rodoviário tem assumido grande destaque na economia nacional como principal meio de transporte de cargas do interior do país para seus principais centros consumidores e para exportações.

Para que a infra-estrutura rodoviária assumisse tal importância, muitos investimentos foram realizados ao longo de 30 anos, promovendo a ligação entre as mais distantes localidades do país, servindo também como uma estratégia para alavancar o desenvolvimento de regiões menos favorecidas como o Nordeste Brasileiro.

Nos últimos 25 anos, quando o Brasil somou 196.093,9 km de rodovias pavimentadas, incluindo estradas federais, estaduais e municipais (ANTT, 2006), ocorreu uma queda brusca de serventia da malha rodoviária, sendo este panorama mais acentuado no Nordeste. Os investimentos que antes objetivavam a construção de novas rodovias não foram revertidos na

mínimas de serviço, a partir de um orçamento predefinido, num período de tempo determinado.

A tomada de decisão para intervenções em rodovias deve ser coordenada e factual, de forma a atender às necessidades de todas as partes interessadas.

Quando se pensa em obras de pavimentação rodoviária, responsáveis por movimentar recursos financeiros elevados, causando grandes impactos sociais e ambientais, envolvendo interesses políticos, constata-se que a simples análise da otimização dos custos e do desempenho futuro do pavimento (funcional e estrutural) não é suficiente para a tomada de decisão. Isto fica mais claro quando as soluções otimizadas, do ponto de vista benefício/custo, fornecidas por equipes técnicas das empresas tomadoras de decisão no meio rodoviário, raramente são aplicadas fielmente em campanhas de manutenção de rodovias, muitas vezes pela falta de análise de fatores sócio-econômicos e ambientais na etapa de planejamento.

Quando a análise para a tomada de decisão compreende a otimização de vários critérios (financeiro, técnico, ambiental, sócio-econômico etc.), a probabilidade de sucesso aumenta substancialmente, pois são atendidas, “da melhor forma possível”, as necessidades de cada parte interessada. Numa análise com vários critérios envolvidos (chamada de Análise Multicriterial), nenhum dos mesmos é atendido em 100%, mas adota-se a solução que reúne as melhores condições para o cenário analisado.

Existem vários métodos de tomada de decisão a partir de análise multicriterial. Um dos mais conhecidos e utilizados mundialmente na atualidade é o Método PROMETHEE (Lopes, 2005). Todos esses métodos devem ser utilizados a partir de critérios de análise bem definidos, compatíveis com as restrições inerentes aos processos do sistema e baseados em dados confiáveis.

Nesta tese de doutorado é proposta uma estruturação técnica de um Sistema de Gerência de Pavimentos, para infra-estrutura rodoviária (especificamente para pavimentos asfálticos), apropriada às condições de estados do Nordeste Brasileiro. Essa estruturação compreenderá o dimensionamento de unidades de amostragem para levantamento de dados de desempenho, elaboração de modelos de previsão de desempenho de pavimentos e a aplicação do processo de Análise Multicriterial na definição de estratégias de manutenção mais adequada à malha rodoviária.

Todas as análises descritas anteriormente são aplicadas em dois casos de estudo, para dados dos Estados do Ceará e da Paraíba, ambos no Nordeste Brasileiro.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O sistema rodoviário brasileiro, conforme mencionado em pesquisas da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) – Números sobre Transporte Terrestre – (ANTT, 2006), foi responsável por 46,8% do volume de cargas transportado e por 61,1% em valor monetário, do total registrado no ano de 2004. Além disso, transportou cerca de 95% dos passageiros do total registrado no ano de 2002.

Esses números confirmam a grande importância do sistema rodoviário para a economia do país. No entanto, os custos de transporte têm-se elevado acentuadamente, o que ocasiona a perda de competitividade dos produtos brasileiros, muitas vezes inviabilizando exportações. A elevação dos custos de transporte se deve principalmente às precárias condições dos pavimentos em todo o território nacional, sendo mais acentuada no Nordeste.

O Boletim Estatístico Confederação Nacional do Transporte (CNT) de 2005 (CNT, 2005), adotando metodologia de levantamento visual dos principais grupos de defeitos (DNIT 009/2003 – PRO), apontou que 13,9% dos pavimentos da malha rodoviária federal do Nordeste encontravam-se em péssimo estado, 18,3% em estado ruim e 30,7% em estado deficiente. A reversão deste quadro previa investimentos de 1,0 bilhão de reais em reconstrução e 2,5 bilhões de reais em restauração.

Estes investimentos poderiam ser bem inferiores caso técnicas de Gerência de Pavimentos estivessem sendo devidamente aplicadas pelas organizações responsáveis pela administração de malhas rodoviárias.

Só recentemente tem-se observado um consenso para a aplicação de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) nos estados brasileiros. Logicamente isso foi impulsionado por agentes externos, como é o caso do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), que propôs a implantação de um SGP em três etapas. A primeira etapa se refere ao reconhecimento da malha e estruturação de Banco de Dados (SIB – Sistema de Informações Básicas), a segunda refere-se à implantação de sistema de gerência para analisar estratégias de manutenção de

rodovias (SAM – Sistema de Administração da Manutenção) e, em uma última etapa, um sistema de gerência capaz de analisar estratégias de manutenção, melhoramento e implantação de rodovias (SGP – Sistema de Gerência de Pavimento).

Muitos estados brasileiros já iniciaram a implantação de SGP, mas a maioria (principalmente no Nordeste Brasileiro) encontra-se sem continuidade devido à grande dependência do repasse de *know-how* por parte de instituições detentoras de conhecimento e posterior capacitação de seu corpo técnico. A Figura 1 apresenta os estados do Brasil onde já existe SGP em funcionamento. Nenhum desses estados está localizado na região Nordeste.



Figura 1: Estágio de desenvolvimento e implantação de SGP em Departamentos de Estradas do Brasil (levantamento do autor).

Ainda, a estruturação de um SGP requer o estabelecimento de Unidades de Amostragem, desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho e a escolha do método mais apropriado para a otimização na seleção de estratégias de manutenção da malha rodoviária. Esta última etapa, a otimização, é o objetivo maior de um SGP, pois o foco da análise é a escolha de estratégia que forneça os maiores benefícios possíveis a um menor custo.

Quando se analisa uma obra de pavimentação, que afeta profundamente o meio ambiente e os diversos setores da sociedade, os benefícios não podem ser observados apenas do ponto de vista técnico (desempenho do pavimento), como tem sido feito até então (ex.: método utilizado pelo programa HDM – *Highway Development and Management*). Também devem ser levados em consideração os pontos de vista sócio-econômico e ambiental. Devido à complexidade da análise, onde vários critérios devem ser atendidos, é necessário aplicar-se uma Análise Multicriterial, método recentemente sugerido pela *Federal Highway Administration* – FHWA (NHI, 2002) para a priorização na seleção de estratégias de manutenção de pavimentos em um SGP.

Os principais benefícios da aplicação de um SGP utilizando o método de Análise Multicriterial para a seleção de estratégias de pavimentação rodoviária no Nordeste são:

- Racionalizar, otimizar e estabelecer a programação de prioridades de manutenção da malha rodoviária, assegurando um sistema de transporte seguro, econômico e confortável;
- Inserir critérios sócio-econômicos na escolha de estratégias de intervenção (estratégia que impulse o maior desenvolvimento social e econômico possível);
- Selecionar alternativas de manutenção que tenham também um bom desempenho ambiental (menos poluidora possível, mais renovável possível etc.);
- Determinar o tempo ótimo para as intervenções a partir de modelos de desempenho, obtendo o maior retorno para os recursos disponíveis;
- Manter os pavimentos da malha rodoviária em condições aceitáveis para os usuários, ao menor custo total de transporte;
- Identificar os trechos que necessitam ser reabilitados para que possam ser definidos os projetos básicos e, também, para incluí-los em futuros financiamentos;
- Estabelecer uma programação anual da conservação rotineira; e
- Auxiliar no monitoramento, no acompanhamento, coordenação e tomada de decisão sobre a malha rodoviária, retroalimentando todo o processo.

Nesta tese são, portanto, definidos e aplicados, a partir de estudo de caso para dados dos Estados do Ceará e Paraíba, os componentes responsáveis pela estruturação de um SGP para pavimentos asfálticos, que atenda as necessidades descritas anteriormente. Compreenderá o uso e avaliação de técnicas que promoverão redução de custos, um melhor desempenho técnico do sistema e atendimento aos múltiplos interesses existentes no setor rodoviário. São eles:

- Avaliação da Geoestatística (método de estimativa de dados em locais não amostrados) como uma ferramenta de otimização de amostragem em campanhas de monitoramento de desempenho de pavimentos. Dados reais de desempenho de pavimentos, levantados em campanhas de monitoramento, são comparados com dados estimados por esta ferramenta para avaliar a quantidade de segmentos ótima para amostragem na malha rodoviária;
- Proposição de Modelos Empíricos de Previsão de Desempenho de Pavimentos. A sua avaliação é feita a partir de análise por teste de significância e de erros de inferência;
- Aplicação do processo de Análise Multicriterial, definindo estratégias de manutenção de pavimentos nas malhas rodoviárias. Para tanto, são definidos todos os critérios que devem ser adotados na análise.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral desta tese é realizar a estruturação técnica dos componentes necessários a um Sistema de Gerência de Pavimentos para a infra-estrutura da malha rodoviária com revestimento asfáltico de estados nordestinos. Esta estruturação é realizada a partir de dois “casos estudados” (Estados do Ceará e Paraíba), com dados de desempenho de pavimentos disponibilizados por Órgãos Rodoviários.

Os objetivos específicos desta tese são os seguintes:

- Estruturação do Banco de Dados com Características Técnicas da infra-estrutura rodoviária para os casos estudados;

- Realização de diagnóstico das malhas rodoviárias estudadas e avaliação dos principais mecanismos de deterioração de pavimentos nas mesmas;
- Descrição da metodologia e aplicação de ferramentas da Geoestatística para dimensionar unidades de amostragem para o levantamento de dados de desempenho nas malhas rodoviárias analisadas;
- Formulação de Modelos Estatísticos de Previsão de Desempenho para Pavimentos das malhas rodoviárias estudadas (apenas revestimentos asfálticos); e
- Descrição da metodologia e aplicação da Análise Multicriterial pelo método PROMETHEE II em priorização em nível de rede e na otimização de estratégias de manutenção de pavimentos nas malhas rodoviárias dos “casos estudados”.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada como se segue:

- No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o tema Sistema de Gerência de Pavimentos. Apresentam-se um breve histórico sobre o tema, noções básicas a respeito de sistemas de gerência e a estruturação mínima dos subsistemas e atividades que compõem um SGP.
- O Capítulo 3 aborda uma proposta de estabelecimento de Unidades de Amostragem de Pavimentos. São apresentados os critérios básicos que influenciam nos seus estabelecimentos e a base teórica dos procedimentos da Geoestatística, ferramenta recentemente testada e analisada no PPGE/UFGRS para otimização em campanhas de amostragens.
- No Capítulo 4 são discutidos os sistemas de degradação em pavimentos asfálticos. Além disso, são estabelecidas as medidas básicas de manutenção necessárias para suas correções e os métodos de levantamentos de dados mais utilizados em campo. Na última parte deste capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre os tipos de modelos de desempenho, abordando-se sua elaboração, discutindo-se quais são mais apropriados para uso em nível de rede e projeto e apresentado estudos já realizados.

- O Capítulo 5 apresenta os conceitos básicos sobre Análise Multicriterial pelo Método PROMETHEE II, ferramenta essa apropriada para priorização ou na otimização de estratégias de manutenção quando existem múltiplos critérios analisados que não podem ser traduzidos monetariamente;
- No Capítulo 6 são apontadas às diretrizes da metodologia para estruturação do Modelo de Sistema de Gerência de Pavimentos proposto. São descritos os dados a serem utilizados para a validação da metodologia proposta, determinadas as diretrizes para estabelecimento das Unidades de Amostragem, como foram elaborados Modelos de Previsão de Desempenho e apresentadas as Árvore de Decisão estabelecidas. Neste mesmo capítulo serão estabelecidos os critérios utilizados em análises de priorização de intervenção (hierarquização) e de otimização de alternativas de manutenção em Nível de Rede e em Nível de Projeto (ambos com o método PROMETHEE II).
- No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Estes resultados apresentados e discutidos, compreendem o diagnóstico das malhas rodoviárias estudadas, o dimensionamento de unidades de amostragem, os modelos de previsão de desempenho e suas análises de consistência, e os resultados de priorização em nível de rede e projeto.
- O Capítulo 8 apresenta as conclusões baseadas nos resultados obtidos e discutidas. São apresentados também os pontos fortes e fracos da metodologia adotada, e sugeridas novas oportunidades de pesquisa derivadas desta tese.

## 2 SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

### 2.1 HISTÓRICO

Um Sistema de Gerência de Pavimento (SGP) é um conjunto amplo e coordenado de atividades integradas com planejamento, construção, manutenção, avaliação e pesquisa, associados a um banco de dados, objetivando otimizar os recursos para o estabelecimento de programas de manutenção, proporcionando conforto e segurança ao usuário (Haas *et al.*, 1994).

Os conceitos e aplicação de Sistema de Gerência de Pavimentos surgiram nos Estados Unidos da América.

O SGP mais antigo foi desenvolvido nos EUA na metade dos anos de 1970, já utilizando um banco de dados digital. O desenvolvimento do SGP foi impulsionado pela necessidade de conservar a malha rodoviária existente (NHI, 1998).

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) publicou o seu primeiro guia sobre gerência de pavimentos em 1985, válido em todo o território americano. Logo depois, o *Federal Highway Administration* (FHWA) estabeleceu que todos os estados norte americanos tinham que implantar um SGP para as suas malhas rodoviárias federais (rodovias interestaduais e principais), como requisito para receber investimentos (NHI, 1998).

Estes dois fatos impulsionaram os estados americanos a implantarem SGPs, com a maior parte deles já tendo o feito na segunda metade dos anos 1980. Em 1994, 58 das 60 agências (50 estados norte-americanos, 9 províncias canadenses e o Distrito de Columbia) já tinham implantado um SGP (NHI, 1998).

No ano de 1990 a AASHTO publicou um guia de SGP, elaborado por Fred Finn e Dade Paterson, mais completo que a versão de 1985, que, por sua vez, foi substituída em 2001,

quando foi publicado o guia mais recente sobre SGP da AASHTO chamado *Pavement Management Guide* (AASHTO, 2001).

Os conceitos e necessidades de implantação de Sistemas de Gerência de Pavimentos logo se espalharam pelo mundo, em grande parte impulsionado pelo programa *Highway Development and Management* (HDM) do *World Bank*, sendo a aplicação de sua metodologia requerida para a obtenção de investimentos em infra-estrutura rodoviária.

Com essa imposição, países em desenvolvimento vêm aplicando a metodologia do HDM desde os anos 1980, quando foi desenvolvida a primeira versão do software HDM-III, com base técnica conceitual estabelecida nestes países, principalmente através das pesquisas de Queiroz (1981), Watanatada *et al.* (1987) e Paterson (1987).

A versão HDM-III foi utilizada por duas décadas, combinando análises técnica e econômica de projetos de rodovias, para preparar programas de investimentos em rodovias e análise de estratégias.

A versão atual do software é o HDM-4, na qual foram implementadas novas ferramentas que auxiliam na análise regionalizada, permitindo a calibração de modelos utilizados no *software* e conhecimentos locais de engenharia.

Países desenvolvidos optaram pela implantação de SGPs próprios, considerando pesquisas de base técnica realizadas nas suas malhas rodoviárias. Exemplos de SGPs bem sucedidos podem ser observados, além dos Estados Unidos (sobretudo alguns estados americanos), em países como Canadá, na Comunidade Européia, Austrália e Nova Zelândia.

Essa realidade tem-se expandido para países de economia periférica, podendo-se destacar a República Sul-Africana e o Brasil.

No Brasil, apesar da participação nas pesquisas para desenvolvimento das primeiras versões do HDM nos anos 1970 (HDM-I e HDM-II), a implantação de um SGP no DNER (atualmente incorporado ao DNIT) só se deu a partir de 1982, quando a Direção do Órgão, por iniciativa do Instituto de Pesquisas Rodoviárias, criou a Comissão Permanente de Gerência de Pavimentos – CPGP (Visconti, 2000).

Inicialmente a CPGP utilizou o chamado Índice de Suficiência para priorizar projetos de restauração de pavimentos. Este índice não levava em conta fatores de ordem econômica, mas

ponderava informações que refletiam as condições de conservação e de utilização da rodovia, sendo aceito na época pelo Banco Mundial (Visconti, 2000).

Segundo Visconti (2000), a partir de 1985 o DNER começou a utilizar a metodologia e os procedimentos para utilização dos resultados dos levantamentos de campo do modelo HDM-III, com o objetivo de selecionar economicamente as alternativas de manutenção para todos os trechos da rede federal pavimentada. A metodologia do HDM-III foi completamente implantada em 1990, quando o Banco Mundial avaliou como incompleta a metodologia de levantamento de defeitos em superfície (levantamento visual contínuo) realizada pelo DNER. O Banco Mundial ainda determinou, em complementação à avaliação econômica com o HDM-III, a necessidade de utilização de modelo para avaliar as estratégias de manutenção rodoviária em condição de restrição orçamentária (modelo EBM).

No início dos anos 2000, o Brasil migrou para a utilização do novo modelo de análise técnica e econômica de rodovias do Banco Mundial (o HDM-4).

Muitos dos estados brasileiros utilizam atualmente o HDM-4, mas estão em fase de implantação de SGPs próprios para suas malhas rodoviárias (a maioria em estruturação de Bancos de Dados).

As próximas seções deste capítulo têm por objetivo esclarecer as bases conceituais de Sistemas de Gerência de Pavimentos.

## 2.2 ESTRUTURAÇÃO DE SISTEMAS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

O Guia da AASHTO, na sua nova versão de 2001 (AASHTO, 2001), descreve um SGP como um conjunto de ferramentas ou métodos que auxiliam os tomadores de decisão a encontrar uma estratégia ótima para fornecer, avaliar e manter pavimentos em condições de serviço adequadas ao longo do tempo.

Nessa ótica, um Sistema de Gerência de Pavimentos, na verdade, consiste em um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) usado para ajudar a conciliar os menores investimentos possíveis com um nível desejado de serviço do pavimento ou malha rodoviária, através de programas de manutenção e restauração de pavimentos (NHI, 1998).

O objetivo de um SAD é de ajudar indivíduos que tomam decisões na solução de problemas não estruturados (ou parcialmente estruturados).

Problemas não estruturados são aqueles para os quais não existem soluções através de algoritmos bem definidos, não sendo facilmente tratados por computador, necessitando, portanto, de uma interação entre homem e máquina. Neste aspecto o computador deve ser colocado como uma ferramenta do SAD (e portanto de um SGP), auxiliando os tomadores de decisão na missão de decidir.

É importante afirmar que o SGP realiza todo o processamento de dados, normalmente através de um sistema informatizado, mas a decisão é sempre tomada por pessoas.

Então um SGP é uma ferramenta para decidir pela aplicação de múltiplas estratégias de intervenção nos pavimentos, isto de acordo com as condições superficiais e estruturais mínimas desejáveis e com as restrições orçamentárias enfrentadas.

A gerência de pavimentos ainda é subdividida em uma estrutura hierárquica (Figura 2) de três níveis diferentes (Haas *et al.*, 1994). O primeiro nível é um Nível Administrativo, em que os fundos são alocados entre categorias diferentes da infra-estrutura de transporte (obras de arte, obras de sinalização, obras de pavimentação etc.). O segundo nível, Nível de Rede, as agências de gerência de pavimentos determinam as estratégias de intervenção, identificam as necessidades da malha e programam as atividades de intervenção. Baseado nos resultados otimizados do processo de priorização, as agências indicam os recursos que serão aplicados à rede. Os tratamentos detalhados das intervenções são tratados no nível do projeto. Os dois últimos níveis são os considerados de atuação da engenharia rodoviária e podem ser diferenciados quanto (AASHTO, 2001):

- Aos objetivos e propósitos de decisão;
- Aos grupos e níveis que a organização realizam suas decisões;
- Ao número de grupos, ou de pessoas, necessárias para desenvolver e revisar as prioridades recomendadas para submeter aos responsáveis pela decisão;
- Ao número de níveis de gerência envolvidos na análise; e
- Ao detalhamento de dados e informações necessárias para dar suporte às decisões.

O guia de SGP da AASHTO (2001) determina que um SGP em nível de rede inclua: o estabelecimento de programas de conservação de pavimentos, identificação de prioridades, estimativa das necessidades de investimentos, e alocação de capitais para manutenção, restauração e reconstrução. Já o SGP em nível de projeto seleciona atividades específicas de manutenção, restauração e reconstrução em segmentos definidos de pavimentos.

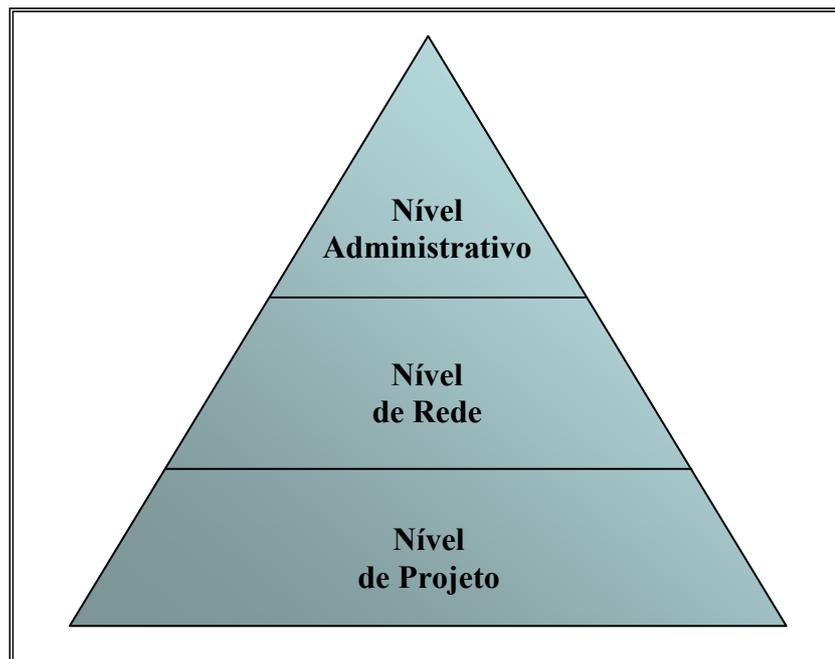


Figura 2: Hierarquia de um SGP (Fonte: Zheng Li, 2005; Pantelias, 2005).

### 2.2.1 Subsistemas do SGP

Um Sistema de Gerência de Pavimentos é constituído, usualmente, pelos seguintes componentes (NHI, 1998; Cardoso *et al.*, 2000; Rodrigues, 2003; AASHTO, 2001):

- Banco de dados;
- Subsistema de pesquisa;
- Subsistema de planejamento;

- Subsistema de projeto;
- Subsistema de construção e manutenção; e
- Subsistema de avaliação e monitoramento.

Esses subsistemas, devidamente estruturados, levam um SGP a funcionar de maneira coordenada, conforme o fluxo da Figura 3. Nas seções seguintes serão descritos, resumidamente, o que consiste cada subsistema que compõe um SGP.

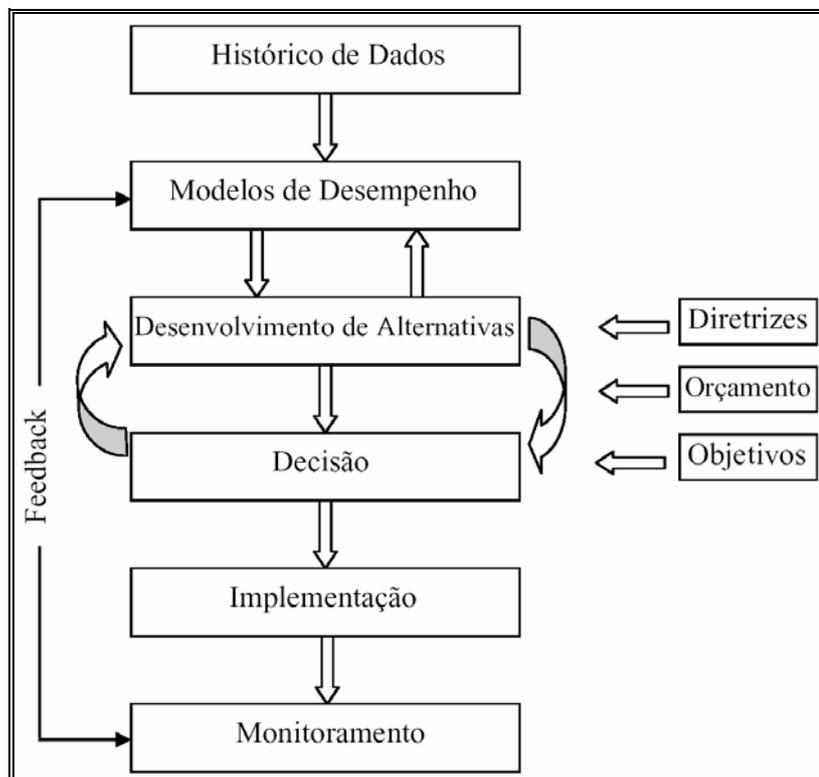


Figura 3: Macro-fluxo de um SGP (Fonte: Zheng Li, 2005; Cambridge Systematics, 2002).

#### 2.2.1.1 Banco de Dados

O banco de dados (Figura 4) é uma ferramenta bastante importante e utilizada em SGP, devendo ser bem estruturado e conter dados confiáveis. Este mesmo banco de dados interage

com as demais partes integrantes de um SGP, devendo conter informações necessárias aos subsistemas (Tabela 1).

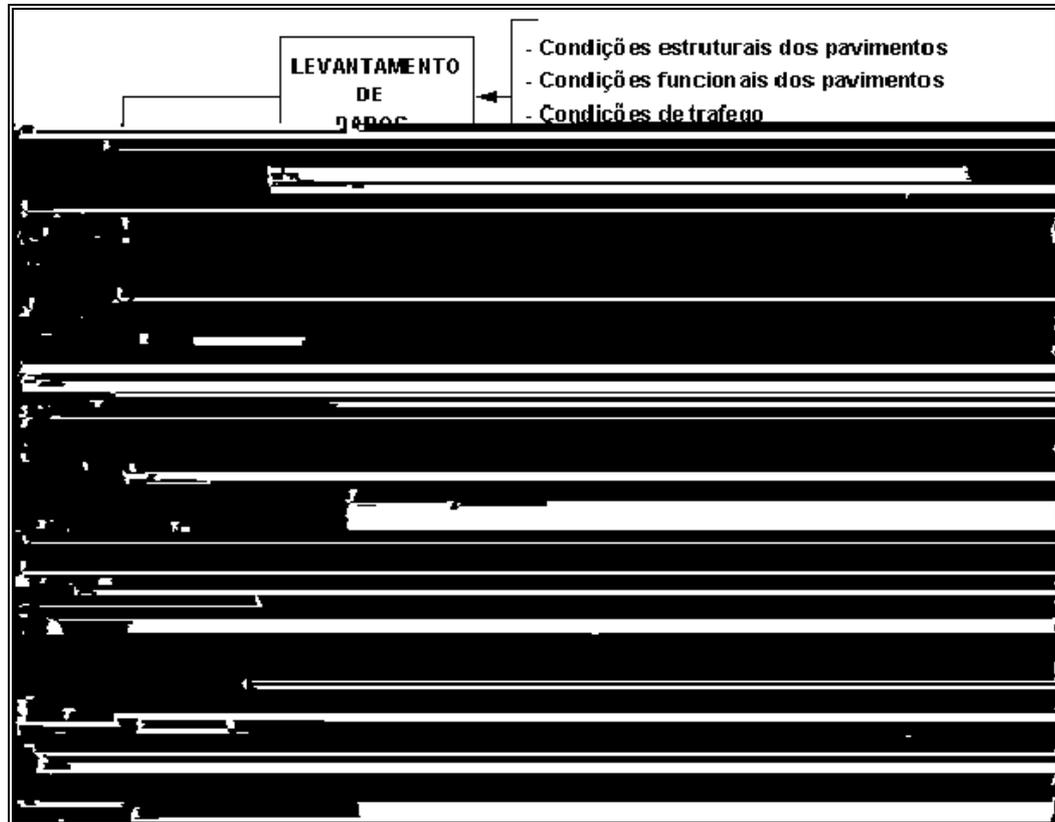


Figura 4: Atividades do SGP que interagem com o banco de dados (Fonte: Cardoso, 1994).

No âmbito técnico, mas em consonância com a realidade econômica da região de uma determinada malha rodoviária, as características ambientais da região, o histórico de intervenções e a geometria das rodovias devem sofrer um estudo minucioso, inclusive em arquivos de controle geométrico de obras, para que sejam tão reais quanto possíveis. Eles darão suporte a subdivisão dos pavimentos com características diferentes (clima da região, idade, materiais, espessuras etc.).

Quanto ao desempenho dos pavimentos, seja estrutural ou funcional, o Banco de Dados deve sofrer uma constante alimentação a partir de campanhas de levantamentos de parâmetros em pavimentos.

Tabela 1: Dados relevantes para criação de um banco de dados.

1. Dados relacionados ao desempenho	Utilização	4. Dados relacionados à geometria	Utilização
Irregularidade	R	Dimensões de seções	R
Desgaste de superfície	R + M	Curvatura Vertical	R
Deflexão	R + M	Curvatura Longitudinal	R
Atrito	R	Espessura da camada	R
Propriedades das camadas	R	Greide	R
2. Dados relacionados ao histórico	Utilização	5. Dados relacionados aos custos	Utilização
Manutenção	R + M	Construção	R
Construção	R + M	Manutenção	R + M
Tráfego	R + M	Reabilitação	R
Acidentes	R + M	Custos ao usuário	R
3. Dados relacionados à política	Utilização	6. Dados relacionados ao meio ambiente	Utilização
Orçamentos	R + M	Drenagem	R + M
Disponibilidades e alternativas	R + M	Clima	R
R – reabilitação; M – manutenção			

(fonte adaptada: Haas *et al.*, 1994)

Estes parâmetros são os correspondentes à quantificação de defeitos em pavimentos (Índice de Gravidade Global – *IGG*, Taxa de Trincamento – *TR* etc.), levantamentos realizados por equipamentos que determinam a Deflexão em pavimentos (*Falling Weight Deflectometer* – *FWD*, Viga Benkelman, Deflectógrafo Digital etc.), Afundamento de Trilha de Roda – *ATR* (Barra Laser, Trelça etc.) e Irregularidade de Pavimentos (Barra Laser, Medidor de Irregularidade Tipo Resposta etc.).

Esses parâmetros lidos diretamente no pavimento, quando realizados em uma área representativa da malha e a uma frequência adequada, possibilitarão, no Subsistema de Pesquisa, um diagnóstico atual da malha, bem como subsídios para prever as condições futuras de pavimentos.

### 2.2.1.2 Subsistema de Pesquisa

O subsistema de Pesquisa é responsável por realizar estudos que visam dar suporte técnico necessário aos demais módulos do SGP, utilizando-se de (Rodrigues, 2003):

- Técnicas de avaliação de pavimentos;
- Modelos de previsão de desempenho;
- Características dos materiais de construção;
- Técnicas de conservação e restauração;
- Estrutura do SGP existente e da organização; e
- Problemas específicos que envolvam custos significativos para a organização administradora ou para o público usuário.

Portanto, esse subsistema “se baseia nos dados armazenados no banco de dados e proporciona o acompanhamento/monitoramento de Indicadores do Pavimento. A partir da definição dos critérios de avaliação para irregularidade, deflexão, estrutura, qualidade do patrimônio e qualidade para o usuário, são definidos Índices de Condição para auxiliar nas análises” (Cardoso *et al.*, 2000).

Em um SGP em Nível de Rede, preferencialmente deve-se utilizar um índice de condição geral do pavimento que reflita o estado do pavimento. Os níveis de condição aceitáveis para o índice de condição devem ser determinados de acordo com o tipo de superfície do pavimento, a classificação funcional da rodovia e os níveis de aplicação de carga de tráfego. Para cada intervalo do índice de condição, pode-se fazer uma indicação do tipo de intervenção necessária (Figura 5) para recolocar o pavimento nas melhores condições (nada a fazer, conserva, lama asfáltica, correções ou RECAP, restauração e reconstrução).

Em um SGP em Nível de Projeto, os dados devem ser criteriosamente analisados para que a solução adotada tenha a maior fidelidade possível com as necessidades do pavimento. Devem ser utilizados modelos de previsão para cada parâmetro de desempenho (*IRI, IGG, ATR, Deflexão* etc.) para determinar-se o comportamento futuro do pavimento e compará-los com limites considerados críticos.

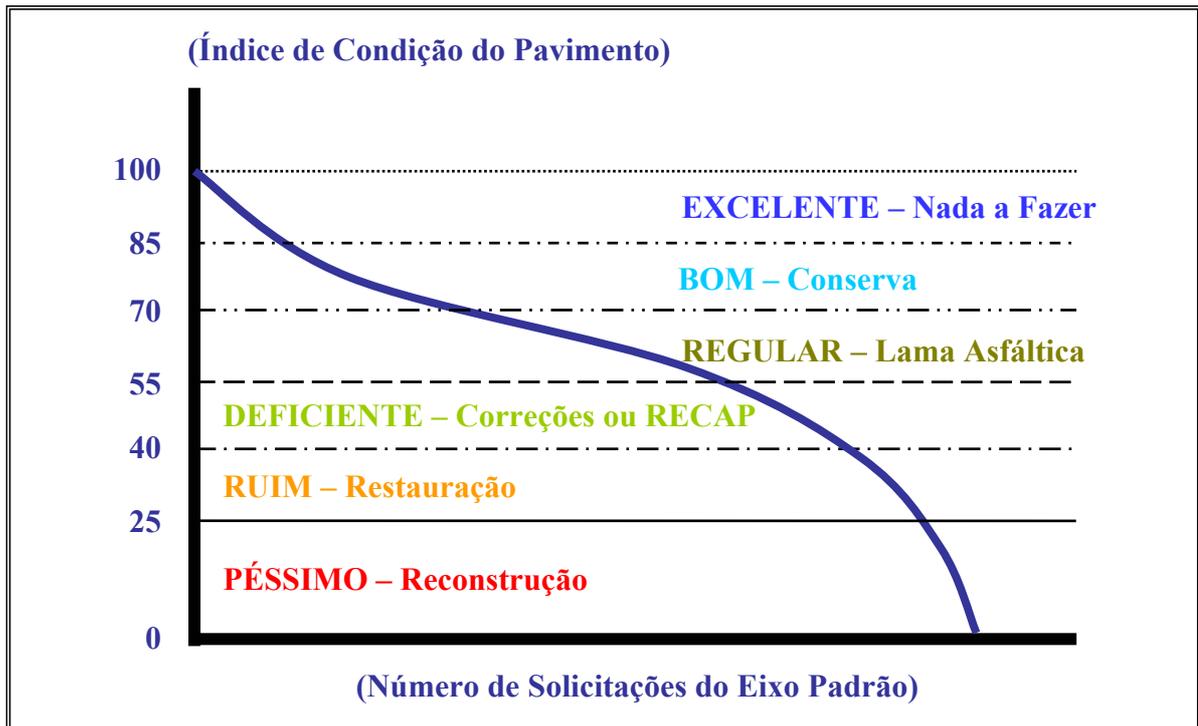


Figura 5: Recomendação de intervenções de acordo com o índice de condição  
(Fonte adaptada: Misra *et al.*, 2003).

Segundo Cardoso *et al.* (2000), de acordo com os dados da rodovia, determinam-se os segmentos homogêneos das mesmas e avaliam-se as estratégias possíveis, utilizando-se, opcionalmente, os modelos de previsão de desempenho integrantes do HDM-4.

Porém a prática rodoviária tem mostrado que tais modelos, muitos deles desenvolvidos no Brasil por Queiroz (1981) e Paterson (1987), só são possíveis de utilização após um processo de calibração, envolvendo vários fatores, pois foram desenvolvidos para rodovias com as mais diversas características, seja de projeto ou de exposição (elaborados com dados da Região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil). Isto pode fornecer, para alguns casos, análises que diferem com as condições reais futuras.

O que os departamentos de transporte em todo o mundo, inclusive empresas concessionárias de rodovias, vêm procurando fazer é desenvolver modelos de previsão de desempenho próprios às características e condições de exposição dos pavimentos de sua malha rodoviária. Isto trabalhando conjuntamente com um banco de dados amplo e confiável fornece melhores subsídios para análise de condições futuras, ou seja, fornece dados de previsão que se aproximam mais da realidade, otimizando as decisões baseadas em critérios econômicos. Os

tipos de modelos de previsão de desempenho e os métodos de elaboração podem ser observados com maiores detalhes no Capítulo 4 desta Tese.

Outra atividade importante deste subsistema é a de realizar uma comparação entre as condições presentes da malha rodoviária e as suas condições após as intervenções planejadas, servindo como uma forma de justificativa de investimentos requeridos (AASHTO, 2001).

#### 2.2.1.3 Subsistema de Planejamento

O subsistema de Planejamento compreende a análise de dados, a priorização das intervenções e a tomada de decisões na abrangência de toda a malha rodoviária. Os resultados são analisados com base em dados simplificados e de levantamento expedito de toda a rede, e adequados através da programação de investimentos para cada projeto da rede, de acordo com prioridades técnicas e restrições orçamentárias de programações plurianuais de investimentos.

#### 2.2.1.4 Subsistema de Projeto

O subsistema de Projeto analisa projetos de restauração e construção de pavimentos de acordo com a restrição orçamentária dos recursos alocados para cada obra específica realizada subsistema de Planejamento. A partir deste subsistema, define-se a alternativa que tenha o melhor aproveitamento possível para os recursos alocados, necessitando de dados técnicos detalhados quanto aos desempenhos estrutural e funcional, ao tráfego e aos materiais de construção.

#### 2.2.1.5 Subsistema de Construção e Manutenção

O subsistema de Construção e Manutenção é a etapa de execução das obras programadas pelo subsistema de planejamento e detalhada pelo de projeto, devendo-se realizar a correta apropriação de custos e avaliação das características e desempenho técnicos das alternativas empregadas.

### 2.2.1.6 Subsistema de Avaliação e Monitoramento

O subsistema de Avaliação e Monitoramento tem o objetivo de realizar o levantamento das condições da malha rodoviária em estudo. Esses levantamentos servem para retro-alimentar o banco de dados (*Feedback*).

A coleta de dados é uma atividade fundamental de um Sistema de Gerência, pois representa o conjunto de informações disponíveis sobre a malha rodoviária. A sua importância deriva do fato de que todas as análises e decisões necessárias são baseadas nas informações e dados coletados, que por isso devem ser objetivos, confiáveis e atualizados (AASHTO, 1990).

A coleta de dados pode ser realizada através de levantamentos “contínuos”, na extensão de toda a rede, e “localizados”, realizados de forma detalhada em “Unidades de Amostragem” (como discutido no Capítulo 3 desta Tese) distribuídas pela rede estudada.

Tais levantamentos terão a abrangência e compreenderão os parâmetros necessários e estabelecidos para análise de alternativas em nível de rede ou projeto, e constituirão o “Banco de Dados” do SGP.

Os dados que irão compor o “banco de dados” de um SGP não precisam ser levantados em uma mesma época, sobretudo no que se refere a dados de desempenho estrutural, que normalmente são levantados na etapa de projeto (NHI, 1998). Depende também dos recursos disponíveis para o levantamento de dados, etapa mais dispendiosa para o funcionamento de um SGP, depois das etapas de aplicação de estratégias de intervenção.

Os tipos de levantamentos que devem ser realizados dentro de um SGP são (NHI, 1998):

- Degradação: Os dados de degradação do pavimento são usados para determinar-se um Índice de Condição do pavimento (no caso do FHWA é o *PCI – Pavement Condition Index*; no caso do DNIT é o *IGG – Índice de Gravidade Global*, para levantamento objetivo, e *IES – Índice de Estado de Superfície*, para levantamento expedito), que expressam o estado atual do pavimento. Para o levantamento dos dados de degradação do pavimento, deve-se identificar os tipos de defeitos e determinar a severidade e a frequência de cada um na sua superfície de rolamento;

- Deflexão: Resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação de um carregamento. É bastante influenciada pela capacidade estrutural do conjunto de camadas do pavimento e pela ação das cargas do tráfego;
- Irregularidade: É uma medida de distorção ao longo do plano linear longitudinal do pavimento, que determina o conforto dos usuários oferecido pelo tráfego. A irregularidade pode ser analisada através do IRI (*International Roughness Index*); e
- Resistência à derrapagem: Mede a capacidade do pavimento em contribuir com a frenagem a um veículo, sem colocá-lo em risco.

### 2.2.2 Seleção de Alternativas

A análise de pavimentos consiste na determinação de suas condições atuais, na previsão de condições futuras e na avaliação de prioridades de intervenção (AASHTO, 1990).

A determinação das condições atuais dos pavimentos é representada pelo seu nível de degradação. A AASHTO classifica os pavimentos em uma escala de 0 a 100, da pior para melhor condição, respectivamente (NHI, 1998).

A previsão de condições futuras é realizada através de modelos de previsão de desempenho que relacionam parâmetros como *IRI*, *IGG*, *ATR* e Deflexão, com o tráfego, idade do revestimento, condições climáticas, sua capacidade estrutural etc.

A avaliação de prioridades recai na necessidade de se elaborar um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) que relacione a maior parte das variáveis que influenciam no sistema.

O guia de gerência de pavimentos da AASHTO de 1990 especifica o seguinte procedimento para apoio a decisão na escolha de alternativas em um SGP em nível de rede:

- Avaliação da Condição Geral da Rede: Os pavimentos devem ser avaliados em conceitos qualitativos (muito bom, bom, médio, ruim e péssimo), isso associado a índices quantitativos (pontuação);

- Estabelecimento de Estratégias de Manutenção, Reabilitação e Reconstrução (MR&R): Existem 4 métodos de avaliação para estabelecimento de estratégias de MR&R:
  1. Método da Matriz, que correlaciona um defeito específico com uma estratégia apropriada de MR&R. A associação entre o problema e a estratégia deve ser fundamentada na experiência acumulada;
  2. Árvore de Decisão, onde variáveis importantes tais como tipos específicos de degradação, tráfego e classes funcionais de rodovias, podem ser consideradas na seleção de estratégias MR&R. Essas estratégias podem ser selecionadas através de um fluxograma denominado de árvore de decisão, que faz uso das mesmas estratégias utilizadas no “método da matriz”;
  3. Método do Custo do Ciclo-de-Vida, que seleciona estratégias de MR&R baseado nos custos do ciclo-de-vida de uma combinação de estratégia requeridas num período de análise (construção, manutenção, restauração etc.); e
  4. Método de Otimização, que relaciona a maximização dos benefícios aos usuários, a maximização do padrão de desempenho da rede e a minimização dos custos presentes totais.
- Custos Requeridos: O SGP fornecerá uma estimativa dos custos requeridos para preservar a rede pavimentada nos níveis de desempenho desejáveis;
- Determinação de Prioridades: São 5 os métodos mais utilizados:
  1. Método da Matriz, podendo ser usado através de uma associação entre condições do pavimento e tráfego;
  2. Método do Índice de Condição, que pode ser usado através de atribuição de notas de 0 (pior) a 100 (melhor). Pode-se combinar o índice de condição com fatores de classe funcional ou tráfego, ordenadamente para desenvolver uma lista final de projetos;

3. Razão Benefício/Custo, que seleciona o projeto que teria o maior benefício/custo, o qual normalmente é o que tem maior prioridade (o trecho em piores condições de desempenho e grande volume de tráfego);
4. Custo Efetivo, onde o objetivo é maximizar o desempenho do pavimento como uma função do custo (menor investimento e maior desempenho); e
5. Maximização dos Benefícios, que está relacionado aos benefícios obtidos numa análise de benefício/custo e custo efetivo durante o ciclo-de-vida do pavimento, utilizando-se de múltiplas intervenções. A diferença desta para as duas análises anteriores é que a maximização dos benefícios não analisa cada alternativa separadamente, mas sim os benefícios do conjunto de intervenções que serão aplicadas no plano plurianual.

A AASHTO (2001) indica que a priorização de intervenções deve ser realizada dando preferência, além de fatores técnicos e econômicos, ao volume de tráfego da via.

A seguir os métodos mais utilizados para a realização de priorização serão discutidos.

#### 2.2.2.1 Priorização

Priorização Plurianual é um processo da gerência de pavimentos usado para identificar objetivamente a melhor combinação de projetos em um período plurianual. Consiste, portanto, em uma técnica de apoio à decisão.

Através da priorização pode-se obter (NHI, 1998):

- O momento mais adequado para atividades de restauração;
- Uma análise econômica para as prováveis alternativas de conservação e restauração; e
- O provável impacto na rede ao longo do tempo para cada combinação de projetos em um dado período de análise.

A partir de um programa de priorização pode-se analisar a utilização de várias alternativas de intervenção, inclusive a estratégia base (aquela em que só se deve realizar intervenção na

rodovia quando o pavimento estiver na sua condição limite). O que se deseja é comparar o benefício/custo de cada estratégia concorrente, com o fim de manter a malha rodoviária em um nível de condição desejável ao longo do tempo em um panorama técnico e econômico mais favorável (Hajek *et al.*, 2004).

Vários fatores devem ser levados em consideração no processo de priorização de intervenções (Misra *et al.*, 2003):

- O Índice de Condição do Pavimento (*Pavement Condition Index – PCI*), que é um índice calculado para indicar a condição do pavimento;
- O Tráfego Médio Diário (VDM), onde uma quantidade mais elevada de tráfego deve ter uma prioridade relativa mais elevada, embora dois pavimentos possam ter o mesmo *PCI*;
- A Classificação Funcional da Rodovia, em que a avaliação da prioridade deve favorecer uma rodovia que pertença a uma classe funcional mais importante;
- A Localização da Rodovia, favorecendo-se trechos de rodovias próximos às áreas urbanas;
- O Histórico de Intervenções (custo/km), favorecendo-se às rodovias que tem maior custo de manutenção para a agência; e
- A Qualidade de Rolamento do Pavimento (*Pavement Riding Quality – PQR*), representando o valor de serventia atual relacionado com o conforto proporcionado pela superfície do pavimento ao usuário, em uma escala de 0,0 a 5,0 (o *PQR* é correspondente ao Valor de Serventia Atual – *VSA* utilizado no Brasil).

O *Midwest Transportation Consortiun* (MTC) dos Estados Unidos adota a Modelo 1 para realizar uma classificação de prioridade de intervenções entre rodovias através de um Índice de Prioridade (*Priority Index*) (Misra *et al.*, 2003):

$$\text{Priority Index} = \left\{ \begin{array}{l} [0,65 \times PCI] + [0,10 \times TF] + [0,05 \times FC] + [0,10 \times LF] + \\ + [0,05 \times MH] + [0,05 \times PRQ^*] \end{array} \right\} \quad (1)$$

Onde:

*PCI* é o Índice de Condição do Pavimento;

*TF* é o Fator de Tráfego, de acordo com o VDM (variando de 0 – 100);

*FC* é o Fator de Classificação Funcional da Rodovia (0 – 100);

*LF* é o Fator de Localização da Rodovia (0 – 100);

*MH* é o Fator do Histórico de Manutenção da Rodovia (0 – 100); e

*PRQ\** é o Fator relativo ao valor da Qualidade de Rolamento do Pavimento (0 – 100).

O nível de detalhamento de informações em um programa de priorização dependerá do seu nível de aprimoramento. São três os níveis de aprimoramento quanto às técnicas de apoio à decisão (técnicas de priorização) em um SGP, seguindo a ordem apresentada na Figura 6.

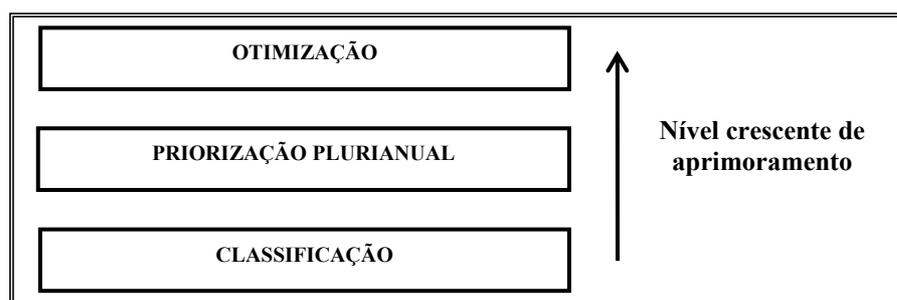


Figura 6: Ordem de aprimoramento das técnicas de suporte à decisão

(Fonte traduzida: NHI, 1998).

#### a) *Classificação*

Segundo a AASHTO (2001), esta é a forma mais simples de priorizar projetos, consistindo em classificar as necessidades de manutenção e restauração dos pavimentos baseando-se em um parecer técnico ou em parâmetro de desempenho medido. Normalmente essas análises são realizadas a cada ano antes da programação de investimento. Alguns critérios comumente utilizados são Análise da Condição, Custo Inicial, Custo e sua Programação, Custo do Ciclo-de-Vida e Relação Benefício/Custo (NHI, 1998).

O processo de classificação (priorização para um único ano) segue a lógica do fluxograma da Figura 7.

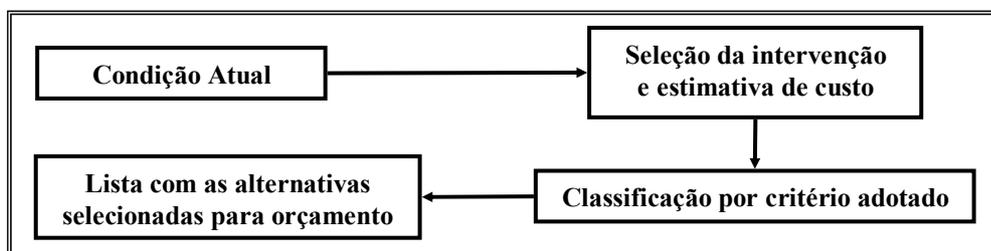


Figura 7: Processo de classificação (Fonte traduzida: NHI, 1998).

Neste estágio ainda não foram desenvolvidos modelos de desempenho.

Este método não faz uma análise plurianual das condições do pavimento, mas sim apenas de sua condição atual (no ano da análise).

#### *b) Priorização Plurianual*

É um método que fornece uma solução otimizada, pois utiliza modelos de previsão de desempenho para avaliar a influência de cada tipo de intervenção no desempenho da rede, e, dessa forma, escolher a melhor combinação de medidas em um tempo específico (NHI, 1998).

Este método de priorização necessita da utilização de sistema computacional para o processamento de dados.

De acordo com as alternativas de intervenção analisadas neste método avalia-se o custo efetivo e/ou o benefício/custo das alternativas. Mais especificamente, são avaliadas a vida adicional fornecida a um pavimento pelas intervenções a um determinado custo efetivo (menor) e a relação do custo do ciclo-de-vida pelos benefícios de múltiplas intervenções em uma análise benefício/custo.

O processo de priorização plurianual segue a lógica do fluxograma da Figura 8.

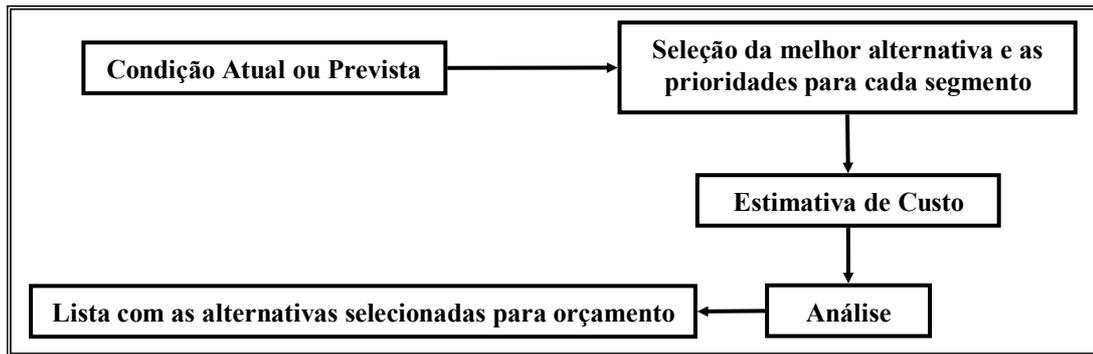


Figura 8: Processo de priorização plurianual (Fonte traduzida: NHI, 1998).

A seleção da melhor alternativa requer a análise de várias estratégias de intervenção, respeitando as restrições orçamentárias plurianuais. Por esta razão muitos autores referem-se à priorização plurianual como uma técnica de otimização.

### c) Otimização

Representa a forma mais sofisticada de uma análise de priorização plurianual. É uma técnica capaz de identificar uma estratégia de intervenção que maximize os benefícios ou minimize os custos em uma malha rodoviária ou um trecho de pavimento. Em seu contexto geral, o processo de otimização segue o procedimento descrito no fluxograma da Figura 9.

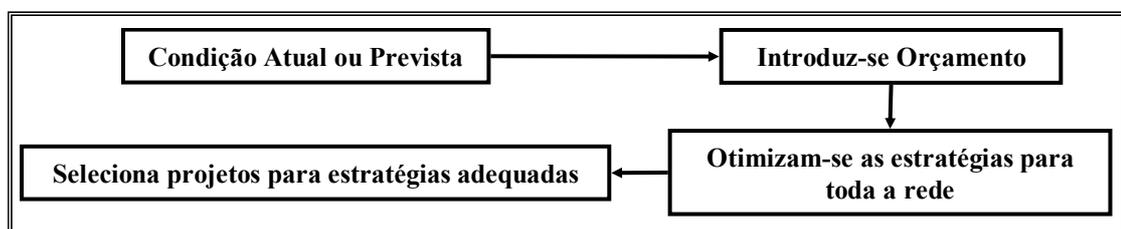


Figura 9: Processo de otimização (Fonte traduzida: NHI, 1998).

Em sua grande maioria, utiliza-se de métodos de programação matemática, incluindo programação linear, inteira e dinâmica, onde são desenvolvidas soluções otimizadas de acordo com o objetivo estabelecido pela programação. Os métodos mais utilizados na análise de

estratégias de manutenção de pavimentos são o da Enumeração Total (adotada pelo modelo EBM-HS do HDM-III, que escolhe a alternativa, em um elenco, com maior valor presente líquido total) e da análise do Valor Incremental Benefício/Custo (adotado no HDM-4 – escolhe a alternativa com a maior razão entre o valor presente da rede e custos) (Porath, 2002; HDM-4-b, 2000).

Nestes métodos de programação matemática se deseja que uma função objetivo intercepte o plano formado pelas restrições do sistema analisado. A função objetivo é constituída por todas as variáveis analisadas no sistema, sejam variáveis financeiras ou parâmetros de desempenho de pavimentos. Já o plano do sistema é formado pelas restrições técnicas e econômicas que devem ser respeitadas no período de análise, formando um sistema multidimensional.

A função objetivo, como o próprio nome sugere, tem um objetivo único. Os objetivos mais empregados no meio da pavimentação para este tipo de análise são (HDM-4-b, 2000):

- Maximização dos Benefícios Econômicos;
- Maximização das Melhoras nas Condições de Rede; e
- Minimização dos Custos de Obras Rodoviárias necessários para atingir um dado nível de condição da rede.

Apesar do método da função objetivo ser mais adequado (orçamento definido para manter a rede em um determinado nível de operação em um período de tempo), ele requer um conhecimento mais aprofundado em matemática e estatística para a condução das análises (NHI, 1998).

Existe também o método conhecido como *Expert System*, o qual utiliza ferramentas computacionais para estruturar uma linha de pensamento de um especialista prático (Gonçalves, 1997). A utilização deste método recai em uma tendência a utilizar técnicas eleitas como preferenciais pelos técnicos que as empregam, em um raciocínio do tipo “causa e efeito” (medida X para um defeito Y).

O HDM-4-b (2000) e o NHI (1998) indicam a análise multicriterial quando, além das análises que podem ser transcritas em termos monetários, se deseja inserir critérios difíceis de serem mensurados monetariamente (ex.: impactos ambientais negativos). Através desta análise a otimização pode ser realizada utilizando-se fatores que seriam difíceis de serem avaliados de

uma só vez (maximizar benefício/custo, maximizar índice de condição geral do pavimento, minimizar impacto negativo ao meio ambiente, maximizar o desenvolvimento econômico local etc.). Neste tipo de análise a escolha não vai apontar uma melhor solução para um objetivo particular, mas uma solução que atenda, o máximo possível, a todos os critérios analisados no sistema.

Na realidade as decisões tomadas em qualquer âmbito da sociedade, raramente são realizadas para atender a um único objetivo, mas sim para atender a pontos de vista diferentes, classes sociais diferentes, necessidades técnicas diferentes, a um preço melhor e com menor impacto negativo possível ao meio ambiente.

O Guia da AASHTO para Projeto Empírico-Mecanístico de Rodovias de 2004 (*Guide for Mechanistic-Empirical Design*) (AASHTO-a, 2004) indica a utilização de uma Tabela de Decisão para se determinar a estratégia de restauração preferencial (Tabela 2). Nela analisam-se várias alternativas de manutenção de acordo com diversos critérios considerados, classificados pela sua importância através de pesos. A variável de cada critério deve receber uma escala de pontuação “normalizada” (variando de 0 a 100, da pior a melhor situação, respectivamente). Neste último aspecto, recai-se novamente nas preferências dos técnicos que decidirão pela ordem de pontuação.

Este método de Análise Multicriterial, utilizado pelo Guia da AASHTO, pertence à Família da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) e é chamado de Método da Média Ponderada (*Weighted Average*), método simplificado, onde valores numéricos são desenvolvidos para cada critério e alternativa analisada. São assumidos pesos para cada critério e utiliza-se de uma função linear para calcular a preferência de cada alternativa (Zuffo, 1998).

Pode-se destacar ferramentas de análise multicriterial como o Método PROMETHEE (Brans *et al.*, 1984). Ele pertence à Família Baseada em Relações Hierárquicas, em que a ordem preferencial da variável de cada critério analisado é normalizada por uma função objetivo (não cabe ao técnico ordenar as situações possíveis de um critério em uma escala de pior a melhor). O tomador de decisão deve indicar a necessidade de maximizar ou minimizar os valores de cada critério dentro de uma função que determinará a preferência, e a mesma definirá a hierarquização das alternativas analisadas (Zuffo, 1998).

Tabela 2: Tabela para Auxílio à Tomada de Decisão da AASHTO.

	CRITÉRIO						Custo Total	Classificação						
	Custo Inicial	Período de Construção	Vida de Serviço	Estratégia de MR&R	Capacidade da Via e Destino de Tráfego	Projeto adequado ao clima do Estado								
<b>Importância Relativa</b>	20%	20%	25%	15%	5%	15%	100%	–						
<b>Alternativa 1</b>	60	12	100	25	12	90	4.5	100	15	80.5	1			
<b>Alternativa 1a</b>	60	12	100	25	12	90	4.5	100	15	80.5	1			
<b>Alternativa 2</b>	60	12	70	17.5	50	7.5	60	3	40	6	58	5		
<b>Alternativa 2a</b>	60	12	70	17.5	50	7.5	60	3	40	6	58	5		
<b>Alternativa 3</b>	60	12	8	100	25	80	12	100	5	90	13.5	75.5	2	
<b>Alternativa 4</b>	60	12	8	100	25	80	12	100	5	90	13.5	75.5	2	
<b>Alternativa 4</b>	60	12	8	100	25	80	12	100	5	90	13.5	75.5	2	
<b>Alternativa 5</b>	40	8	60	12	40	10	50	7.5	50	2.5	30	4.5	44.5	7
<b>Alternativa 6</b>	70	14	80	16	60	12	50	7.5	80	4	40	6	60	4
<b>Alternativa 7</b>	100	20	100	20	20	5	20	3	40	2	40	6	56	6
<b>Alternativa 8</b>	30	20	60	12	100	25	100	15	100	5	30	4.5	67.5	3

(fonte: AASHTO-a, 2004)

O método PROMETHEE (algumas de suas versões são o PROMETHEE I e PROMETHEE II) já é amplamente utilizado na macroeconomia para a escolha de tipos de estratégias de desenvolvimento, na escolha da localização de implantação de indústrias e localização de implantação de obras de infra-estrutura energética (hidroelétricas) e de abastecimento d'água (reservatórios). Na microeconomia é usada na escolha de protótipos para produção industrial, alocação de microempresas etc.

A Análise Multicriterial com o Método PROMETHEE será descrita detalhadamente no Capítulo 5 desta Tese.

### 2.2.3 Desenvolvimento de Estratégia

Consiste no desenvolvimento de um programa de melhoria para pavimentos a partir da avaliação de várias combinações de intervenção, com orçamentos diferentes, no horizonte de análise.

Em outras palavras, consiste em um plano de ação de aplicação de uma ou mais técnicas de manutenção ou restauração destinadas a fornecer ou manter as condições requeridas de um segmento do pavimento (Paterson, 1987).

No estabelecimento deste plano deve-se considerar (NHI, 1998):

- O procedimento mais adequado para aplicar uma estratégia;
- A antecipação da vida de projeto; e
- As restrições físicas, ambientais ou econômicas que podem influenciar na seleção.

O seu desenvolvimento depende de (NHI, 1998):

- Listagem de Guia de Estratégias e Opções de Intervenção: Deve-se apresentar as diversas estratégias que podem ser empregadas para o pavimento, quando o mesmo estiver em estágios diferentes de condição, avaliando-se o impacto das mesmas na sua vida de serviço;
-

- Estratégias e tipos de intervenções em pavimentos: Tipos de intervenções possíveis; Condições em que cada intervenção é considerada praticável; Custo de cada intervenção; e Vida de projeto para cada intervenção.
- Técnicas de priorização: Vida de projeto para cada intervenção; Custo de cada intervenção (custo do ciclo-de-vida ou custo inicial); e Políticas e práticas da empresa responsável (adoção de objetivos diversos).
- Processo de seleção de projeto: Limites de projeto; Escopo de projeto (pontes, necessidades do pavimento etc.); Fatores de priorização; Custos do projeto; Restrições do projeto; Recursos disponíveis; e Políticas e práticas da agência.

As ferramentas utilizadas para seleção de estratégias em pavimentos podem ser melhor entendidas com as definições apresentadas nas seções seguintes.

#### 2.2.3.1 Ferramentas para Seleção de Estratégias de Intervenção

##### *a) Árvore de Decisão*

Uma árvore de decisão para manutenção de pavimentos em um SGP, representa uma gama de critérios que determinam as necessidades atuais de manutenção de pavimentos em nível de rede ou em nível de projeto. A determinação desses critérios é uma das maiores contribuições a um SGP completo.

Na elaboração de árvores de decisão para a manutenção de pavimentos normalmente estudam-se as necessidades de intervenções em caráter corretivo, em termos funcionais, ou preventivos, avaliando defeitos em pavimentos.

Um exemplo apresentado por Rodrigues (2003) de como funciona uma árvore de decisão pode ser observado nas Figuras 10, 11 e 12. Na Figura 10 são apresentados critérios para a decisão pelo tipo de intervenção (restauração e conservação). Os critérios analisados são irregularidade longitudinal (*QI*), índice de gravidade global (*IGG*) e afundamento de trilha de roda (*ATR*). No primeiro caso, a irregularidade elevada implica desconforto ao usuário e

necessidade de restauração do pavimento. Caso a irregularidade seja tolerável, avalia-se o *IGG*, que quando se traduz em um nível acentuado de degradação do pavimento, possibilita o aparecimento de panelas, também implicando necessidade de restauração. Caso a irregularidade e o *IGG* estejam em níveis toleráveis, ainda resta a verificação do *ATR*, onde profundidades elevadas deste afetam a segurança no tráfego, possibilitando a hidroplanagem, necessitando de medida de restauração. Quando esses três parâmetros estão dentro dos limites considerados aceitáveis, há a necessidade apenas de atividades de conservação.

Nas Figuras 11 e 12, o mesmo procedimento é utilizado, porém utilizando critérios diferentes para o caso de restauração e conservação, respectivamente. Para restauração são avaliados o *IGG*, a área com trincas  $FC_2 + FC_3$ , a relação de espessuras das camadas de revestimento e base ( $H_R/h_1$ ) e o valor da espessura do revestimento. Para conservação é avaliado o valor de resistência à derrapagem (*VRD*), o estágio de desagregação no revestimento e o *IGG*.

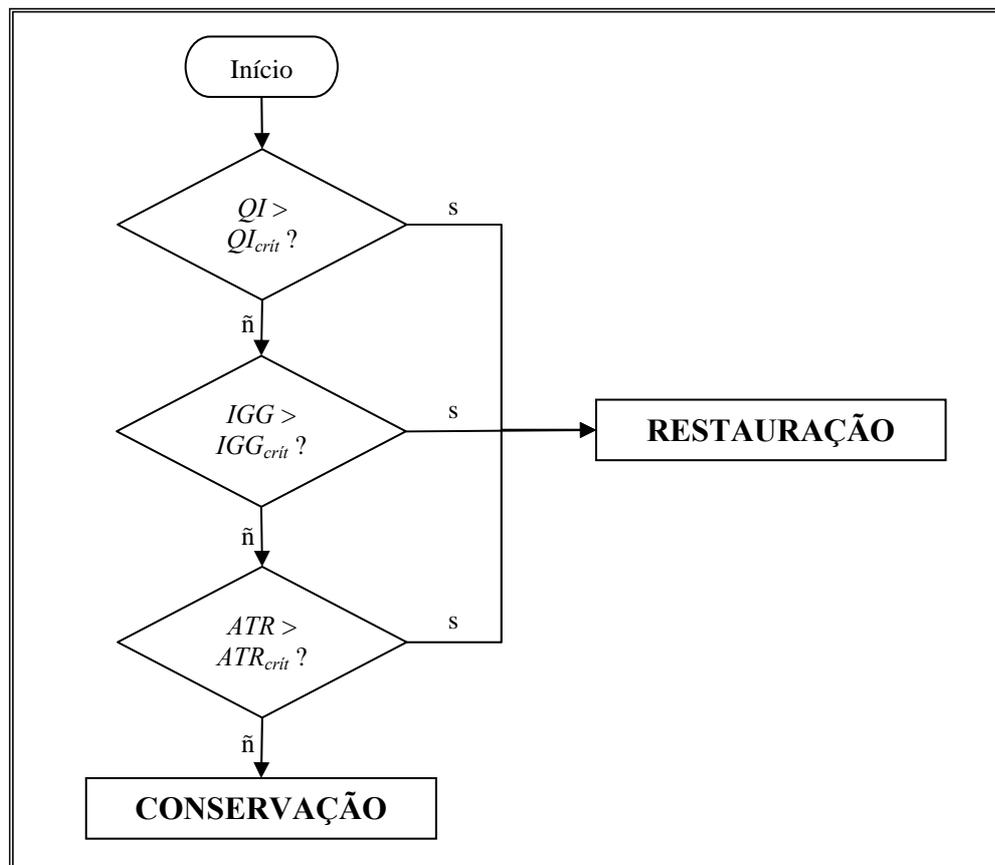


Figura 10: Árvore de decisão de necessidade de manutenção (Fonte: Rodrigues, 2003).

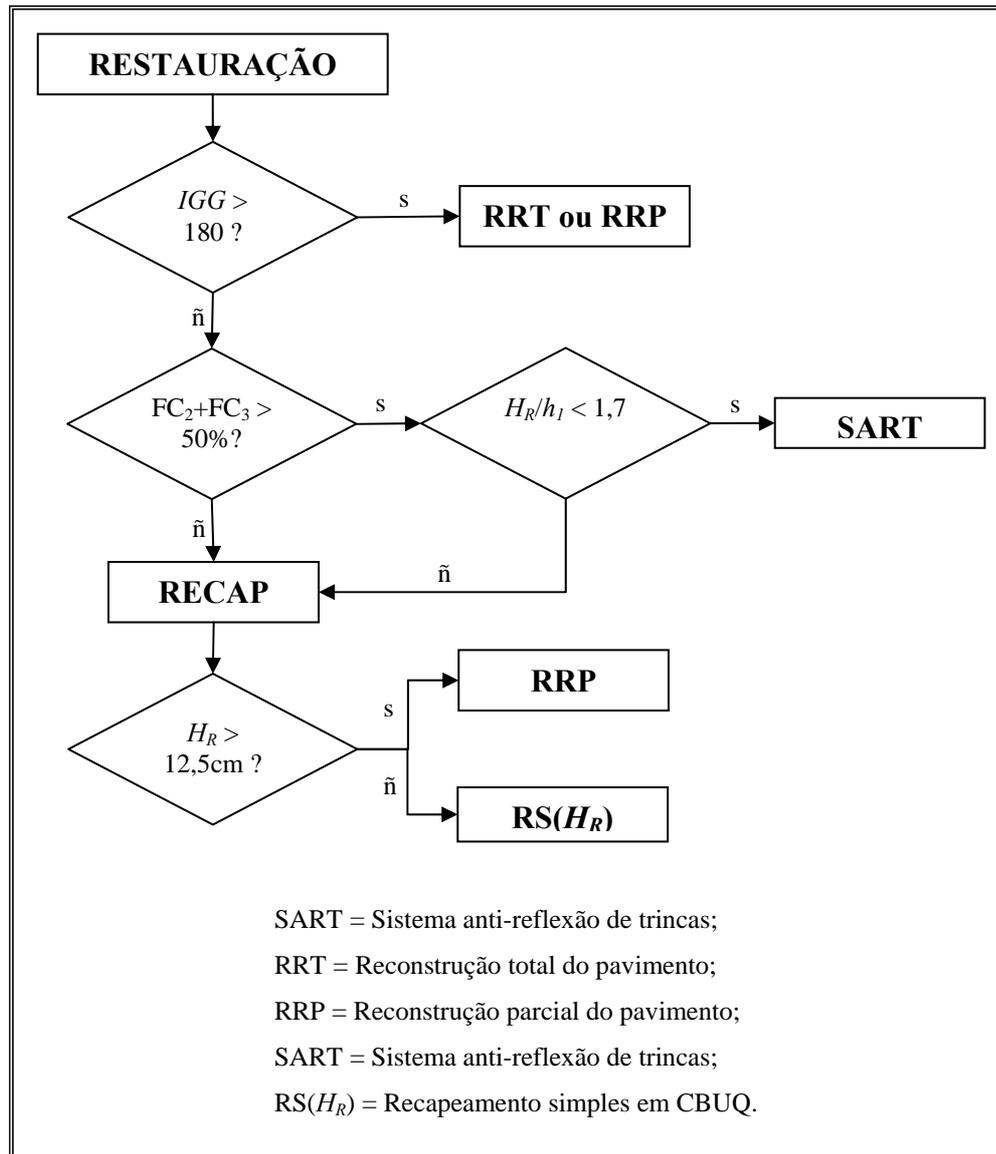


Figura 11: Seleção de medida de restauração (Fonte: Rodrigues, 2003).

Alternativamente, pode-se propor como critério de decisão alguns parâmetros mecânicos tais como tamanho de raio de curvatura, relação entre módulos de revestimento em CBUQ e bases, deflexões em pavimentos, deformação de extensão na base da camada asfáltica e deformação vertical no topo do subleito. Esses critérios se relacionam diretamente à integridade estrutural do pavimento sob aplicação de cargas de tráfego, porém a complexidade do uso destes parâmetros torna-os inadequados, sobretudo em um SGP em Nível de Rede.

Segundo a NHI (1998), as Árvores de Decisão de Minnesota nos Estados Unidos, por exemplo, incluem fatores tais como tipo de superfície, cada tipo de degradação apresentada

pelo pavimento e, ao menos, dois estágios (ou níveis) de condições (suficiente e insuficiente). O total de possíveis intervenções que pode-se selecionar é de 58.

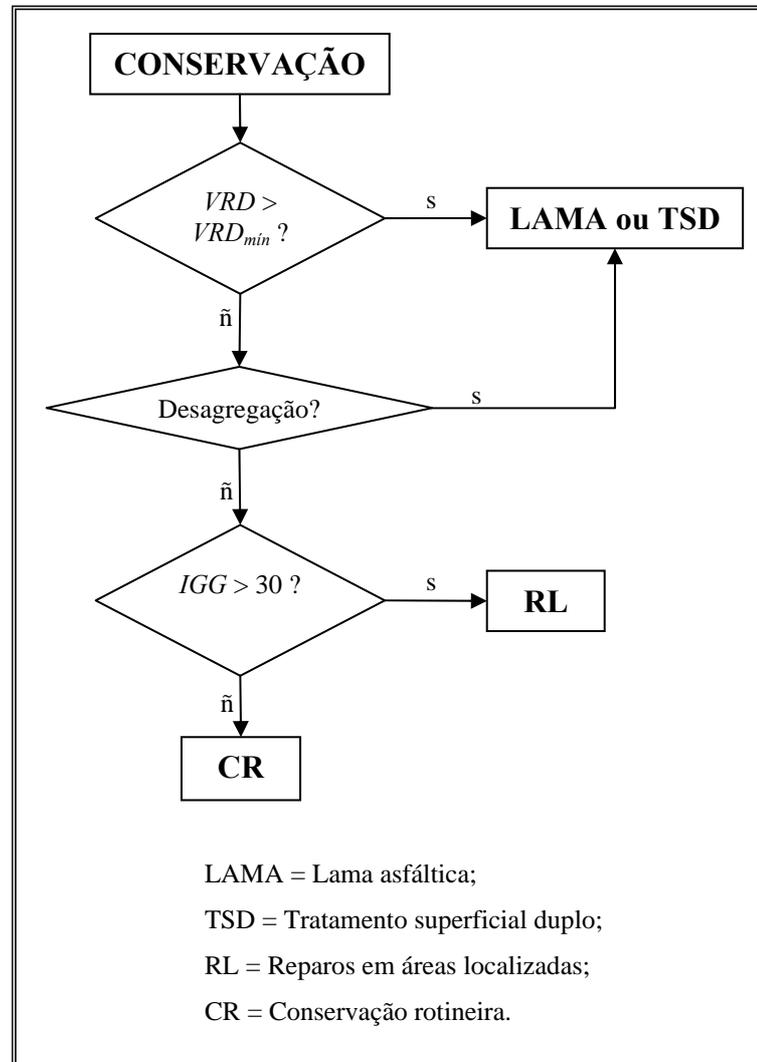


Figura 12: Seleção de medida de conservação (Fonte: Rodrigues, 2003).

Alguns critérios, como os apresentados a seguir, podem ser incluídos em uma Árvore de Decisão (NHI, 1998; Rodrigues, 2003; Gonçalves, 1999):

- Tipo de superfície do pavimento ou histórico de construção;
- Uma indicação da classificação funcional e/ou tráfego;
- Ao menos um tipo de índice de condição , incluindo defeitos e/ou irregularidade;

- Informação mais específica sobre o tipo de degradação apresentada, em termos quantitativos ou pela identificação da presença de um tipo particular de defeito; e
- Extensões, a fim de identificar a largura do pavimento e acostamento a reparar.

Cabe afirmar que a análise das alternativas deve ser feita a partir de condições previstas para o pavimento, como uma forma de otimizar as condições da rede analisada.

O método de decisão por “Árvore de Decisão” pode ser identificado nas normas brasileiras DNER-PRO 10/79 e DNER-PRO 11/79. Essas normas utilizam o método para indicar estratégias de reforço de pavimentos flexíveis em nível de projeto. Os critérios utilizados por elas são parâmetros de desempenho estrutural do pavimento como IGG, ATR, Raio de Curvatura e Deflexão característica. Importante é observar que os valores limites para cada um desses parâmetros também devem ser estabelecidos, contando-se que cada tipo de estrutura vai influenciar nos seus estabelecimentos.

#### *b) Matriz de Decisão*

A Matriz de Decisão é similar à Árvore de Decisão, porém as informações são apresentadas em forma de tabelas.

A NHI (1998) afirma que os mesmos critérios utilizados para a elaboração de Árvores de Decisão podem ser utilizados em Matrizes de Decisão.

#### *c) Regras Programadas*

É um método bastante simples, onde se recomenda um pequeno número de critérios com tipos de intervenção preferenciais para cada intervalo destes.

### 2.2.3.2 Indicação de Intervenção

Pode-se optar por não fazer indicação de tipos específicos de intervenções, mas sim indicá-las por categorias, como Manutenção, Restauração Leve, Restauração Pesada e Reconstrução.

A grande desvantagem de se proceder desta forma é que não é possível determinar-se os custos das estratégias, bem como a sua previsão de desempenho, pois não existe indicação do tipo específico de intervenção, mas apenas de sua categoria (NHI, 1998).

Outra forma de se indicar um tipo de intervenção é descrever um tipo específico na seleção de estratégias, como Conservação Rotineira, Capa Selante, Fresagem seguida de Recomposição, Reforço, Fresagem seguida de Reforço e Reconstrução.

A indicação do tipo específico de intervenção proporciona a estimativa mais realista de custos, bem como a previsão de desempenho do pavimento após a mesma.

### 2.2.3.3 Cálculo de Custos e Benefícios

Modelos de avaliação de prioridade envolvem, tanto em nível de rede quanto de projeto, a análise de benefícios e custos de aplicação de estratégias de intervenção de rodovias.

Os modelos de otimização de rede têm como objetivo identificar as estratégias de manutenção, restauração e reconstrução que maximizem o desempenho da rede ou que minimizem os custos necessários para colocar a rede em condições requeridas em contrato (leva em consideração o desempenho e restrições orçamentárias) (AASHTO, 1990).

Os benefícios e custos que devem ser medidos para os procedimentos das análises de otimização são classificados em três categorias diferentes (HDM-4-b, 2000):

- Benefícios e custos expressos em termos monetários: Custo de operação do veículo, economia no tempo de viagem, custos de acidentes etc.;
- Quantificação de benefícios e custos não expressos em termos monetários: Segurança da via, poluição pela emissão de veículos e barulho de tráfego etc.;
- Benefícios e custos não quantificados: Aumento do bem-estar social, os impactos ao meio-ambiente etc.

A maioria dos SGPs existentes (e até mesmo o HDM-4) utiliza custos do tempo de viagem, custos totais de transporte e custos iniciais de estratégias de intervenção para a realização de análise de prioridade (Misra *et al.*, 2003; HDM-4-b, 2000). Com relação aos dois primeiros

tipos de custos, entende-se a importância da avaliação dos custos dos usuários da rodovia, porém a sua determinação é bastante imprecisa e não avalia as reais restrições orçamentárias da agência. No que diz respeito aos custos iniciais de estratégias de intervenção, apesar de suas determinações serem relativamente fáceis, só estes custos não são suficientes para avaliar as despesas que a agência terá ao longo do tempo com uma determinada estratégia (recaindo a não avaliação das restrições orçamentárias da agência ao longo do tempo de análise).

A estimativa do Custo do Ciclo-de-Vida (CCV) da estratégia de intervenção é uma alternativa para análise da aplicação racional dos recursos disponíveis pela agência em um determinado período.

A estimativa do valor exato do CCV não é um processo fácil, sobretudo pela necessidade de se contar com modelos de previsão de desempenho bem calibrados. Além disto, a melhor forma de se analisar o CCV é distribuindo este ao longo da vida de projeto do pavimento, pois só assim pode-se analisar as variações do CCV ao longo do tempo (NHI, 2002).

O Guia de Projeto Mecânico-Empírico de Pavimentos da AASHTO (AASHTO-c, 2004) determina que a acurácia na determinação do CCV depende de:

- Custos iniciais de construção ou restauração;
- Vida de projeto restante da estrutura inicial do pavimento;
- Custos futuros de manutenção e restauração;
- Previsão do momento ideal e do desempenho das futuras manutenções e restaurações;
- Taxa de desconto econômico;
- Previsão do Valor Residual do pavimento no final do período de análise;
- Custos do usuário, como resultado do “tempo diário extra” (acréscimo de tempo devido aos trabalhos de intervenção na pista), aumento nos “custos de operação dos veículos” (associados à irregularidade do pavimento), ou aumento de acidentes (associado aos defeitos e atividades de intervenção); e
- Evolução prevista nos custos dos usuários.

Gonçalves (1999) indica o procedimento da Equação 2 para o cálculo dos custos diretos incluídos no CCV. Nela não são inseridos os custos relacionados ao usuário, pois não se relacionam diretamente aos custos da Organização que fará o investimento.

$$CCV = CI + \sum_{i=0}^{PP} \frac{CC_i}{(1+r)^{i-1}} - \frac{VR}{(1+r)^{PP-1}} \quad (2)$$

Onde:

*CCV* é o Custo do Ciclo de Vida da estratégia analisada;

*CI* é o Custo Inicial (todos os projetos no CCV; e custos associados a construção de uma nova seção do pavimento, ou de reconstrução ou de restauração do pavimento existente);

*CC<sub>i</sub>* é o Custo de Conservação no ano *i* (manutenção preventiva e conservação rotineira);

*r* é a Taxa de Oportunidade de Capital;

*VR* é o Valor Residual do pavimento, que é o valor monetário que pode ser associado à vida restante do pavimento ou da medida de restauração aplicada, e que pode ser calculado por  $VR = (VSR/PP) \times CI$  ;

*VSR* é a Vida de Serviço Restante; e

*PP* é o Período de Projeto do Pavimento ou de sua Restauração.

Outras ferramentas que podem ser utilizados em análises econômicas são o Valor Presente Líquido dos Benefícios Econômicos (*VPL<sub>BE</sub>*), os Custos Totais de Construção (*CCT*) e o Custo Anual Equivalente de Manutenção (*CAEM*) (Rodrigues, 2003).

Os benefícios técnicos da aplicação de estratégias de intervenção na rodovia podem ser calculados, em um gráfico que relacione a condição do pavimento com o tempo, a partir do conhecimento da área gráfica formada pelas curvas de desempenho de uma alternativa a ser

aplicada sobre a curva original (Figura 13), multiplicado esta área pelo tráfego atuante no período (NHI, 1998; Hajek *et al.*, 2004).

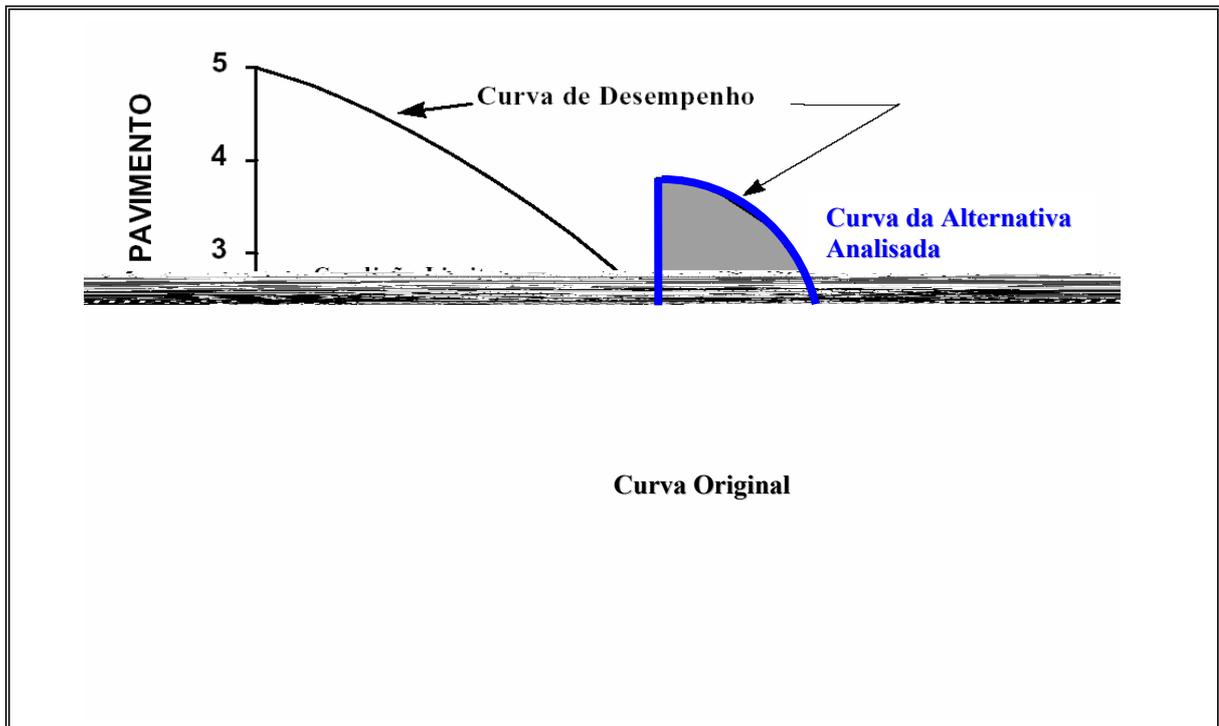


Figura 13: Forma de Cálculo do Benefício em estratégia de intervenção (fonte: NHI, 1998).

Os benefícios técnicos não são os fatores que podem ser contabilizados na análise. Normas da AASHTO (AASHTO-a, 2004; AASHTO-b, 2004) sugerem alguns outros fatores que, quando positivos, devem ser considerados na análise de benefícios, tais como:

- As políticas adotadas de gerência de pavimentos da rede;
- Opções e necessidades futuras de restauração e manutenção;
- Volume de tráfego de carros de passeio e veículos de carga;
- Controle de tráfego durante a construção (segurança e congestionamento);
- Considerações de construção (duração das obras);
- Conservação de materiais e energia;

- Potenciais problemas de subleito e de problemas climáticos;
- Desempenho de pavimentos similares na região;
- Consideração de características de desempenho de materiais avaliados;
- Disponibilidade de materiais no local e capacidade dos contratados;
- Possibilidade de reciclagem do pavimento existente;
- Avaliação de impactos ao meio-ambiente devido à obra;
- Segurança dos operários durante a construção;
- Simulação de competição entre construtores e fornecedores de materiais;
- Preferências municipais e dos governos locais e ganhos para a indústria local.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações apresentadas neste capítulo deram suporte ao melhor entendimento do funcionamento de um SGP, sobretudo de seus subsistemas. O conhecimento das características da rede estudada é o ponto de partida para o estabelecimento de um banco de dados confiável, principalmente quando são estabelecidos segmentos permanentes de pesquisa na malha (Unidades de Amostragens – UAs), conforme será abordado no próximo capítulo desta tese (Capítulo 3). A elaboração de modelos de previsão de desempenho deve ser criteriosa e atender a fundamentos diferentes quando na análise de rede e de projeto.

Foi ressaltada a importância de aplicar métodos de priorização de alternativas de manutenção de pavimentos que utilizem vários critérios de análise, tanto em nível de rede quanto de projeto. Isto deve-se à importância representada pelas obras rodoviárias para todo o conjunto da sociedade, em especial o desenvolvimento econômico e social de regiões menos desenvolvidas do Nordeste, necessitando, portanto, da abordagem de vários pontos de vista.

### 3 DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE AMOSTRAGEM

#### 3.1 CONCEITOS

Os dados que irão constituir o Banco de Dados de um SGP podem ser obtidos através de dois tipos de amostragens diferentes. Segundo Kohler *et al.* (2006), esses tipos de amostragens classificam-se em:

- Unidades de Amostragem (UAs), que são trechos preestabelecidos e representativos de tipos característicos da malha rodoviária, que servem para realizar o levantamento de dados em um SGP, com os objetivos de reavaliar os Programas Plurianuais de Investimentos estabelecidos e de implementar o Subsistema de Pesquisa em nível de rede; e
- Segmentos Dinâmicos (SDs), que são trechos da malha rodoviária selecionados por terem as mesmas condições de degradação em dado período de amostragem. Os dados que resultarão na definição de SD's são obtidos em campanhas de levantamento em trechos aleatórios da malha. Com os segmentos estabelecidos, o objetivo de uso de dados característicos é o mesmo que das UAs.

A preferência pelo uso de UAs em detrimento a SDs é a possibilidade de acompanhar a evolução das condições funcionais e estruturais de um segmento único ao longo do tempo.

A definição das UAs deve abranger parâmetros que afetem as necessidades de manutenção e características da rede analisada, levando-se em consideração (Kohler *et al.*, 2006; Rodrigues, 2003):

- Tipo de estrutura do pavimento;
- Espessuras das camadas, representada pela espessura do revestimento asfáltico em pavimentos flexíveis (pode-se definir faixas de valores) e/ou pelo Número Estrutural (SN);

- Estado de superfície, em termos de defeitos existentes e de afundamento de trilha de roda;
- Idade da última camada (por categorias);
- Tráfego atuante (por categorias);
- Clima (pluviometria e temperaturas – por categorias); e
- Geometria horizontal e vertical da via (por categorias).

Segundo Rodrigues (2003), o conceito de “Unidade de Amostragem” não deve ser confundido com o de “Segmentos Homogêneos”. O primeiro refere-se, como determinado anteriormente, à escolha de trechos de rodovia que caracterizem um determinado tipo de pavimento de uma malha rodoviária (em termos de estrutura, idade, estado de superfície, clima, tráfego e geometria). O segundo refere-se aos resultados de levantamentos detalhados de características de um determinado trecho rodoviário para fins de projeto, onde se define a extensão de um trecho rodoviário contínuo com características semelhantes de desempenho (estrutura, tráfego, parâmetros de desempenho etc.).

Portanto, é impossível estabelecer uma correlação entre UA e segmentos homogêneos devido à grande quantidade de variáveis envolvidas. No levantamento de dados não se deve fazer qualquer tipo de associação entre UA e um conjunto de segmentos homogêneos.

Apesar da impossibilidade de se associar UA e segmentos homogêneos, o estabelecimento das UA deve seguir a lógica de fornecer o perfil mais próximo possível das características dos pavimentos analisados. Isso só se torna possível quando as suas determinações levam em conta que elas devem representar segmentos de pavimentos com características semelhantes. A omissão deste fator pode levar a diagnósticos de rede que não condizem com a sua real condição, já que cada conjunto de UA deverá representar uma porcentagem da extensão da malha rodoviária.

O comprimento ou o tamanho das UA determinará o volume de dados coletados e disponíveis para análise. Por outro lado, existe a necessidade de limitar-se o número e extensão das UA para que não se inviabilize financeiramente as campanhas de obtenção de dados.

Essa quantidade deve ser proporcional ao número de trechos rodoviários com características semelhantes, características essas mencionadas anteriormente, bem como representativa de cada tipo característico de pavimento na extensão total da rede.

Portanto, o número mínimo de UA, que definirá adequadamente as condições da malha rodoviária analisada, deverá ser o mais econômico possível e mais fácil de manter, sem que afete as necessidades técnicas do SGP.

### 3.2 ESTABELECIMENTO DE UNIDADES DE AMOSTRAGEM

Tendo em vista as considerações anteriores, os próximos passos para o estabelecimento das UAs são:

- O Levantamento do Inventário da Malha Rodoviária, onde cada rodovia deve ser cadastrada com informações sobre tipo e idade do revestimento, número estrutural corrigido do pavimento, classificação pedológica do subleito, geometria da rodovia;
- Estudo de Tráfego e do Estado de Superfície, incluindo a determinação do perfil de tráfego suportado e levantamento do estado de superfície (Defeitos, ATR e IRI) em cada rodovia que constitui a malha rodoviária; e
- A Consideração do Clima, realizando o levantamento referente à pluviometria e temperaturas médias do ar em toda a área que compreende a malha rodoviária.

O DNIT aplica a determinação de UAs em função das restrições no orçamento para levantamento de dados (Visconti, 2000). Primeiro deve-se realizar o levantamento visual contínuo para a determinação de segmentos homogêneos (STH) dentro de cada trecho do Plano Nacional Viário (PNV). Determinando-se os SHT, as UAs representarão um quilômetro deste trecho, onde devem ser demarcados três segmentos-testemunha de 100 m cada, no início, no meio e no fim destas (Figura 14). Devem ser estabelecidas áreas de levantamento de defeitos de 6 m de extensão no início e final dos segmentos-testemunha.

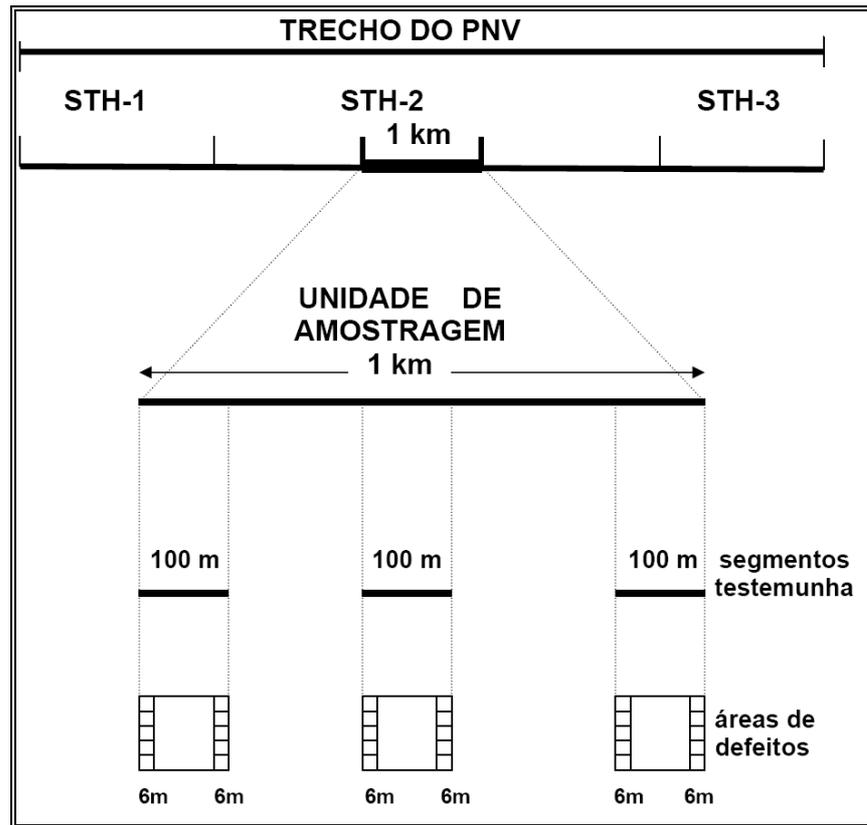


Figura 14: Esquema gráfico da definição de Unidades de amostragem de acordo com a metodologia do DNIT (fonte: Visconti, 2000).

Kohler *et al.* (2006), em sua pesquisa para estruturação do SGP do Caltrans (Califórnia – Estados Unidos), estabeleceu que as UAs seriam resultado de uma segmentação realizada na seguinte ordem: Limites Administrativos de cada Sub-Região do Estado → Caracterização do Tráfego → Estrutura do Pavimento → Regiões Climáticas → Condições de Superfície.

Pode-se notar que o Caltrans não leva em consideração a classificação funcional da rodovia no estabelecimento de UAs. Além disso, não coloca as Regiões Climáticas do estado como principal fator que influencia na segmentação de rodovias, o que parece incoerente com as grandes diferenças climáticas existentes entre norte e sul e leste e oeste deste estado.

O Manual do HDM-4 (HDM-4-a, 2000), por outro lado, ressalta a grande importância da variação de temperatura e umidade entre regiões na degradação de pavimentos com mesmas características.

Uma ordem mais lógica para a segmentação no estabelecimento de UAs seria colocar as Regiões Climáticas de uma área em estudo como o principal fator a ser considerado neste processo.

Para tanto, deve-se realizar o mapeamento climático da região analisada (a partir de limites predefinidos de precipitação e temperatura), dividindo-a em sub-regiões, identificando os trechos de rodovia que pertenceriam a cada um.

O procedimento seguinte é, para cada sub-região climática, segmentar as rodovias ou trechos de rodovias que possuam a mesma classificação funcional e características estruturais do pavimento, definindo marcos inicial e final, bem como as extensões.

A última etapa consiste em identificar o número mínimo de UAs que permita traçar o perfil de tráfego e estado de superfície para cada tipo de segmento de rodovia inserido nas sub-regiões climáticas. Isto consiste em um processo de otimização do número de amostragens, o que envolve procedimentos estatísticos, sobretudo os que permitam descrever uma variação espacial de parâmetros como *IGG*, *ATR* e *IRI*.

Nas seções seguintes serão descritos o método de georreferenciamento aplicado em rodovias e um método para otimização de amostragens em pavimentos. Estes procedimentos são imprescindíveis para a realização do cadastro do inventário da malha rodoviária e estabelecimento de UAs.

### 3.3 GEORREFERENCIAMENTO DE RODOVIAS

O processo de determinação de UAs depende da utilização de um método de georreferenciamento.

Georreferenciar é atribuir coordenadas geográficas a um ponto, vinculando-o a um sistema de coordenadas; no caso ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Dois métodos de georreferenciar rodovias podem ser utilizados. O primeiro método é o Georreferenciamento Linear, onde um determinado local da rodovia pode ser identificado a partir de um ponto já conhecido. O segundo método é o Georreferenciamento Espacial, onde a localização de um determinado ponto é possível pela utilização de coordenadas geográficas.

Idealmente, as informações contidas em sistemas de georreferenciamento espacial e linear deveriam ser integradas para o melhor aproveitamento das informações, formando, portanto, um sistema dinâmico (Kutz e Spring, 2004). Cabe ao primeiro analisar um conjunto de segmentos de rodovias de interesse e ao segundo analisar as características de segmentos individuais.

O Grupo responsável pelo Sistema de Gerência de Informações de Estradas da Nova Zelândia, em sua publicação RIMS (2002), afirma existirem três tipos básicos de Georreferenciamentos Lineares utilizados em rodovias. São eles:

- Método da Quilometragem, que se baseia na distância ao quilômetro inicial (distância real) ou na distância a um marco quilométrico da rodovia (distância relativa) para a localização de um determinado elemento na mesma;
- Método da Referência, que se baseia na distância a um ponto de referência ou na distância a uma estação de referência da rodovia para a localização de um determinado elemento na mesma; e
- Nó de Ligação, que são interseções, fronteiras e pontos de mudança de rumo que são utilizados como nós para delimitar segmentos dentro da malha rodoviária e servirem como referência na rodovia. Constitui um caso particular do método do Ponto de Referência.

As rodovias são caracterizadas por longas seções de análise e os elementos destas seções são separados por grandes distâncias. Devido a estes aspectos, o Método de Referência, que utiliza Estações de Referências, é o mais indicado para ser utilizado por agências no georreferenciamento linear de rodovias (RIMS, 2002; NHI, 1998). Em contrapartida, o uso deste método pelos usuários de rodovias torna-se confuso, pois os mesmos não têm o conhecimento claro do significado e localizações de Estações de Referência. Além disso, por todas as partes do mundo a utilização da quilometragem da rodovia a partir do seu início é mais conhecido e aceito por usuários. A Figura 15 apresenta uma comparação entre todos os métodos de Georreferenciamento Linear de rodovias.

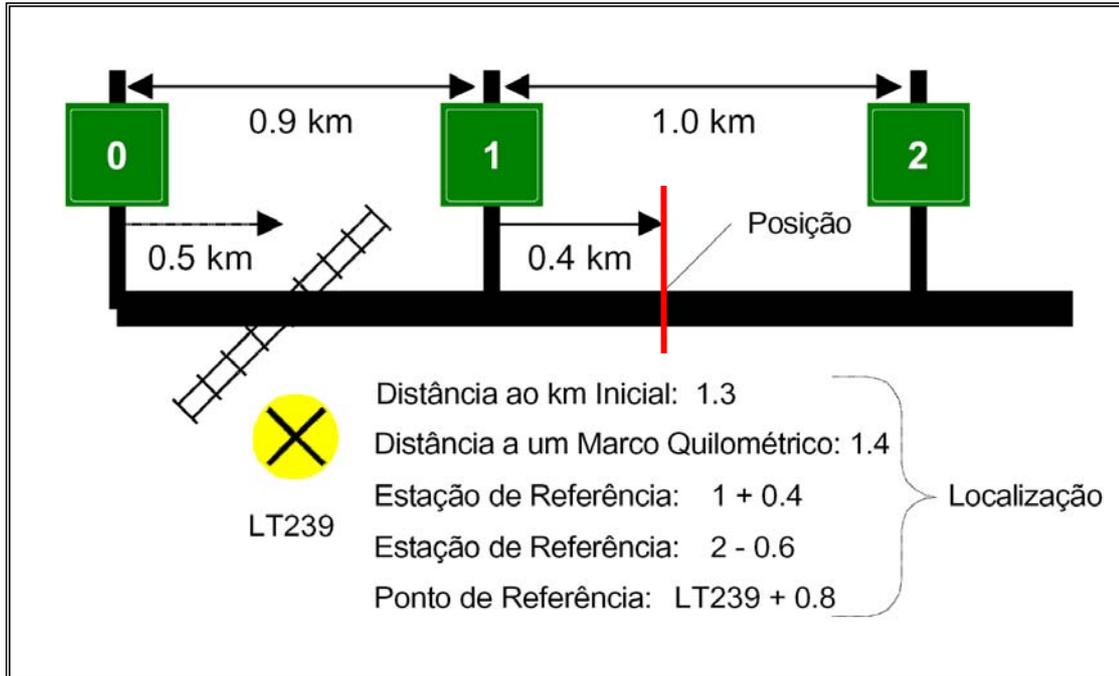


Figura 15: Comparação entre os métodos de Georreferenciamento Linear de Rodovias (fonte traduzida: RIMS, 2002).

No caso do Georreferenciamento Espacial, o método mais utilizado é o Sistema de Informações Geográficas (SIG), que utiliza coordenadas geodésicas, transmitidas por satélites, para, após convertê-las em coordenadas geográficas, realizar a correta localização de um elemento da malha rodoviária (The Dewberry Companies, 2002).

A grande vantagem do Georreferenciamento Espacial é a possibilidade de delimitação de segmentos de rodovias incluídas em zonas com mesma unidade pedológica, clima ou estatísticas sociais, e que façam parte de mesmo distrito administrativo. Isto possibilita a realização de análises regionais em um SGP.

A Figura 16 apresenta a identificação através de imagens de satélite e coordenadas geodésicas da BR-230 que liga municípios de Campina Grande a João Pessoa na Paraíba (saída de Campina Grande).



Figura 16: Identificação espacial da BR-230/PB (fonte: DigitalGoogle, 2006).

### 3.4 OTIMIZAÇÃO DE AMOSTRAGENS

Alguns trabalhos têm sido realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul no intuito de promover uma otimização de amostragens em campanhas de levantamentos de dados em rodovias (Albuquerque *et al.*, 2006 e 2005).

Estes trabalhos consistiram no emprego de uma nova ferramenta estatística, a Geoestatística, que permite descrever a variabilidade espacial de parâmetros de desempenho do pavimento. Estabelecendo esta variabilidade espacial, torna-se possível realizar o dimensionamento da quantidade e espaçamento de amostras que seja capaz de fornecer o perfil de desempenho da rodovia.

Com efeito, este procedimento foi analisado para aplicação em SGPs em Nível de Rede, obtendo um ótimo desempenho.

Albuquerque *et al.* (2005), aplicando conceitos da Geoestatística na análise de um trecho de pavimento da BR-116/RS entre os municípios de Camaquã e Pelotas (Rio Grande do Sul), constataram que com amostragens de deflexão com FWD, espaçadas em aproximadamente 4,62 km, era possível obter o mesmo perfil estatístico de dados (média, desvio padrão e quartis) que em amostragens realizadas em toda sua extensão. Isso resultou na possibilidade de redução na extensão total de amostragem de 124 km para apenas 27 km (o espaçamento entre cada segmento analisado seria de 4,59 km), reduzindo o tempo em obtenção de dados e os custos de monitoramento.

Em outra aplicação de conceitos da Geoestatística, desta vez em dados da BR-020/CE entre os municípios de Canindé e Fortaleza (Ceará), Albuquerque *et al.* (2006), analisando dados de deflexão obtidos com Viga Benkelman, ATR, IGG, IRI e espessura do revestimento do pavimento, verificaram que o espaçamento necessário entre amostras capaz de fornecer o perfil de desempenho da rodovia era, respectivamente, 15,20 km, 1,43 km, 3,51 km, 1,67 km e 1,50 km.

O gráfico da Figura 17 apresenta uma comparação utilizando os resultados obtidos por Albuquerque *et al.* (2006). Neste gráfico são apresentadas as médias dos dados reais existentes dos parâmetros de desempenho e as médias utilizando os bancos de dados reduzidos, com espaçamentos obtidos nas análises. Constata-se que as reduções nos números de dados, através dos espaçamentos dimensionados por procedimentos da Geoestatística, não influenciaram as médias finais.

O método da Geoestatística utilizado nos dois trabalhos anteriores foi o processo de krigagem. Este processo é bem difundido e de grande utilização em pesquisas nas ciências naturais e na mineralogia. É um modelo de estimativa que leva em consideração a variabilidade espacial das amostras, e sua base conceitual está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas,

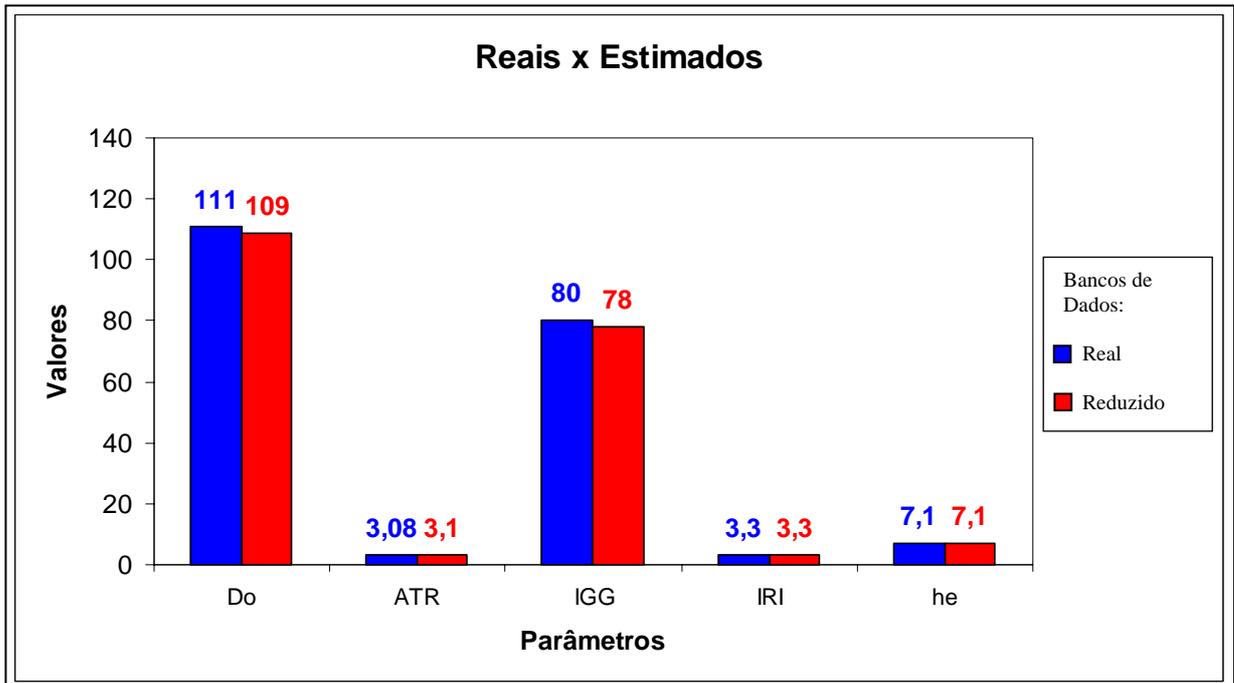


Figura 17: Comparação entre médias de valores reais de parâmetros de desempenho e médias de bancos de dados reduzidos por ferramentas da Geoestatística.

### 3.4.1 Krigagem

O termo krigagem é derivado do nome de Daniel G. Krige, que foi o primeiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em mineração (Delfiner e Delhomme, 1975).

“O que diferencia a krigagem dos outros métodos de interpolação é a estimativa de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência” (Camargo, 2005).

Uma das observações feitas por Krige (1951) para a formulação de sua teoria foi justamente que os procedimentos de interpolação utilizados até então baseavam-se na estatística clássica, ou seja, utilizavam grande quantidade de dados amostrais, parâmetros como média e desvio

padrão para representar um fenômeno, e tinham como base a hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias. Ao contrário disso, somente estas variáveis não seriam suficientes para explicar o fenômeno em estudo, devendo-se utilizar a localização geográfica para construir variograma das amostras e observar qual a variação espacial do conjunto de dados analisados.

#### 3.4.1.1 Variograma

O variograma é a ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

O variograma serve para denotar a dependência espacial de um parâmetro natural. O mesmo é representado por  $2\gamma(h)$ , e definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores dos pontos  $(X, Y)$  no espaço, separados pelo vetor distância  $h$  que depende do espaçamento entre as amostras, ou seja (Isaaks *et al.*, 1989):

$$2\gamma_{(h)} = E\{[X - Y]^2\} = E\{[Z_{(X)} - Z_{(X+h)}]^2\} = Var[Z_{(X)} - Z_{(X+h)}] \quad (3)$$

No caso de várias amostras de  $Z_{(x_i), i=1, 2, \dots, n}$ , o variograma pode ser estimado por:

$$2\hat{\gamma}_{(h)} = \frac{1}{N_{(h)}} \sum_{i=1}^{N_{(h)}} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (4)$$

Onde:

$2\hat{\gamma}_{(h)}$  é o variograma estimado;

$N_{(h)}$  é o número de pares de valores medidos,  $Z_{(x_i)}$  e  $Z_{(x_i+h)}$ , separados por um vetor distância  $h$ ;

$Z_{(x_i)}$  e  $Z_{(x_i+h)}$  são valores da  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $x_i$  e  $x_i+h$  ( $i = 1, \dots, n$ ), separados pelo vetor de  $h$ .

Quando se constrói um gráfico de um semivariograma experimental ( $\hat{\gamma}_{(h)}$ ), como mostrado na Figura 18, pode-se fazer as seguintes analogias (Camargo, 2005):

- O semivariograma é tipicamente construído para diferentes direções. Qualquer direção particular do semivariograma dependerá somente da distância;
- As diferenças  $\{Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}\}$  decrescem à medida que  $h$ , a distância que os separa, decresce;
- A distância ( $a$ ), que é o alcance (*range*), é a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- O valor ( $C$ ), patamar, é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance ( $a$ ). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ( $Var[Z_{(x)} - Z_{(x+h)}]$ ) torna-se invariável com a distância;
- O valor ( $C_0$ ) é o efeito pepita (*nugget effect*), e representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Idealmente,  $\gamma_{(0)} = 0$ ; entretanto, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma_{(h)}$  se aproxima do *nugget effect* (sempre valor positivo). Isto ainda pode ser derivado de erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem (Isaaks e Srivastava, 1989); e
- O valor ( $C_I$ ) é a contribuição (*sill*), que representa a diferença entre o patamar ( $C$ ) e o Efeito Pepita ( $C_0$ ).

Em uma malha de pontos amostrados com espaçamento  $h$ , os cálculos do semivariograma experimental são realizados inicialmente para todos os pares de amostras espaçados em  $h$ . Os cálculos são repetidos para pares de amostras espaçados em  $2h$ , e assim sucessivamente, até

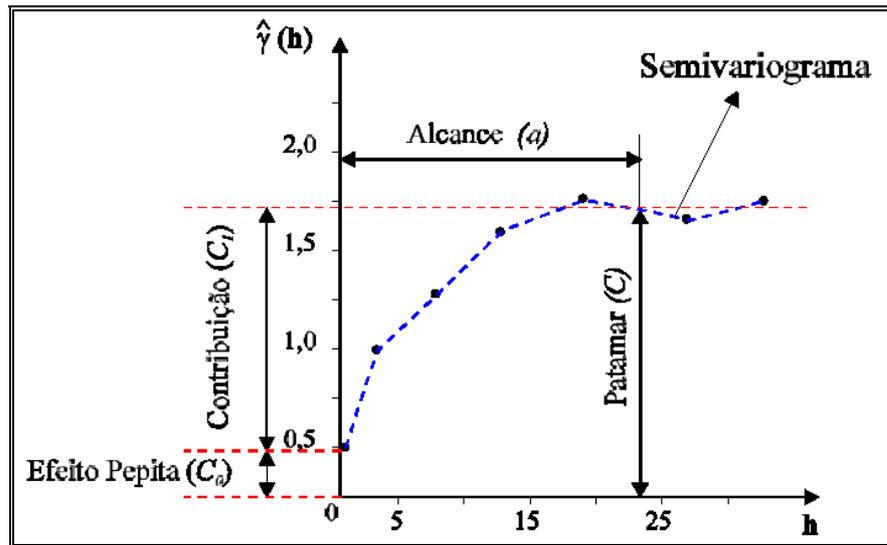


Figura 18: Exemplo de semivariograma (Isaaks *et al.*, 1989).

A partir do semivariograma experimental calculado e representado em um gráfico, resta ainda o ajuste do modelo teórico no qual ele melhor se enquadra.

Alguns modelos de ajuste mais utilizados podem ser observados na Figura 19 e resumidamente apresentados nos tópicos listados a seguir (Camargo, 2005). Tais modelos são denominados por Isaaks *et al.* (1989) como modelos isotrópicos:

- Modelo Esférico de Semivariograma:

$$\gamma_{(h)} = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right] & , 0 < |h| \leq a \\ C_0 + C_1 & , |h| > a \end{cases} \quad (5)$$

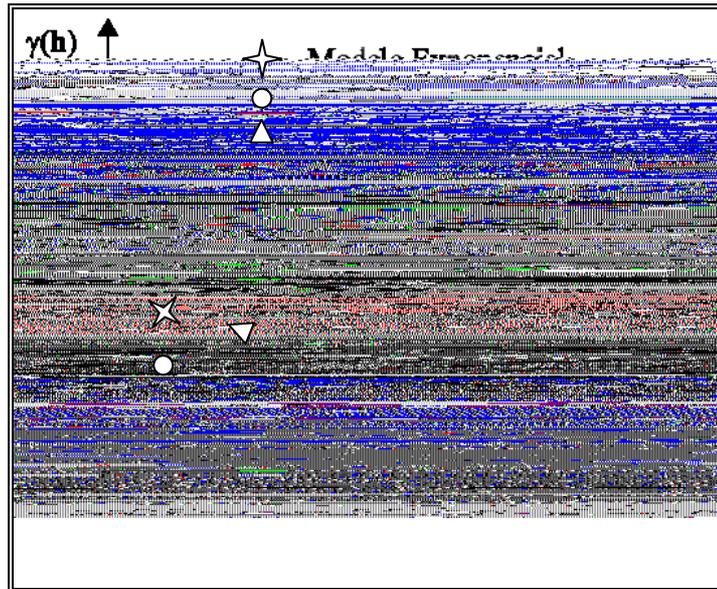


Figura 19: Tipos de modelos de semivariogramas experimentais (Isaaks *et al.*, 1989).

- Modelo Exponencial de Semivariograma:

$$\gamma_{(h)} = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

- Modelo Gaussiano de Semivariograma:

$$\gamma_{(h)} = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right)^2 \right] & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

- Modelo Potencial de Semivariograma (analogamente):

$$\mathcal{V}_{(h)} = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ C_0 + c \cdot |h|^e & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

### 3.4.1.2 Krigagem Ordinária

A krigagem utiliza vários métodos de estimativa, sendo eles: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, Co-krigagem, krigagem disjuntiva etc. (Oliver e Webster, 1990).

No entanto o procedimento conhecido por krigagem ordinária é o mais difundido e utilizado como estimador na maioria dos ramos das ciências naturais.

Através da utilização do processo de krigagem ordinária um valor desconhecido  $Z_{(x_0)}$  pode ser estimado através da utilização de um conjunto de  $n$  valores com coordenadas  $(x_i, y_i)$ , adicionando-se um parâmetro  $\lambda_0$  (Journel, 1988).

$$Z_{x_0}^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(x_i)} \quad (9)$$

Fazendo-se uso da rotina exposta por Camargo (2005) para explicar como deve-se utilizar a krigagem ordinária, é desejável obter-se um estimador não tendencioso, ou seja:

$$E[Z_{x_0} - Z_{x_0}^*] = 0 \quad (10)$$

Para que isto ocorra é necessário que as médias dos valores estimados e reais sejam iguais. Quando aplica-se a equação (9) na equação (10), obtêm-se:

$$E[Z_{x_0}] = E\left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_{(x_i)}\right] \quad (11)$$

Para que a igualdade da equação (11) seja satisfeita é necessário que:

$$\lambda_0 = 0 \text{ e } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (12)$$

Com essas condições atendidas, o estimador de krigagem ordinária é:

$$Z_{x_0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_{(x_i)} \quad (13)$$

Adotando-se a condição de  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$  para minimizar a variância do erro ( $Var[Z_{x_0} - Z_{x_0}^*]$ ), os pesos  $\lambda_i$  são obtidos a partir das seguintes condições:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_j \cdot C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0) & \text{para } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (14)$$

Onde:

$C(x_i, x_j)$  e  $C(x_i, x_0)$  → São respectivamente, a semivariância entre os pontos  $x_i$  e  $x_j$  e entre os pontos  $x_i$  e  $x_0$ ;

$\alpha$  → É o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

A variância minimizada do erro, ou variância de krigagem ordinária ( $\sigma_{ko}^2$ ) é (Journel, 1988):

$$\sigma_{ko}^2 = Var[Z_{x_0} - Z_{x_0}^*] = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C(x_i, x_0) - \alpha \quad (15)$$

Deve-se atentar para a correta determinação das coordenadas dos dados, pois em rodovias a continuidade deve ser observada ao longo de sua extensão (km) e não cartesianamente. Isto justifica-se pelo fato de que os fenômenos ocorridos nelas se prolongam linearmente.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Salienta-se que os conceitos da Geoestatística utilizam uma matemática complexa, mas sua aplicação é um tanto facilitada pela utilização de softwares, o que permite o seu emprego nas mais diversas áreas das ciências naturais.

A determinação de Unidades de Amostragem (UAs), para os “casos estudados” nesta tese (Estados do Ceará e da Paraíba), foi feita através da aplicação dos conceitos da Geoestatística apresentados neste capítulo. A escolha desta ferramenta para o dimensionamento de UAs deve-se ao entendimento do princípio de variação espacial dos parâmetros de desempenho de pavimentos, constatada em estudos realizados no PPGEC/UFRGS.

O estabelecimento de UAs realizada nesta tese para as malhas rodoviárias da Paraíba e do Ceará objetiva fornecer um meio de otimizar futuras campanhas de monitoramentos de parâmetros de desempenho pelos Órgãos Rodoviários destes estados. Isto diminuirá o tempo e os custos dispendidos em campanhas de monitoramento, tornando-as possíveis de serem realizadas periodicamente, retroalimentando o subsistema de pesquisa do Sistema de Gerência de Pavimentos.

## 4 PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Previsão de desempenho de pavimentos é a quantificação da redução do nível de serventia ou geração de defeitos ao longo de sua vida de serviço (IPR-720, 2006).

A avaliação presente e futura de desempenho de pavimentos envolve técnicas de obtenção de parâmetros de desempenho em campo, conhecimento do comportamento esperado para cada tipo de pavimento e utilização de modelos matemáticos que possibilitem retratar o comportamento do pavimento ao longo do tempo, esclarecendo uma condição futura.

Em conjunto com esses fatores, a inferência do desempenho dos pavimentos ao longo do tempo (levantamento periódico de dados) garante a acurácia do modelo de previsão desenvolvido.

Torna-se fundamental, no desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho, o conhecimento dos três fatores seguintes:

- Tipo de Defeitos: Deve-se definir quais os principais tipos de defeitos em pavimentos. Também deve definir medidas de restauração apropriadas para cada tipo de defeito;
- Técnica de Levantamento de Dados: Deve-se optar pela técnica de obtenção de dados de desempenho (deflexão, *IRI*, *ATR*, *IGG* e *PCI*) mais econômica possível, mas que seja capaz de fornecer dados confiáveis;
- Modelagem: A definição do tipo de modelo, da técnica de modelagem e variáveis que serão utilizadas no desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho, definirão a sua propriedade de uso (Nível de Rede ou Nível de Projeto).

Nas seções seguintes, os três itens anteriores serão discutidos enfocando-se o estudo de pavimentos asfálticos.

## 4.1 DEFEITOS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A mais recente norma brasileira que aponta a terminologia de defeitos em pavimentos flexíveis e semi-rígidos é a DNIT 005/2003 – TER, que substitui a norma DNER-TER 001/78.

A norma DNIT 005/2003 – TER classifica os defeitos em oito categorias (ver Figura 20). Elas são divididas em Fenda, Afundamento, Ondulação ou Corrugação, Escorregamento, Exsudação, Desgaste, Panela ou Buraco e Remendo.

Os mecanismos que ocasionam no desenvolvimento de defeitos em pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico consistem em fatores fundamentais para o engenheiro identificar a técnica mais adequada para suas correções. Rodrigues (2003) aponta, resumidamente, os seguintes mecanismos de deterioração:

- Formação e propagação de trincas nas camadas asfálticas do revestimento, decorrentes da fadiga provocada pela repetição das cargas do tráfego;
- Surgimento de afundamentos em trilha de roda ou de ondulações na superfície em decorrência do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas, sob a repetição das cargas do tráfego;
- Em uma camada de base de drenagem lenta, a formação de trincas no revestimento dá acesso a águas provenientes de chuvas, que se acumulam no topo da base. Com a passagem de uma carga de roda, gera-se um excesso de pressão neste local, levando ao bombeamento de finos da base para a superfície (erosão) e a solicitações dinâmicas elevadas sob a camada de revestimento, acelerando a sua deterioração. Se a água atingir e se acumular no topo do subleito, não sendo este drenante, aumenta a geração de deformações plásticas nessa camada e a sua intrusão na base granular;
- Envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação, que fragiliza a mistura asfáltica e facilita seu trincamento e o arrancamento de agregados. A velocidade com que a oxidação do asfalto se processa depende das condições de temperatura, umidade e insolação. As oscilações térmicas levam à formação de trincas superficiais, cujo potencial de geração é aumentado pela oxidação dos primeiros 25 mm do topo da camada asfáltica;

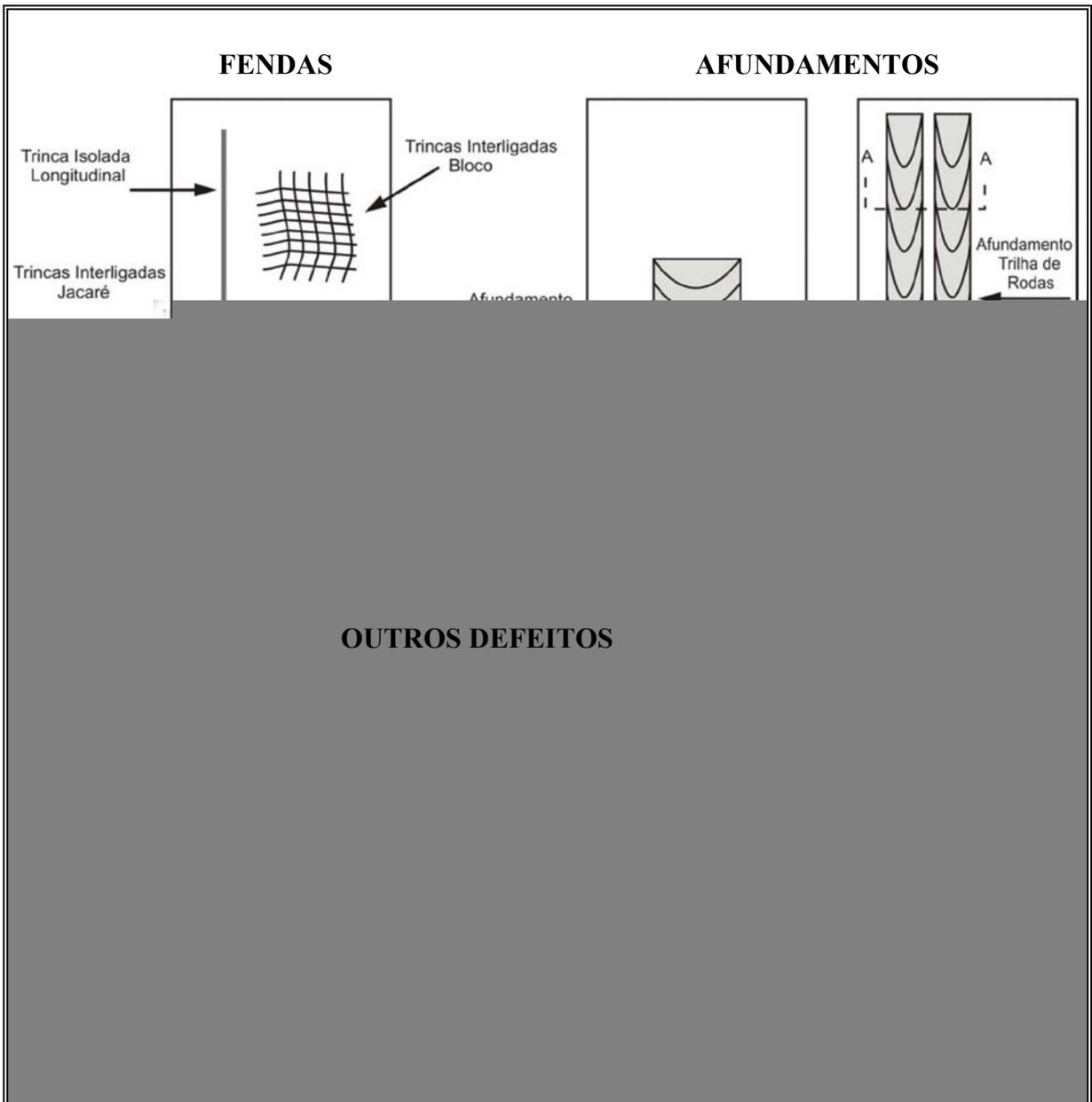


Figura 20: Defeitos de superfície em pavimentos asfálticos (fonte: DNIT 005/2003 – TER).

- Desgaste com exposição de agregados e conseqüente perda da macrotextura da superfície do pavimento, em decorrência da abrasão provocada pelos veículos, acelerado pelo intemperismo (oxidação do asfalto), levando à queda do coeficiente de atrito. Este problema é especialmente grave nos revestimentos em Tratamento Superficial; e

- O reforço de pavimentos tem seu desempenho marcado pelas fraquezas estruturais do pavimento antigo subjacente. As trincas deste podem se propagar através da camada de recapeamento, desencadeando o fenômeno da “reflexão de trincas”.

O interessante, antes de abordar cada um desses procedimentos, é determinar o grau de severidade, a extensão e frequência dos defeitos nos pavimentos. Isto irá recorrer no tipo de técnica de manutenção a ser utilizada.

Quando se trata de defeitos localizados as técnicas de manutenção são classificadas como “Conservação Corretiva Rotineira”. Caso exista séria deficiência estrutural ou funcional em grandes trechos do pavimento, torna-se necessária à aplicação de “Técnicas de Restauração”. Muitas vezes, a aplicação de técnicas de restauração em um tempo hábil (entendido como o momento ideal para manter o pavimento em níveis de serventia adequado ao longo do tempo) pode ser classificada como “Correção Preventiva” ou “Técnicas de Manutenção Preventiva”.

A seguir são apresentadas as medidas básicas de manutenção mais utilizadas nos dois principais grupos de serviços em infra-estrutura rodoviária (Conservação Corretiva e Técnicas de Restauração).

#### 4.1.1 Correção de Defeitos

A IPR-710 (2005) indica os seguintes procedimentos de correção de defeitos de acordo com as suas origens:

- Remendo superficial: Este tipo de remendo pode ser adotado quando o problema a corrigir se restringe às camadas asfálticas a serem retiradas, tais como:
  1. Trincamento prematuro por fadiga (excesso de vazios de ar, segregação da mistura, compactação deficiente etc.);
  2. Instabilidade da mistura asfáltica (ex: excesso de asfalto);
  3. Desagregação localizada de agregados, por segregação da mistura.
- Remendo profundo: É quando a origem do problema (trincamento excessivo, afundamentos plásticos severos) se encontra em uma camada subjacente ao

revestimento (base, sub-base, reforço, subleito), ou esta camada subjacente está sendo afetada por algum problema de drenagem;

- Lama Asfáltica: O revestimento obtido após sua aplicação é impermeável e é conveniente ao rejuvenescimento da camada asfáltica e correção do atrito. A lama asfáltica não permite nenhuma correção da irregularidade da via e conduz a um revestimento que não é muito rugoso, sendo, portanto, bem conveniente para a conservação de vias urbanas (IBP, 1983); e
- Tratamentos Superficiais: Estes tratamentos são particularmente interessantes quando se objetiva uma elevada resistência à derrapagem. De acordo com a publicação IBP (1983), os tratamentos são uma solução de conservação, técnica e economicamente viáveis para pavimentos com revestimentos antigos, porém ainda em boas condições. Os progressos realizados na formulação das emulsões com alta concentração de asfalto permitem sua utilização na maioria dos casos. A impermeabilização provocada pelo tratamento leva-o a ser utilizado em rejuvenescimento e na selagem de camadas. A rugosidade e a durabilidade que o tratamento duplo com ligante asfáltico modificado fornece permite seu emprego em rodovias de tráfego intenso.

Quando o revestimento apresenta exsudação do ligante, Larsen (1985) indica as seguintes técnicas de conservação:

- Espalhamento e cravação, por rolo compressor pesado, de agregado pré-aquecido;
- Aquecimento do ligante exsudado, por raios infravermelhos, e aplicação de agregado complementar;
- Aplicação de solvente especial e agregado pré-envolvido por pequena taxa de ligante betuminoso;
- Remoção do ligante exsudado por jato de areia ou de ar quente (aproximadamente 160°C); e
- Aplicação de tratamento superficial.

#### 4.1.2 Técnicas de Restauração

As técnicas de restauração de pavimentos devem ser apropriadas ao tipo e grau de degradação de pavimentos. Na maioria dos casos a restauração de pavimentos ocorre quando o mesmo encontra-se parcialmente ou totalmente trincado. Nesses casos, a opção por sistemas anti-reflexão de trincas é imprescindível para a obtenção de sucesso.

Os principais serviços dentro desse grupo realizados no Brasil são (IPR-710, 2005; Rodrigues, 2003):

- Recapeamento simples em CBUQ;
- Fresagem total ou parcial do revestimento deteriorado e aplicação de camada em CBUQ que aumente a capacidade estrutural do pavimento;
- Colocação de camada intermediária especial contra reflexão de trincas, seguida de recapeamento (“Sistema Anti-Reflexão de Trincas”);
- Colocação de Geotêxtil após uma pintura de ligação na camada existente (trincada), seguida de recapeamento (“Sistema Anti-Reflexão de Trincas”);
- Fresagem parcial do revestimento deteriorado, seguida de aplicação de camada intermediária contra reflexão de trincas e coberta com novo revestimento em CBUQ. Considera-se em dois níveis: 1 e 2, com o nível 2 envolvendo maiores espessuras;
- Reciclagem do revestimento e da base granular deteriorados, formando-se uma base tratada com emulsão ou cimento e construindo-se um novo revestimento;
- Aplicação de Tratamento Superficial Duplo sobre o tratamento existente;
- Remoção e reconstrução (com ou sem reciclagem) do revestimento em tratamento e da camada de base, seguida de aplicação de camada de TSD;
- Remoção e reconstrução (com ou sem reciclagem) do revestimento existente e da camada de base, seguida de aplicação de camada de CBUQ;

- Remoção e reconstrução total do revestimento asfáltico existente, nas condições do projeto original, seguida de complementação da espessura da capa em CBUQ (reforço estrutural); e
- Remoção e reconstrução total do revestimento asfáltico.

## 4.2 TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE DADOS

Os monitoramentos de parâmetros de desempenho de pavimentos auxiliam na etapa de diagnóstico da malha pavimentada e na elaboração de modelos de previsão de desempenho.

A seleção dos parâmetros que serão alvo de monitoramentos deve ser criteriosa e apropriada para se ter uma idéia da condição funcional e estrutural do pavimento, bem como das condições de segurança ao rolamento do pneu.

No que diz respeito à condição funcional, a queda de serventia do pavimento está relacionada ao aparecimento de (IPR-710, 2005; Pinto e Preussler, 2002; IPR-697/100, 1996):

- Deformações no seu perfil longitudinal e transversal devido a afundamentos “diferenciais” e em trilhas de roda, as quais podem ser avaliadas, respectivamente, pelo Índice de Irregularidade Longitudinal (*IRI*) e Afundamento de Trilha de Roda (*ATR*); e
- Desgaste da superfície do pavimento, ocasionando o aparecimento de fissuras, afundamentos localizados e panelas, e medidas paliativas como remendos. A avaliação do desgaste do pavimento pode ser realizada através de Inventários da Superfície de Pavimentos, obtendo-se o Índice de Gravidade Global (*IGG*) ou o Índice de Condição do Pavimento (*PCI – Pavement Condition Index* ou *PCR – Pavement Condition Rating*).

Quanto à condição estrutural, a medição e avaliação das deformações ou deflexões recuperáveis representam, em princípio, um bom indicativo do comportamento elástico da estrutura na aplicação de cargas de veículos. Contudo, muitas vezes deflexões baixas não estão diretamente relacionadas a uma boa situação estrutural. Como pavimentos são estruturas constituídas por várias camadas, a sua deflexão total não é fator determinante na comparação

entre estruturas com configurações diferentes. A análise de deformações e tensões em cada camada fornece respostas mais representativas da condição estrutural.

Por último, e não menos importante, as condições de segurança ao rolamento do pneu do veículo em contato com o pavimento podem ser avaliadas através do monitoramento da micro-textura e macro-textura do revestimento, os quais não fazem parte dos objetivos desta tese, pela não disponibilidade de dados para análise.

A seguir serão apresentados os procedimentos para monitoramento de parâmetros de desempenho de pavimentos considerados como mínimos necessários em um SGP. São eles:

- Irregularidade Longitudinal (*IRI*);
- Afundamento de Trilha de Roda (*ATR*);
- Inventário da Superfície de Pavimentos;
- Deflexões recuperáveis (*Do*).

#### 4.2.1 Irregularidade Longitudinal

A irregularidade de um pavimento é conceituada como o desvio da superfície da rodovia com relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via (DNER-PRO 182/94).

A irregularidade é influenciada por vários componentes, tais como: problemas construtivos, trincamento, desgaste, deformações e manutenções realizadas.

São apresentados três tipos de equipamentos utilizados no levantamento da irregularidade da superfície de pavimentos, onde os dois primeiros, o sistema de medição de irregularidade tipo resposta e o perfilômetro a laser, são apropriados para levantamentos contínuos de rede (a partir do deslocamento de um veículo) e o medidor de irregularidade MERLIN, sendo adequado para levantamentos descontínuos, ou seja, em segmentos curtos utilizados para testes de pavimentos (a partir de operação manual).

O equipamento tipo resposta (sensor de deslocamentos verticais e um quantificador de irregularidade com um hodômetro e um totalizador) funciona acoplado a um veículo de passeio (Figura 21), trafegando na rodovia, sem chuva, sempre na faixa escolhida para a medição, sendo que a roda direita do sistema medidor tem que acompanhar a trilha de roda externa, e a uma velocidade de tráfego constante, sendo corrigida pela curva de calibração (DNER-PRO 182/94).

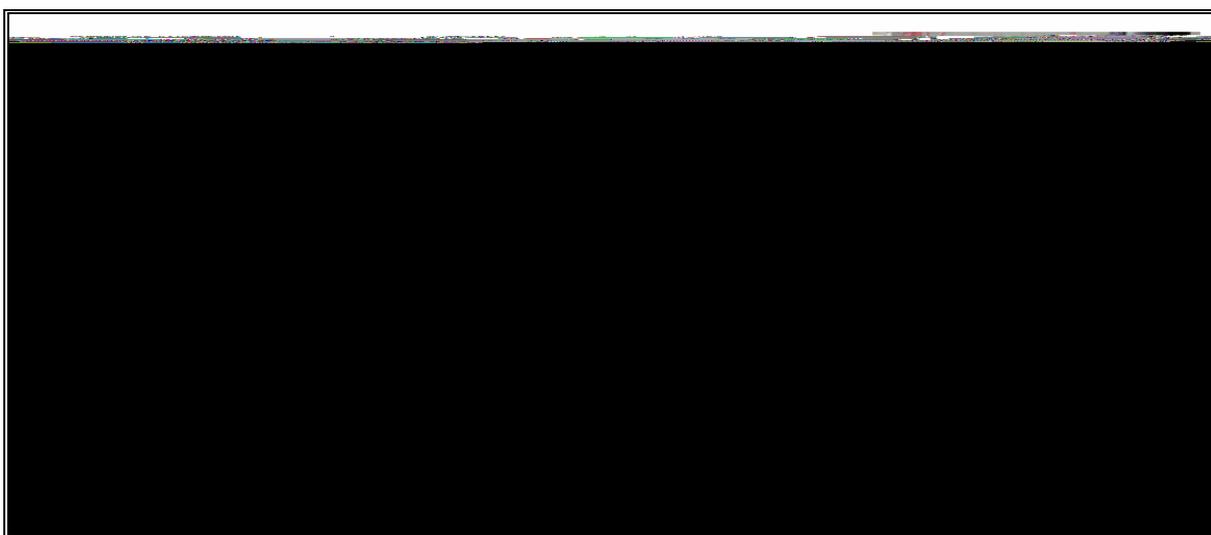


Figura 21: Conjunto de equipamentos dos medidores tipo resposta

(Fonte: <http://www.dynatest.com.br>).

Ele mede a resposta do veículo às imperfeições do pavimento, através do somatório da variação da distância entre o eixo e a carroceria do veículo. Este somatório é correlacionado com um índice de irregularidade por modelos próprios para cada veículo, levando-se em consideração a velocidade de operação da rodovia (Barella *et al.*, 2005).

Os perfilômetros a laser são equipamentos compostos por uma unidade de transdutores (em uma barra), equipada com sensores a laser (com pelo menos dois, sendo um em cada trilha de roda), dois acelerômetros e um sensor de movimento inercial, e um computador PC. Todos esses equipamentos são instalados a um veículo (Figura 22).

O funcionamento do perfilômetro consiste na leitura simultânea do deslocamento longitudinal, da altura do veículo até o pavimento e da aceleração vertical do veículo (Figura

22). Os dados são processados para que a aceleração vertical registrada seja transformada em deslocamento vertical do veículo. Com esta última medida, corrigem-se todos os valores de altura para obter-se o perfil longitudinal (Barella *et al.*, 2005).

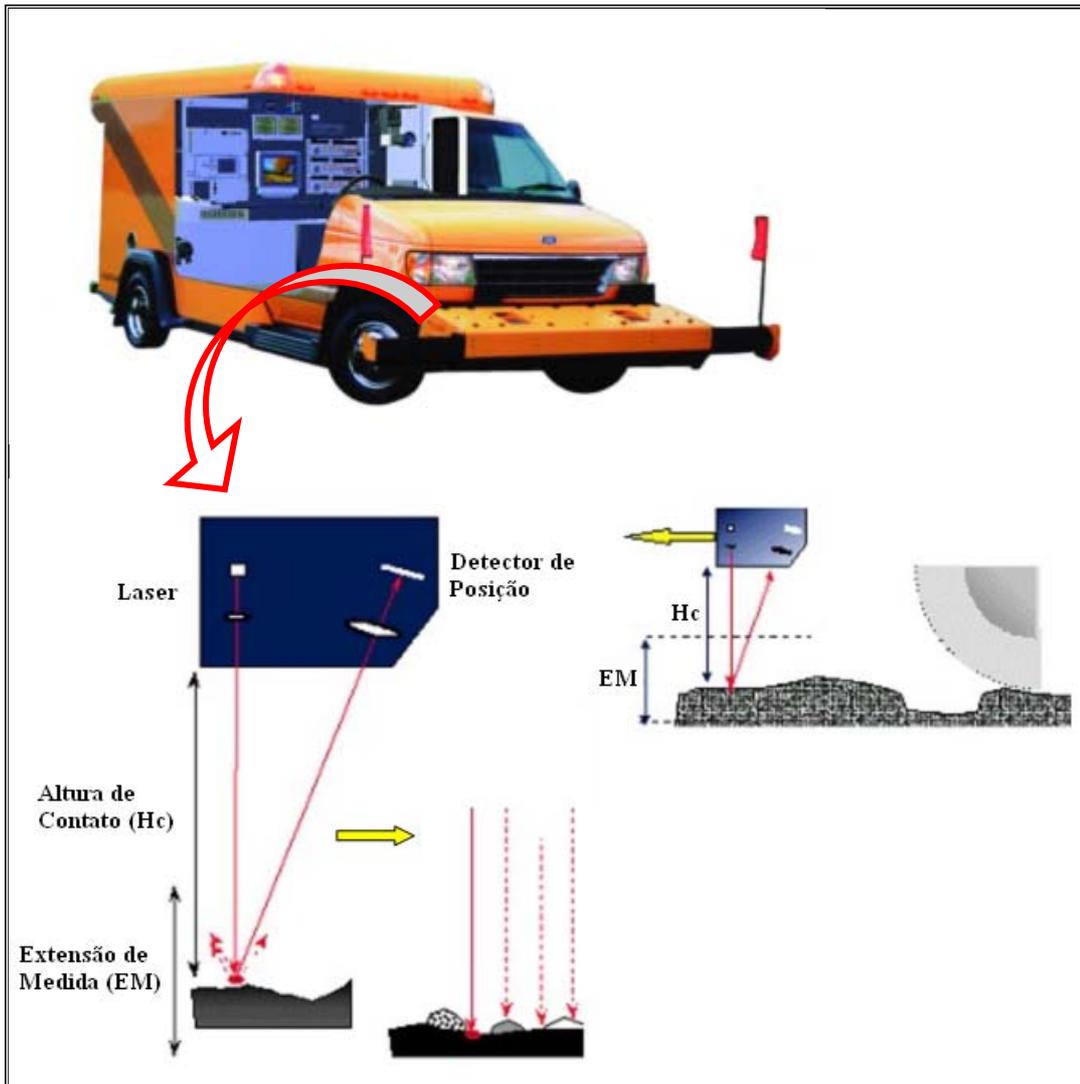


Figura 22: Perfilômetro a laser – esquema do funcionamento dos sensores

(Fonte: <http://www.roadware.com>).

Apesar dos dados de irregularidade desta tese terem sido levantados pelo equipamento tipo resposta, a utilização do perfilômetro a laser tem sido cada vez mais empregado no Brasil, muito pela convergência com os resultados de equipamento tipo resposta, mas principalmente pela possibilidade de obter-se simultaneamente dados de afundamento de trilha de roda.

O medidor de irregularidade MERLIN (*Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*), idealizado pelo Laboratório Britânico de Pesquisas de Transportes (TRL – *Transport Research Laboratory*) como alternativa de baixo custo para levantamento de irregularidade em segmentos teste, consistido em uma estrutura metálica de 1,8 m de comprimento, com uma roda dianteira, uma haste fixa de apoio na parte traseira e um apoio central oscilante (Figura 23). O apoio central oscilante mede os desvios de cota entre um ponto de referência e os demais. Um ponteiro ligado ao apoio central apresenta visualmente estas oscilações, permitindo o registro em uma planilha (TRLL, 1991).



Figura 23: Medidor de Irregularidade MERLIN (TRRL, 1991).

Esse equipamento é considerado mais exato que os dois anteriores sendo utilizado também para a calibração de medidores tipo resposta (TRRL, 1991). A sua simplicidade de operação permite a realização de levantamento de irregularidade, em pequenos trechos, por equipes dos próprios Departamentos de Estradas estudados nesta tese. Seu emprego para segmentos contínuos e extensos se torna inviável devido a sua baixa produtividade.

A medida de irregularidade oficial no Brasil é o Quociente de Irregularidade (*QI*). Porém, com a tendência atual de se utilizar os valores de *International Roughness Index (IRI)*, vêm-se

utilizando correlações para transformar  $QI$  em  $IRI$ , conforme os seguintes modelos (Sayers *et al.*, 1986; Barella *et al.*, 2005):

$$IRI = (QI + 10)/14 \quad (16)$$

e:

$$IRI = QI/13 \quad (17)$$

Algumas considerações podem ser feitas sobre a utilização dos modelos das duas equações anteriores, de acordo com os dados analisados por Barella *et al.* (2005):

- O modelo 16 (para  $QI$  obtido com equipamento tipo resposta) teve maior correlação com os valores de  $IRI$  (medidos com perfilômetro a laser) para valores baixos deste, na ordem de 2,26 m/km; e
- O modelo 17 teve maior correlação com os valores de  $IRI$  maiores que 2,26 m/km. Estes valores coincidem com os normalmente medidos para a malha rodoviária brasileira.

O DNIT estabelece em suas normas de Especificações de Serviços que um pavimento novo deva ter um  $IRI$  não maior que 2,70 m/km (DNER-ES 308/97; DNER-ES 309/97; DNER-ES 310/97; DNER-ES 314/97; DNER-ES 317/97; DNIT 031/2004 – ES; DNIT 032/2005 – ES). O limite residual do  $IRI$  determinado para rodovias administradas pelo DNIT é de 4,00 m/km (IPR-710, 2005).

A consideração do valor inicial de  $IRI$  de 2,70 m/km abre margem para tolerância de defeitos construtivos, como ondulações por imperfeições na regularização de base em tratamento superficial ou da capa asfáltica para mistura asfáltica. Estes defeitos se acentuam com a passagem de cargas de tráfego e também constituem em acréscimo nos custos de transporte.

#### 4.2.2 Afundamento de Trilha de Roda

São deformações permanentes acumuladas no pavimento, deixando como consequência um sulco onde passam os pneus dos veículos. São causadas pela consolidação inicial das camadas granulares, por ruptura do subleito e por deformações plásticas nas camadas asfálticas.

O afundamento de trilha de roda pode ser medido por dois procedimentos diferentes. O primeiro é o da norma DNIT 006/2003-PRO, que determina a utilização de uma treliça de alumínio (Figura 24), padronizada em 1,20 m de comprimento na base, dotada de régua móvel instalada em seu ponto médio, que permite medir, em milímetros, as flechas de trilha de roda.

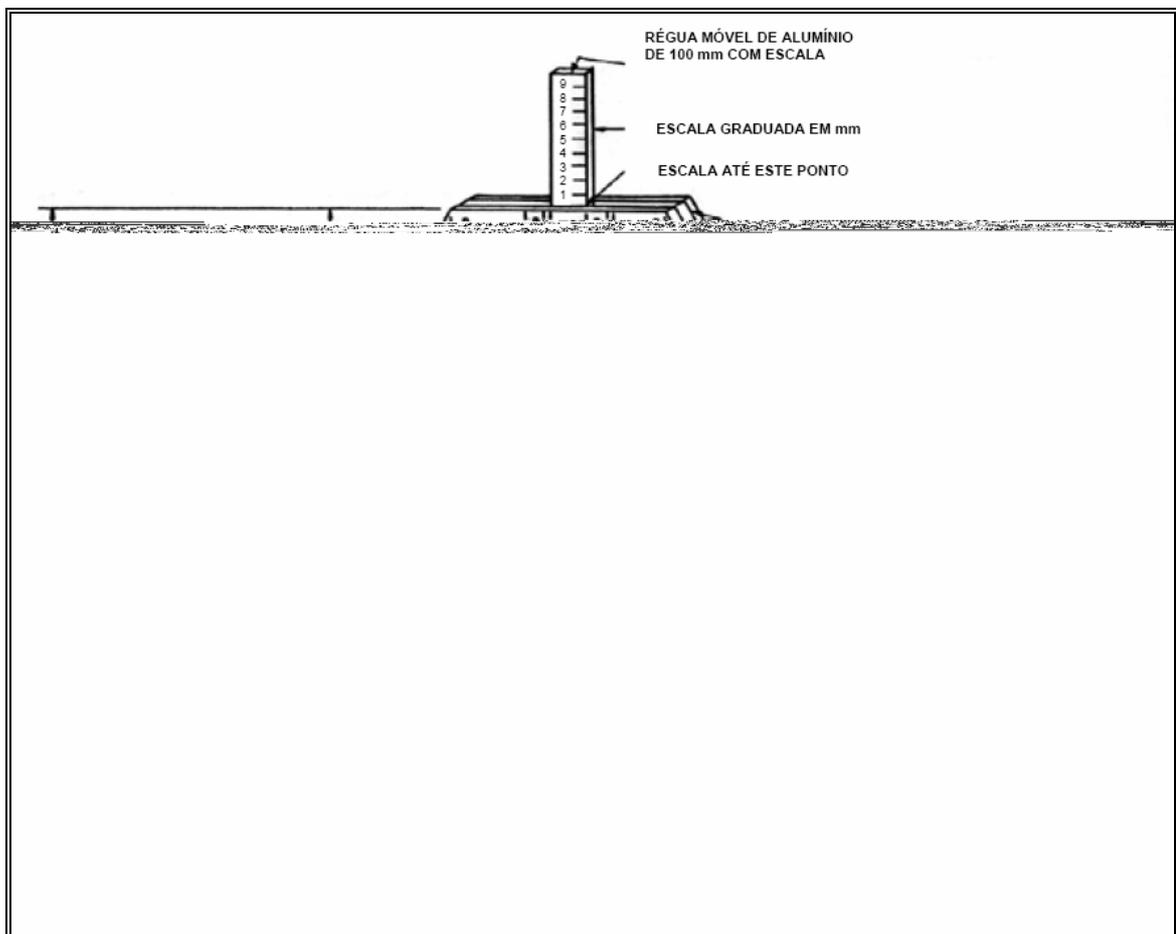


Figura 24: Treliça de alumínio (Fonte: DNIT 006/2003-PRO).

O segundo procedimento, igualmente ao levantamento de irregularidade, também utiliza o perfilômetro a laser. Neste procedimento os sensores devem ter o posicionamento na barra de

forma que simule uma treliça (conforme o que se faz na norma DNIT 006/2003-PRO quando se utiliza a treliça de alumínio). Portanto, utilizam-se 5 módulos laser posicionados ao longo de uma barra rígida de 3 metros de comprimento, sendo que os módulos 1 e 5 ficam nas extremidades da barra, os módulos 2 e 4 ficam posicionados sobre as trilhas de roda e por fim, o módulo 3 fica no meio da barra (Figura 25).

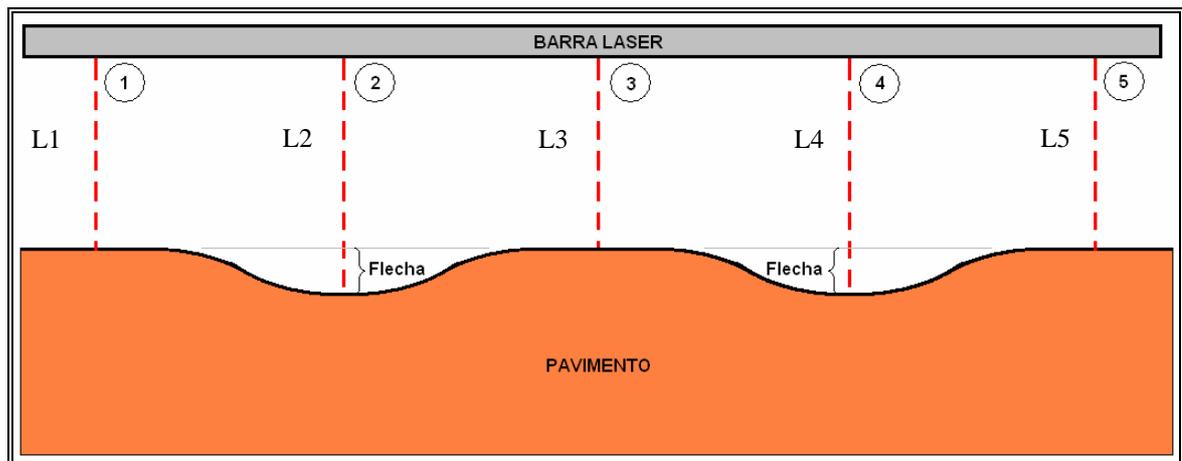


Figura 25: Sensores no levantamento de afundamento de trilha de roda.

O cálculo feito pelo equipamento para a determinação dos ATR é:

$$Flecha_{esquerda} = L_2 - (L_1 + L_3)/2 \quad (18)$$

e

$$Flecha_{direita} = L_4 - (L_3 + L_5)/2 \quad (19)$$

Os valores de *ATR* têm grande utilidade também no cômputo de índices de degradação de pavimentos asfálticos, conforme apresentado na seção seguinte.

### 4.2.3 Inventário da Superfície do Pavimento

O inventário de superfície serve para determinar o estado da superfície de um pavimento, expresso através da presença ou ausência de uma série de defeitos identificados, contados e medidos.

O seu levantamento pode ser por medições realizadas diretamente na superfície do pavimento ou visualmente, resultando em índices de defeitos em pavimentos como o Índice de Gravidade Global e o Índice de Condição do Pavimento, respectivamente.

#### 4.2.3.1 Índice de Gravidade Global

O Índice de Gravidade Global é um índice brasileiro normatizado pelo DNIT.

No levantamento descrito na norma DNIT 006/2003 – PRO, os defeitos avaliados no pavimento são principalmente os seguintes:

- Trincas FC-1;
- Trincas FC-2;
- Trincas FC-3;
- Afundamento de trilha de Rodas → medida, em milímetros, nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), correspondente ao ponto de máxima depressão; e
- Panela.

Após a identificação e classificação dos defeitos no pavimento, determina-se a frequência relativa de cada tipo de defeito no pavimento e define-se a condição do pavimento através do Índice de Gravidade Global (*IGG*), que retrata o grau de deterioração da superfície do pavimento. A Tabela 3 confere, de acordo com o *IGG*, um conceito que retrata o grau de degradação atingido ao pavimento inventariado.

Tabela 3: Conceitos de degradação do pavimento em função do *IGG*.

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG \geq 160$

(fonte: DNIT 006/2003 – PRO)

#### 4.2.3.2 Índice de Condição do Pavimento

O Índice de Condição do Pavimento (*Pavement Condition Index – PCI*) foi originado com o método desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers (USACE)* no ano de 1976, com o intuito de ser introduzido em sistemas de gerência de pavimentos no Estados Unidos (Shahin, 1994). Atualmente, este índice (ou outros derivados dele) é utilizado na maior parte dos estados americanos, no sistema Micro PAVER 5.3 do USACE e em alguns países no mundo com o objetivo de avaliar as necessidades atuais de manutenção em revestimentos.

O Índice de Condição do Pavimento utilizado na avaliação de pavimentos do Ceará é baseado na metodologia do *Pavement Condition Rating (PCR)* do Departamento de Transportes do Estado Americano de Ohio (ODOT, 2004). Através de levantamento visual, um segmento de pavimento é analisado pelos registros de cada defeito, sua extensão e severidade. A partir destes dados, um número pode ser calculado representando a condição do pavimento.

O *PCR* de um pavimento em perfeito estado de conservação é 100. À medida que os defeitos aparecem nos pavimentos e se desenvolvem, um “Valor Deduzido” (*VD*) deve ser calculado e diminuído do valor de 100, contudo o *PCR* não pode ser menor que 0 (ODOT, 2004). As deduções para cada tipo de defeito observado devem ser calculadas pela multiplicação do Fator de Equivalência (função do tipo e severidade do defeito) e sua extensão relativa no trecho analisado.

No caso particular do DERT-CE, o cálculo final do *PCR* é dado pela dedução do maior *VD* entre os grupos de defeitos observados no pavimento. Apenas cinco conjuntos de defeitos são considerados no cálculo do *VD*, diferentemente dos métodos originais do *PCI* e *PCR*, os quais consideram 19 tipos diferentes de defeitos. Os defeitos considerados refletem a origem das deficiências estruturais do pavimento e são divididos em Trinca de Fadiga, Trinca de Bloco, Remendo, Afundamento e Desgaste. A Tabela 4 apresenta as Severidades e os Fatores de Equivalência para cada tipo de defeito considerado, além do método de cálculo utilizado no cômputo do *VD*.

A Figura 26 apresenta a classificação aplicada no sistema de gerência de pavimentos do Departamento de Transportes do Estado Americano de Ohio (ODOT, 2004) para intervalos de valores do *PCR*.

Tabela 4: Método de Cálculo do *PCR*.

Tipo de Defeito	Descrição	Extensão do defeito (%)		Severidade	Fator de Equivalência (FE)
		Mínimo	Máximo		
Afundamento	Pouco	0	8	0	0,10
	Razoável	8	20	1	0,30
	Alto	20	40	2	0,50
	Excessivo	40	100	3	0,80
Desgaste	Pouco	0	8	0	0,10
	Razoável	8	35	1	0,30
	Alto	35	60	2	0,50
	Excessivo	60	100	3	0,80
Remendo	Pouco	0	6	0	0,10
	Razoável	6	17	1	0,30
	Alto	17	32	2	0,50
	Excessivo	32	100	3	0,80
Trincamento de Bloco	Pouco	0	15	0	0,10
	Razoável	15	50	1	0,30
	Alto	50	70	2	0,50
	Excessivo	70	100	3	0,80
Trincamento de Fadiga	Pouco	0	15	0	0,10
	Razoável	15	32	1	0,30
	Alto	32	60	2	0,50
	Excessivo	60	100	3	0,80
$VD = (FE \cdot x_i) / x_i$ ; $x_i$ = extensão do defeito $i$ ; $x_i$ = extensão do segmento					
$PCR = 100 - VD$ ; para o maior $VD$ entre os tipos de defeito					

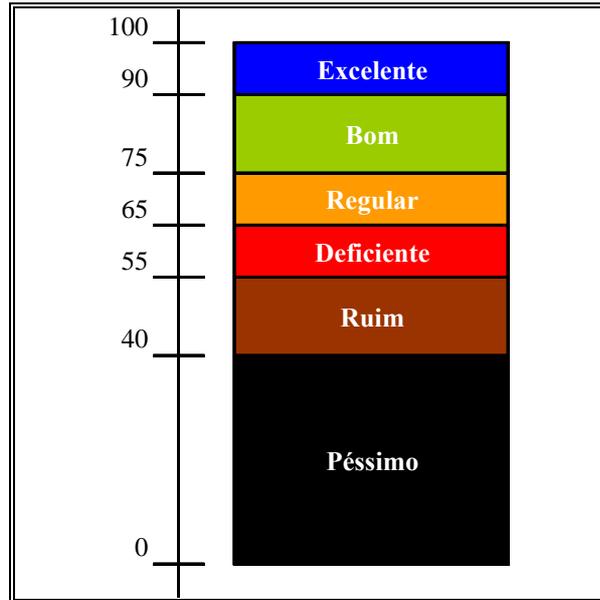


Figura 26: Classificação Funcional pelo *PCR* (Fonte: ODOT, 2004).

#### 4.2.4 Levantamento de Deflexão

Deflexão é uma deformação recuperável registrada na superfície do pavimento, originada pelas cargas de tráfego e que deixa de existir algum momento após a retirada da carga.

No Brasil são três os equipamentos comumente utilizados no levantamento de deflexões: Viga Benkelman, Deflectógrafo Digital e *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

A viga Benkelman é um aparelho composto por três pés destinados a medir deflexões, causadas por cargas aplicadas o pavimento, produzidas em um extensômetro acionado por uma alavanca interfixa, cuja relação entre os comprimentos dos braços (um entre a articulação e a ponta de prova e outro entre o extensômetro e a articulação) é conhecida ( $a/b$ ) e pode ser 2/1, 3/1 ou 4/1, conforme Figura 27 (DNER-ME 024/94 e DNER-ME 061/94).

Ela permite a medição eficaz da deflexão máxima com carregamento quase-estático em pavimentos. A sua utilização como instrumento medidor de bacias de deformações é questionável, pois não simula a condição real de solicitação do pavimento (velocidade), além de apresentar baixa repetibilidade nas medidas de deformações e grandes resíduos à medida que a carga se afasta do ponto de medição (Pinto e Preussler, 2002).

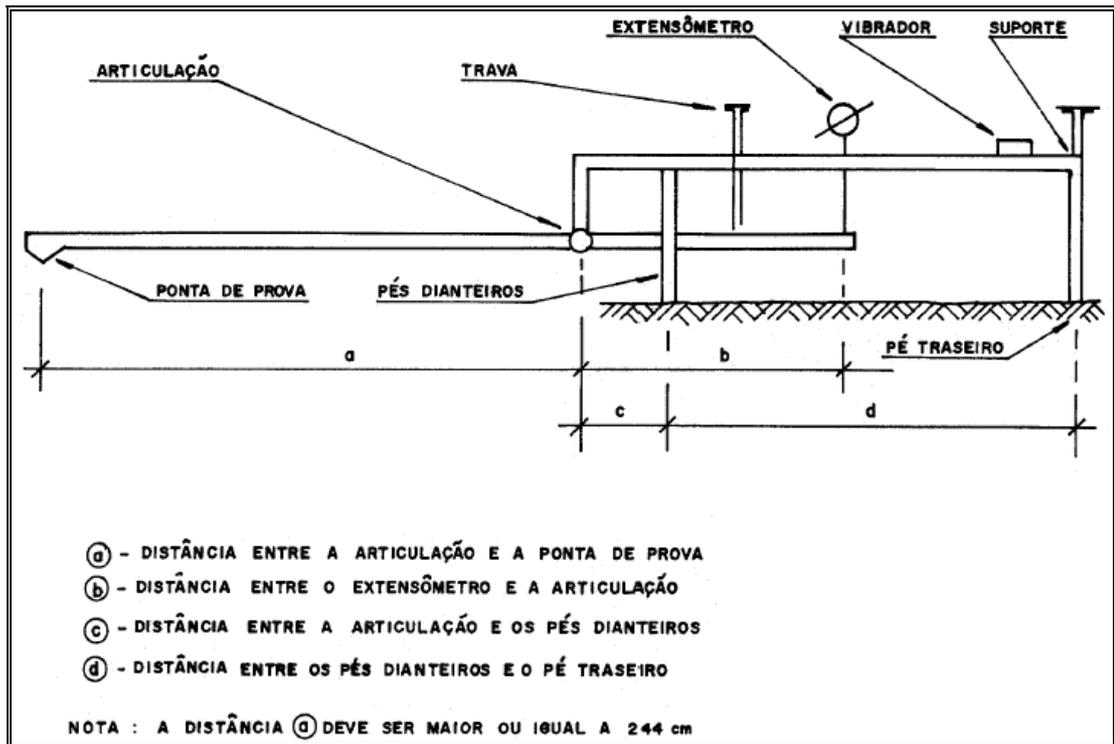


Figura 27: Elementos constituintes da Viga Benkelman (Fonte: DNER-ME 024/94).

O ensaio com a viga é realizado após sua aferição, de acordo com a norma DNER-PRO 175/94, e conclusão da marcação dos pontos de medida de deflexão. Um eixo tandem simples com rodas duplas deve ser posicionado de tal forma que um dos conjuntos de rodas duplas traseiras fique centrado no ponto selecionado na trilha externa do pavimento e seu eixo (com 8,2 tf) fique perpendicular ao eixo da pista (Figura 28). Com a ponta de prova entre os pneus da roda dupla faz-se a primeira leitura ( $L_0$ ) e, após o caminhão afastar-se 10m do ponto de ensaio e decorridos 3 minutos da ligação do vibrador, faz-se a segunda leitura ( $L_f$ ).

O deslocamento no ponto de prova ( $D_0$ ) é dada por (DNER-ME 024/94):

$$D_0 = (L_0 - L_f) \cdot a/b \quad (20)$$

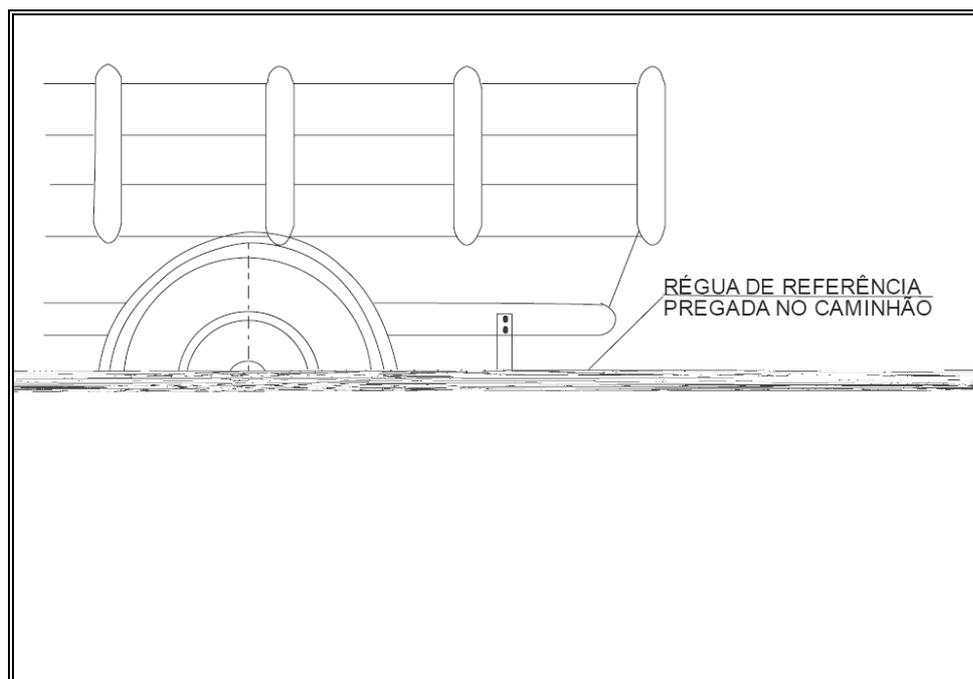


Figura 28: Esquema do ensaio com a Viga Benkelman (Fonte: DNER-ME 024/94).

O equipamento chamado Deflectógrafo Digital, também conhecido por Viga Eletrônica, também foi introduzido no mercado nacional. O Equipamento, descrito por Fabrício *et al.* (2000) e Azambuja (2004), combina o modelo operacional da Viga Benkelman, mas as deflexões são medidas por um LVDT posicionado na extremidade da viga. O equipamento armazena dados de bacias deflectométricas em medidas espaçadas de 5 em 5cm de uma bacia de até 3,20 m de comprimento. Este equipamento consiste em uma adaptação do equipamento *Road Surface Deflectometer* de ampla aplicação na República Sul-africana e em pesquisas desenvolvidas na Califórnia (Estados Unidos) com emprego de simulador de tráfego tipo HVS (IPR-697/100, 1996).

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

O FWD simula o efeito da passagem de uma roda em movimento sobre o pavimento. Essa simulação é feita através da queda de um conjunto de massas, de uma determinada altura, sobre um sistema de amortecedores capazes de transmitir ao pavimento um pulso de carga. A carga é transmitida ao pavimento através de uma placa de 30 cm de diâmetro e é medida através de uma célula de carga. Sua aplicação tem duração de 25 a 30 ms, tempo correspondente à passagem de um veículo com velocidade de 60 a 80 km/h (Nóbrega, 2003).

As deflexões são medidas através de sete sensores (geofones, FWD Dynatest, ou LVDT's, FWD KUAB) posicionados de forma a se construir a bacia de deflexão (Figura 29). Esses dados são todos lidos e registrados automaticamente em um microcomputador. A partir do conhecimento do tipo de material e espessura  $h_i$  de cada camada do pavimento, é possível processar retronálise da bacia de deflexão, obtendo-se os módulos de elasticidade  $E_i$ .

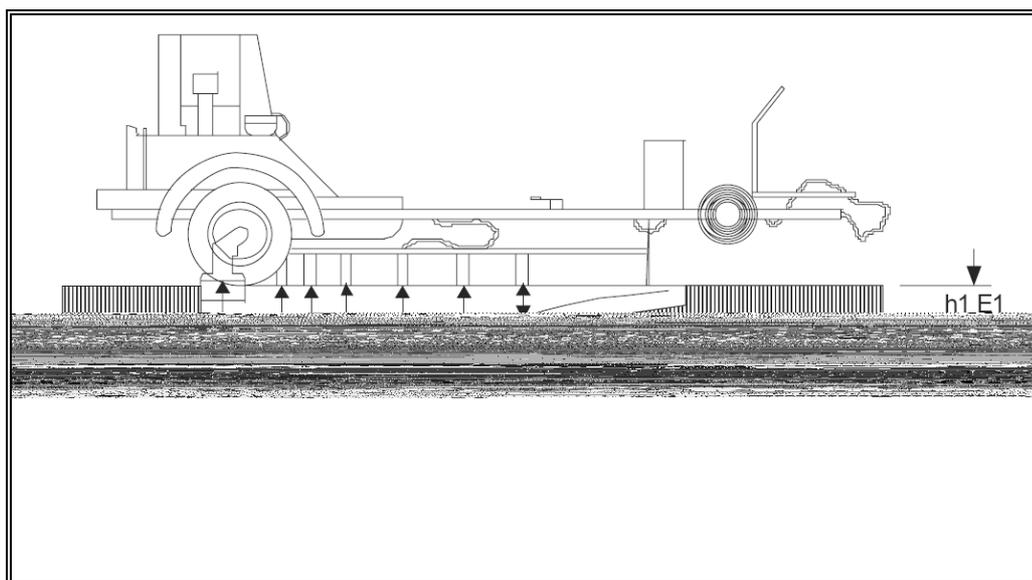


Figura 29: Bacia de Deformação gerada por Defletômetro de Impacto (Fonte: IPR-720, 2006).

As grandes limitações da utilização do FWD no Brasil é o custo alto de aquisição do equipamento e a negligência na sua calibração por padrões internacionais. Este último, caso não afete a repetibilidade dos resultados, influencia ao menos na magnitude das medições.

No que se refere à deflexão considerada crítica em pavimentos de mistura asfáltica, a norma DNER-PRO 269/94 estabelece o modelo 21 para a sua determinação, em função do número de repetições acumulados do eixo padrão.

$$\log \bar{D} = 3,148 - 0,188 \cdot \log N_p \quad (21)$$

Onde:

$\bar{D}$  é a deflexão máxima admissível medida com Viga Benkelman ( $10^{-2}$  mm); e  $N_p$  é o número cumulativo de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,17 tf no período de análise, considerando fatores de equivalência da AASHTO.

Pavimentos com revestimento em tratamento superficial podem suportar deflexões bem maiores que os revestidos em mistura asfáltica, devido à própria concepção de projeto.

Vale salientar que o modelo 21 é válido apenas na comparação com deformações máximas recuperáveis medidas por Viga Benkelman e Deflectógrafo Digital, os quais são equipamentos com mesmo princípio de ensaio. A comparação com deflexão máxima medida com FWD certamente constitui em erro devido ao princípio diferente deste levantamento.

A correção da temperatura para o caso de levantamentos de deflexão em concretos asfálticos também é fator preponderante para aplicação em modelos de deflexão admissível e na realização de retroanálises. Este fator só pode ser desconsiderado em regiões onde a temperatura do pavimento em uso for pouco variável no decorrer do ano, conforme foi ponderado para o caso dos valores de deflexão com FWD no estado do Ceará e com Viga Benkelman na Paraíba.

#### 4.3 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Os modelos de previsão de desempenho de pavimentos são ferramentas fundamentais em um SGP, pois com eles pode-se determinar a condição futura dos pavimentos, condição necessária em análises plurianuais. O uso de modelos de previsão possibilita (NHI, 1998):

- Determinar a vida restante dos pavimentos, isto quando se tem conhecimento da condição limite aceitável;
- Otimizar a combinação de projetos, estratégias e o tempo para a agência concluir as metas estabelecidas;
- Avaliar os impactos temporais de vários cenários elencados;
- Promover a retroalimentação para o processo de projeto do pavimento; e
- Auxiliar na estimativa dos custos do ciclo-de-vida do pavimento.

O nível de complexidade e o grau de acurácia necessário para um modelo de previsão de desempenho dependem do fim para o qual ele será empregado. Modelos de desempenho utilizados em análises em nível de projeto necessitam maior acurácia do que aqueles que serão empregados em análise em nível de rede (Shahin, 1994).

Algumas pesquisas relevantes deram suporte ao desenvolvimento de modelos de desempenho. Uma delas é o programa LTPP (*Long-Term Pavement Performance*) dos EUA, iniciado em 1987, como parte do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), transferido para o *Federal Highway Administration* (FHWA) em 1992, que realiza o monitoramento de pavimentos há mais de 20 anos, avaliando mais de 2.400 seções de pavimentos flexíveis e rígidos, sendo a maior pesquisa sobre desempenho de pavimentos do mundo.

Outra pesquisa relevante, realizada no Brasil entre 1975 e 1981, foi a Pesquisa Sobre Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR), desenvolvido pela extinta Empresa Brasileira de Planejamento de Transporte (GEIPOT), que resultou nos modelos de previsão de desempenho desenvolvidos por Queiroz (1981) e, em parte, por Paterson (1987), ambos servindo como ponto de partida para o desenvolvimento do HDM-III e o atual HDM-4.

Outros trabalhos que abordam modelos de previsão de desempenho que se destacam no Brasil após o PICR são os de Marcon (1996) e Yshiba (2003).

Marcon (1996) estabeleceu modelos de previsão de desempenho com base em dados da malha rodoviária de Santa Catarina monitorados em 1990. O desempenho dos pavimentos foi avaliado através de variáveis como quociente de irregularidade, deflexões máximas médias, índice de gravidade global, trincamento total e profundidade média das trilhas de roda.

Yshiba (2003) desenvolveu modelos estatísticos que representam os efeitos dos fatores idade, tráfego e número estrutural no desempenho de pavimentos, quantificados em termos de irregularidade longitudinal e de deflexões. Foram estabelecidos modelos por regressão, tendo por base dados históricos de avaliações realizados entre 1995 e 1998, da condição da malha rodoviária do estado do Paraná.

Nas seções seguintes serão detalhados os tipos de modelos existentes, as técnicas de modelagem e variáveis apropriadas para uso em Nível de Rede e Nível de Projeto e modelos de desempenho resultados de algumas das principais pesquisas realizadas no Brasil.

### 4.3.1 Tipos de Modelos

Na elaboração de modelos de previsão de desempenho há a necessidade de determinar-se a forma desejada para o mesmo. São elas (NHI, 1998; Pedrosa, 2002):

- **Determinísticos:** São modelos matemáticos que determinam os resultados, exatamente, a partir de condições iniciais. Usam regressões para fornecer um único valor de um parâmetro (variável dependente) a partir de uma ou mais variáveis (variáveis independentes). Esse tipo de modelo pode ser subdividido nos seguintes modelos:
  - 1) modelos de resposta primária, que determinam a relação existente entre tensões e deformações, baseado na mecânica dos pavimentos;
  - 2) modelos de desempenho estrutural, que prevêm o surgimento e a propagação dos defeitos produzidos pela repetição de cargas de tráfego;
  - 3) modelos de desempenho funcional, que prevêm a queda do índice de serventia e do coeficiente de atrito da superfície com o tempo; e
  - 4) modelos de degradação, os quais são derivados de um dos dois anteriores e utilizam uma função de degradação, que é um indicador normalizado de defeitos ou de queda do índice de serventia.
- **Probabilísticos:** Fornecem o alcance de valores de um parâmetro. Este tipo de modelo é baseado em matrizes de transição probabilística que estimam a probabilidade de seções de pavimentos mudarem de uma condição para outra. Este tipo de modelo ainda pode ser subdividido em:
  - 1) curvas de sobrevivência, que são gráficos de probabilidade em função do tempo e representam a porcentagem de pavimentos que permanecem em serviço após um certo número de anos (ou de passagens do eixo-padrão) sem requererem um grande investimento em conservação ou sem necessitarem ser restaurados. Estes gráficos podem ser elaborados a partir do histórico de manutenção de pavimentos da rede;
  - 2) modelos markovianos, que utilizam a chamada “Matriz de Transição”, que expressa a probabilidade de um grupo de pavimentos com idades semelhantes e

sujeitos ao mesmo nível de tráfego passar de um estado de degradação ou índice de serventia para outro, dentro de um período de tempo especificado. Este processo é dito estocástico, pois a mudança no estado de serventia do pavimento não dependerá do tempo (com valores estatísticos invariáveis), não sendo adequado para planejamento da rede (fenômenos naturais não se comportam desta forma); e

- 3) modelos semi-markovianos, que são semelhantes aos modelos markovianos, com a diferença de que se considera que o processo seja estocástico apenas durante incrementos de tempo.

O FHWA classifica os tipos de modelos e variáveis utilizadas pelos níveis de gerência de pavimentos (nacional, estadual ou projeto) de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5: Tipos de modelos de desempenho.

Nível de Gerência	Determinístico				Probabilístico		
	Resposta Primária	Estrutural	Funcional	Degradação	Curvas de Sobrevivência	Modelos de Processo de Transição	
	Deflexão Tensão Deformação	Degradação Condição do Pavimento	PSI Segurança	Carga Equivalente		Markov	Semi-Markov
Nacional	–	–	–	X	X	X	X
Estadual	–	X	X	X	X	X	X
Projeto	X	X	X	X	–	–	–

(fonte traduzida: Lytton, 1987)

Os modelos ainda podem ser subdivididos quanto a sua natureza em (Haas, 1994):

- Puramente Mecanísticos, que são modelos baseados em parâmetros de respostas estruturais, como tensão, deformação e deflexão. Esses modelos não são considerados modelos de desempenho;
- Mecanístico-Empíricos, onde o parâmetro de resposta estrutural é relacionado à deterioração estrutural ou funcional medida, sendo obtida através de equações de regressão. Utilizam o universo de dados experimentais apenas para efeito de sua

calibração e não para o seu desenvolvimento, com sua forma ditada por leis da Mecânica. Esses tipos de modelos são os mais utilizados para previsão de desempenho de pavimentos;

- Empíricos ou de Regressão, nos quais variáveis dependentes de deterioração estrutural ou funcional são relacionadas a uma ou mais variáveis independentes, como suporte do subleito, aplicações de carga por eixo, propriedades e espessuras das camadas do pavimento, fatores ambientais e suas interações. Sintetizam o que foi observado em um determinado conjunto de seções experimentais; e
- Subjetivos, nos quais a experiência de técnicos é formalizada através de processos de transição, como o processo de Markov, que permite a obtenção de modelos de desempenho mesmo sem série histórica de dados. Este tipo de modelo é um caminho alternativo para o desenvolvimento preliminar de modelos de desempenho, onde a base de dados requerida não é extensa e obtida em etapas de projeto.

Existem quatro requisitos para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho:

- Um banco de dados adequado às condições e interesses do sistema;
- A inclusão de variáveis importantes que afetem o desempenho;
- Uma formulação funcional adequada do modelo; e
- O critério estatístico adequado de acordo com a precisão requerida para o modelo.

Com uma consistente base de dados os modelos de previsão de desempenho têm uma boa aplicabilidade à pavimentação, principalmente quando válidos para regiões específicas.

Eles devem ser desenvolvidos para famílias de pavimentos com características comuns, tais como: tipo de superfície, classificação funcional, níveis de tráfego, localização geográfica e clima. A técnica de se separar os pavimentos em famílias é uma boa opção quando a quantidade de dados não é significativa (NHI, 1998; NHI 2002).

Normalmente as espessuras das camadas do pavimento não são levadas em consideração nos modelos de desempenho, pois ela é intimamente relacionada à capacidade estrutural calculada, via de regra representada pelo Número Estrutural Corrigido (*SNC*).

Os modelos mecanístico-empíricos têm boa aplicação para a utilização em projetos de pavimentos, sendo ferramentas fundamentais para avaliação de resultados de análise mecanística, a partir da comparação de dados obtidos em ensaios laboratoriais. A utilização desses modelos para avaliação da malha rodoviária ou para comparação entre alternativas de projeto não consiste em uma opção prática, pois nestas etapas a avaliação do grau de serventia (segurança e conforto) é mais importante (NHI, 1998).

### 4.3.2 Técnicas de Modelagem para Nível de Rede e Nível de Projeto

A aplicação de técnicas de modelagem deve estar sempre acompanhada do propósito ou objetivo que se tem que alcançar. Este objetivo diz respeito ao tipo e abrangência de análise que se pretende fazer.

Em uma análise de rede, a avaliação deve envolver um índice que expresse a condição atual do pavimento em termos de degradação da superfície. Além disso, deve-se levar em consideração a classificação funcional da rodovia (RIMS, 2004; Misra *et al.*, 2003; NHI, 1998; Haas, 1994).

Quando se trata de uma análise em nível de projeto, há a necessidade de seu detalhamento, avaliando-se cada parâmetro de desempenho estudado (NHI, 1998; Haas, 1994). Portanto, os parâmetros que retratam a condição funcional e estrutural do pavimento, bem como das condições de segurança ao rolamento, devem ser analisadas separadamente.

Outro fator importante é acompanhar a evolução do parâmetro de desempenho ou índice de condição em cada Unidade de Amostragem (UA) ao longo do tempo (obtido uma relação do parâmetro com o número acumulado de repetições de carga de tráfego) (RIMS, 2004; Misra *et al.*, 2003; NHI, 1998; Haas, 1994).

Muitas vezes, principalmente em SGPs recentes, as UAs ainda não foram estabelecidas e os monitoramentos da malha são realizados de forma aleatória ou então em fase de projeto. Para estes casos, pode-se utilizar a metodologia da pesquisa conduzida pelo *U.S Army Construction Engineering Research Laboratory*, que resultou no desenvolvimento do que é conhecido como Método das Famílias (Nuñez e Shahin, 1986). Este método foi desenvolvido para uso no sistema de gerência Micro PAVER com o intuito de relacionar o índice *PCI* (*Pavement Condition Index* – ver definição no item 4.2.3.2) com o tempo, aplicável quando se dispõe de pelo menos uma avaliação de cada um dos trechos (Basílio, 2002). Consiste em:

- Coletar e agrupar informações relevantes dos trechos de rodovia, organizando-os em famílias;
- Uma família de pavimentos é definida como um grupo de trechos com características semelhantes, baseadas no tipo, uso, classificação funcional e grau de deterioração. Os fatores utilizados para classificar uma família de pavimentos dependem do usuário do

sistema e das informações disponíveis (Shahin, 1994). Ela também pode envolver a segmentação da região baseada em sub-regiões climáticas;

- Para cada família definida, um arquivo de dados é criado, contendo todas as características dos trechos que a compõem;
- O banco de dados criado é passado por um processo de validação, onde os valores considerados espúrios são excluídos da análise; e
- Trechos com diferentes idades e índices de condição representam a deterioração da condição de um trecho de determinada família ao longo do tempo (Shahin, 1994). Deste modo, coletando o tráfego suportado pelo trecho e a sua condição, construindo-se um gráfico e ajustando uma curva entre os pontos, pode-se ter uma idéia do desempenho geral ao longo do tempo, que se pode esperar para todos os trechos da família.

Basílio (2002) aplicou esta metodologia para o desenvolvimento de modelos envolvendo parâmetros de desempenho de pavimentos no estado de Goiás. Os parâmetros utilizados no estudo foram Deflexão Máxima Média, Quociente de Irregularidade, Afundamento de Trilha de Roda e Área Trincada. Esses parâmetros foram relacionados sempre com o Número Equivalente de Operações do Eixo Padrão, calculado pelo método da AASHTO.

Nas seções seguintes serão apresentados os procedimentos necessários para o estabelecimento de modelos de previsão de desempenho em Nível de Rede e Nível de Projeto.

#### 4.3.2.1 Modelos de Previsão de Desempenho em Nível de Rede

A necessidade de se estabelecer parâmetros que pudessem descrever o estado atual de uma rede, levou ao estabelecimento de vários índices que descrevem as condições de pavimentos em termos de degradação superficial e irregularidade longitudinal.

Um dos mais antigos índices para análise de desempenho de uma malha rodoviária é o Índice de Serventia Atual (*PSI – Present Serviceability Index*). Este índice (Modelo 22), desenvolvido pela AASHTO, leva em consideração áreas de trincas e remendos, as inclinações do perfil longitudinal e afundamento de trilha de roda (Pinto e Preussler, 2002).

$$PSI = 5,03 - 1,91 \cdot \log(1 + SV) - 0,01\sqrt{C + P} - 1,38 \cdot RD^2 \quad (22)$$

Onde:

$SV$  é a variância das inclinações do perfil longitudinal medidas com perfilômetro da AASHTO;

$C$  é a proporção de 1 para 1.000 de áreas com trincas de classe 2 e 3;

$P$  é a proporção de 1 para 1.000 de áreas remendadas; e

$RD$  é a profundidade média dos afundamentos nas trilhas de roda (polegadas).

Atualmente, o índice mais utilizado em agências estaduais dos Estados Unidos é o Índice de Condição do Pavimento (*PCI – Pavement Condition Index*), que define a condição do pavimento de acordo com a sua degradação superficial.

Em estudo realizado pela *Road Information Management Systems – RIMS Group* na Nova Zelândia (RIMS, 2004), determinou-se que o cálculo do *PCI* é influenciado por parâmetros de desempenho de pavimentos, tais como *IRI*, *ATR* e índices relacionados a defeitos no pavimento, sendo o método oficialmente utilizado naquele país.

No Japão, o SGP existente utiliza o Índice de Controle de Manutenção (*MCI – Maintenance Control Index*) para a tomada de decisão em nível de rede (Kikukawa *et al.*, 1987). Este índice relaciona o percentual de área trincada, os afundamentos em trilha de roda e a irregularidade longitudinal.

No Reino Unido, por sua vez, utiliza-se o chamado Índice de Defeitos, obtido através de Levantamento Visual, para realizar um diagnóstico de rede (DfT, 2003).

Uma alternativa para o Brasil é a utilização do Índice de Condição do Pavimento levantado por método visual (*PCR*), índice utilizado no estado americano de Ohio, para o estabelecimento de análise em Nível de Rede. O *PCR* já é utilizado no estado do Ceará para monitoramento das condições da malha viária. Ele é facilmente obtido através de LVC (Levantamento Visual Contínuo), retratando ótimas informações sobre as condições atuais de superfície dos pavimentos, além de ter baixo custo executivo.

Utilizando dados de *PCI*, subdivididos em Unidades de Amostragem ou pelo Método das Famílias, é possível determinar a sua variação ao longo do tempo. Essa variação deve ser estabelecida por um modelo de regressão que apresente o melhor ajuste possível, sendo reajustada após cada campanha de monitoramento de rede.

#### 4.3.2.2 Modelos de Previsão de Desempenho em Nível de Projeto

Os modelos de previsão em Nível de Projeto têm o objetivo de avaliar as respostas em termos de desempenho estrutural e funcional dos pavimentos. Isto se deve à necessidade das análises dos efeitos das estratégias adotadas na programação de intervenções.

A opção pela elaboração de modelos determinísticos empíricos foi bem justificada por Nascimento (2005), estando claros os critérios de utilização de dados coletados em Unidades de Amostragem ou pelo Método das Famílias. Foram analisados diversos modelos de desempenho de pavimentos, sobretudo os do HDM-4, Queiroz (1981), Paterson (1987), Marcon (1996) e Yshiba (2003), para dados obtidos no banco de dados do LTPP em regiões que se aproximam às condições climáticas do Brasil. As seções de análise foram classificadas por tipo de revestimento e faixas de valores de idade da capa, tráfego anual e número estrutural corrigido. Constatou-se que:

- Os modelos determinísticos empíricos foram os que obtiveram os maiores coeficientes de determinação;
- Os modelos apresentados por Paterson (1987) e Yshiba (2003) para irregularidade longitudinal forneceram os resultados mais próximos entre os reais e estimados. O mesmo ocorreu para os modelos de Paterson (1987) e Marcon (1996) para deformações permanentes. Esses modelos consideram como variáveis principais a idade, tráfego e número estrutural corrigido, exceto o de Marcon (1996) que utiliza apenas a idade;
- Os modelos de previsão de desempenho de irregularidade e deformações permanentes do HDM-4 não apresentaram bons resultados. Uma explicação possível é que o programa exige a calibração dos modelos em função das características regionais, o que torna sua utilização limitada a um banco de dados extenso;

- Os modelos que apresentam melhor desempenho de análise são os que relacionam idade, tráfego e número estrutural corrigido; e
- A progressão do *IRI* para o valor limite no modelo do HDM-4 é muito mais rápida que para os modelos dos outros autores.

A utilização de modelos mecanísticos empíricos depende do estabelecimento de modelos de regressão que tenham o melhor ajuste possível com variáveis independentes que retratem a idade, as solicitações de tráfego e a componente estrutura do pavimento.

A idade está relacionada ao histórico de manutenções, mais precisamente, à idade do último revestimento executado no pavimento.

No que se refere às solicitações de tráfego, o número acumulado de solicitações do eixo padrão, determinado com os fatores de equivalência da AASHTO, é o mais indicado para a utilização nos modelos de previsão de desempenho, pois o mesmo relaciona-se às condições de serventia do pavimento, conforme metodologia que o desenvolveu.

Por último, a estrutura do pavimento pode ser retratada pelo seu Número Estrutural Corrigido (*SNC*). Esta variável é de grande relevância no estabelecimento de modelos de previsão de desempenho, mas sua determinação não é uma etapa simples. Inclui a necessidade de grande conhecimento da estrutura analisada, inclusive a consideração de sua configuração, o que na maioria das vezes não acontece pelas incertezas sobre o histórico de manutenção. Ainda é influenciada pelo tipo de clima da região e a sua sazonalidade.

A seguir são apresentados os métodos de obtenção do número estrutural corrigido (*SNC*) e do número acumulado de carga de tráfego ( $N_{acum}$ ).

#### *a) Número Estrutural Corrigido – SNC*

A estrutura dos pavimentos pode ser interpretada através do chamado Número Estrutural (*SN*), utilizado para determinar a capacidade estrutural do pavimento como um todo, considerando componentes que espelham a resistência das camadas (coeficientes estruturais) e suas espessuras.

A AASHTO fez a primeira proposição para a obtenção do  $SN$  através do método desenvolvido em pesquisa da NCHRP, e publicado pela primeira vez por Liddle (1962). Nesta, a contribuição de cada camada para a resistência do pavimento era obtida através de coeficientes estruturais das camadas ( $a_i$ ), sendo calculado fazendo-se uso dos seus módulos de resiliência. Este foi adotado no método de projeto do Guia da AASHTO (1993).

As correlações entre os coeficientes das camadas ( $a_i$  em  $\text{cm}^{-1}$ ) e os módulos de resiliência dos materiais ( $E_i$  em MPa) foram assim determinadas (Ullidtz, 1998):

- Mistura Asfáltica:  $a_1 = (0,40 \times \log(E_1/3000) + 0,44)/2,54$ , com  $0,079 \leq a_1 \leq 0,173$ ;
- Base Granular:  $a_2 = (0,25 \times \log(E_2/160) + 0,11)/2,54$ , com  $0,024 \leq a_2 \leq 0,079$ ;
- Sub-base Granular:  $a_3 = (0,23 \times \log(E_2/160) + 0,15)/2,54$ , com  $0,024 \leq a_2 \leq 0,079$ .

A sazonalidade do clima e a capacidade de drenagem devem ser consideradas no cálculo do  $SN$ . Isso está relacionado ao comportamento estrutural dos pavimentos ser diferente quando comparando épocas secas e úmidas do ano. A AASHTO (1993) apresenta um método para modificação do número estrutural através da consideração dos efeitos de drenagem das camadas dos pavimentos usando a seguinte expressão:

$$SN = a_1 \times H_1 + a_2 \times H_2 \times m_2 + a_3 \times H_3 \times m_3 \dots \quad (23)$$

Onde:

$a_i$  é o coeficiente estrutural da camada  $i$  ( $\text{cm}^{-1}$ );

$H_i$  é a espessura da camada  $i$  (cm); e

$m_i$  é o coeficiente de drenagem da base e sub-base não-tratada  $i$ .

Uma outra limitação do uso do número estrutural é a não consideração pelos métodos de cálculo das particularidades de configurações do pavimento. A posição de camadas mais rígidas e mais deformáveis não é considerada relevante para o  $SN$ , porém influencia decisivamente na capacidade estrutural do pavimento.

O Número Estrutural foi avaliado na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (PICR) e estudos do HDM como a medida mais significativa de resistência da estrutura do pavimento nas relações de previsão de desempenho (DNER-PRO 159/85; HDM-4-a, 2000). Nesta pesquisa o número estrutural deveria ser corrigido através da consideração da deformabilidade do subleito do pavimento, dando origem à expressão Número Estrutural Corrigido (*SNC*).

No Brasil, o *SNC* é obtido considerando dados de módulo de resiliência da camada de revestimento asfáltico e de Índice de Suporte Califórnia (*ISC*) de solos obtidos em corpos-de-prova imersos em água, ou seja, em situações críticas de drenagem. Este artifício tem o objetivo de padronizar os valores de *SNC* para todas as condições climáticas do ano. Portanto, os coeficientes de drenagem das camadas granulares podem ser desconsiderados nos métodos de obtenção do *SNC* determinados por Queiroz (1981) e Paterson (1987).

A grande limitação no método desenvolvido por Queiroz (1981) e Paterson (1987) é a consideração do *ISC*, pois este índice não avalia as deformações recuperáveis dos solos. Isto acaba, às vezes, por subestimar a capacidade estrutural dos solos. No entanto, o *ISC* tem uma relação forte com a resistência de solos, sendo bastante importante na análise de ruptura de camadas granulares na pavimentação.

O *SNC*, de acordo com a proposição na pesquisa PIRC, é obtido através da seguinte expressão (Queiroz, 1981; DNER-PRO 159/85; Paterson, 1987):

$$SNC = \sum a_i \times H_i + 3,51 \log ISC_{SL} - 0,85(\log ISC_{SL})^2 - 1,43 \quad (24)$$

Onde:

$a_i$  é o coeficiente estrutural da camada  $i$  ( $\text{cm}^{-1}$ ):

- Revestimento:  $a_1 = 0,181[1 - \exp(-0,000856 \times MR)]$ ,  $MR$  é o módulo de resiliência do revestimento em MPa;
- Para bases granulares  $a_2 = (11,47 ISC_2 - 0,07783 ISC_2^2 + 1,772 \times 10^{-4} ISC_2^3) \times 10^{-4}$ , sendo  $ISC_2$  o índice de suporte da base granular;

- Para sub-bases granulares  $a_3 = 0,00394 + 0,02559 \log ISC_3$ , sendo  $ISC_3$  o índice de suporte da sub-base granular.

$H_i$  é a espessura da camada  $i$  (cm); e

$ISC$

Quando é possível analisar a deformada (ou bacia defletométrica), melhores respostas sobre a capacidade estrutural do pavimento podem ser obtidas. Para tanto, o Raio de Curvatura ( $R_C$ ), parâmetro indicativo do arqueamento da deformada em sua posição mais crítica, pode ser considerado. Um baixo  $R_C$  é indicativo de um severo arqueamento da deformada e, conseqüentemente, uma condição estrutural crítica (Pinto, 2002).

O manual IPR-720/2006 determina que, considerando a deflexão no centro da carga como  $D_0$  e a deflexão na posição ( $x$ ) do arqueamento crítico da deformada como  $D_x$ , o raio de curvatura pode ser obtido pela seguinte equação:

$$R_C = \frac{10 \cdot x^2}{2 \cdot (D_0 - D_x)} \quad (27)$$

Em pesquisa realizada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Johnston, 2001) foram desenvolvidas correlações entre  $SNC$  e Raio de Curvatura ( $R_C$  – em metros) calculado pelo método do DNER, mas com bacias de deflexões obtidas com FWD. Essas correlações são as seguintes:

- Pavimentos com revestimento em CBUQ e base e sub-base granulares ( $R^2 = 0,73$ ):

$$SNC = \frac{1}{\left(0,03588 + \frac{51,909}{R_C}\right)} \quad (28)$$

- Pavimentos com revestimento em TSD e base e sub-base granulares ( $R^2 = 0,86$ ):

$$SNC = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(0,02768 + \frac{83401}{R_C^3}\right)}} \quad (29)$$

Com o Raio de Curvatura obtido pelo método seguinte (DNER-ME 024/94):

$$R_c = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})} \quad (30)$$

Onde:

$D_0$  é a Deflexão Recuperável no ponto de aplicação da carga ( $10^{-2}$  mm); e

$D_{25}$  é a Deflexão Recuperável a 25 cm do ponto de aplicação da carga ( $10^{-2}$  mm).

*b) Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão –  $N_{acum}$*

A definição de uma estrutura de pavimento para sua posterior construção está intimamente relacionada com as magnitudes das cargas que a solicitarão.

Nos pavimentos rodoviários, o esquema geral de tratamento das solicitações do tráfego é a conversão das cargas de eixos em um número equivalente de repetições de um eixo padrão.

A carga que cada tipo de veículo transferirá ao pavimento é determinada através da seguinte rotina de cálculo (IPR-667/22, 1981):

- Tabulação das categorias de eixos encontrados em amostragem de veículos durante as pesagens, por intervalo de carga verificado;
- Tabulação do número de eixos na amostra que se enquadram em cada uma das categorias indicadas;
- Cálculo da porcentagem de eixos tabulados em relação ao número total de veículos da amostra ( $p_i$ );
- Tabulação, com base na metodologia de projeto adotada, dos fatores de equivalência de cargas de cada categoria de eixo indicada ( $FEC_{i,p}$ ); e
- Cômputo dos produtos ( $p_i \cdot FEC_{i,p}$ ) para cada categoria de eixo indicada.

Os fatores de equivalência de carga podem ser obtidos pelo método da AASHTO ou USACE.

O cálculo do fator de equivalência pela AASHTO leva em consideração a “serventia” do pavimento, a partir de características da superfície dependentes do desempenho estrutural do pavimento (adequado para projetos de restauração).

O fator de equivalência da AASHTO foi idealizado a partir de estudos de solicitações tangenciais por um eixo padronizado de 8.165kgf para que conduzisse a um determinado índice de serventia pré-definido. Essas solicitações tangenciais causam esforços ao revestimento do pavimento.

Porém, os fatores de equivalência não dependem apenas da carga aplicada, mas da estrutura do pavimento. Além disso, a utilização dos *FECs* da AASHTO é bastante influenciada pelas condições climáticas, do tipo de solo existente no subleito e das pressões de inflação (que solicitam as seções do pavimento), sendo necessário tomar os devidos cuidados com relação às condições dos EUA, para onde foram formulados, comparando às do Brasil (Pereira, 1992).

Mesmo com essas considerações, esse foi o único método que foi gerado com o respaldo de verificações experimentais de campo.

O cálculo do fator de equivalência do USACE leva em consideração o “afundamento plástico” do pavimento, sendo aplicável à resolução de problemas de dimensionamento onde a maior preocupação é a proteção da infra-estrutura do pavimento (subleito) quanto às deformações permanentes (adequado para projetos de pavimentos novos).

Os fatores de equivalência do USACE, como estão associados à ruptura plástica da porção inferior da estrutura, não são adequados para a resolução de problemas ligados à estimativa da vida das camadas betuminosas do pavimento no que respeita à fadiga. Além disto, a espessura implícita para o cálculo dos fatores de equivalência do USACE é de 34,3cm, sendo inferior a espessura das rodovias brasileiras de tráfego pesado (Pereira, 1992).

A Tabela 7 apresenta as equações utilizadas para cálculo do *FEC*, para diferentes tipos de eixos, pelos os dois métodos observados anteriormente.

A somatória dos valores ( $p_i \cdot FEC_{i,p}$ ) fornece o valor do chamado fator de veículo (*FV*) ou fator de caminhão ou equivalência de operações, relativo ao perfil de tráfego verificado em pesagens por 100 veículos da amostra. O valor absoluto do fator de veículo será, portanto (IPR-667/22, 1981):

$$FV = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \cdot FEC_{i,p})}{100} \quad (31)$$

Tabela 7: Equações para cálculo de fatores de equivalência.

Tipo de Eixo	Método (P é a carga do eixo em tf)	
	DNER/AASHTO	DNER/USACE
Simple de roda simples	$\left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$	$2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
Simple de roda dupla	$\left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$	$1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Duplo Tandem roda dupla	$\left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$	$1,528 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo roda dupla	$\left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$	$1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

(fonte: Pereira, 1992)

O número de solicitações equivalentes do eixo padrão será então determinado levando-se em consideração as seguintes condições (IPR-667/22, 1981):

- Volume Diário Médio (*VDM*) calculado com base nas contagens volumétricas e classificatórias é representativo de uma seção de via;
- *VDM* é representativo da frota total de veículos. Para fins de projeto de pavimentação, podendo ser considerado apenas os veículos comerciais (ônibus, caminhões médios, caminhões pesados, reboques e semi-reboques), sendo desprezados os veículos de passeio, utilitários e caminhões leves. Isto é realizado através da inclusão de um fator de frota comercial ( $F_f$ ) que representa a porcentagem de veículos comerciais existentes em relação ao universo da frota, o que é obtido através da contagem classificada;

- Volume acumulado de veículos deverá ser considerado em apenas um sentido (caso a via apresente dois sentidos) através da inclusão de um fator de sentido ( $F_s$ ). Assim, ter-se-á  $F_s= 1,0$  para vias com um sentido apenas e  $F_s= 0,5$  para vias com dois sentidos de tráfego; e
- Caso a via possua mais de uma faixa de tráfego por sentido, o volume acumulado de veículos deverá ainda ser estimado apenas para a faixa supostamente mais carregada, através da inclusão de um fator de distribuição de frota por faixa ( $F_d$ ), que representa a porcentagem dos veículos comerciais que utilizam tal faixa. Valores de  $F_d$  entre 0,8 e 1,0 são comumente adotados em projetos rodoviários. Para o caso de acostamentos, o dimensionamento é comumente realizado empregando-se  $F_d$  entre 0,01 e 0,05.

A expressão geral para o cálculo do número de repetições equivalentes do eixo padrão ( $N_{acum}$ ), a uma taxa de crescimento ( $t$ ), no período de projeto ( $P$ ) será, portanto, para crescimento linear (IPR-667/22, 1981):

$$N_{acum} = 365 \cdot \left\{ VDM \cdot \frac{[(1 + P \cdot t)^2 - 1]}{2 \cdot t} \right\} \cdot FV \cdot F_f \cdot F_s \cdot F_d \quad (32)$$

O item entre chaves na Equação 32 pode ser expresso através de equações de projeção utilizando dados de séries históricas.

Certamente a determinação de  $FECs$  adequados às condições brasileiras possibilitariam obtenção de  $N_{acum}$  mais aproximado à realidade existente, sobretudo com a caracterização do perfil de carga de eixo realmente utilizado em veículos comerciais.

#### 4.3.3 ALGUNS MODELOS DE PREVISÃO DESENVOLVIDOS NO BRASIL

Algumas pesquisas de grande repercussão internacional, tais como Queiroz (1981) e Paterson (1987), foram realizadas no Brasil com o objetivo de desenvolver modelos de desempenho de pavimentos asfálticos. Esses modelos, com algumas adaptações, foram incorporados ao

sistema HDM. Outros trabalhos de grande relevância no Brasil foram os realizados por Marcon (1996) e Yshiba (2003), para os Estados de Santa Catarina e Paraná, respectivamente.

Recentemente Benevides (2006) realizou um estudo para elaboração de modelos de previsão de desempenho de pavimentos da malha rodoviária da região Metropolitana de Fortaleza (Ceará).

Uma outra pesquisa, desenvolvida por Lerch (2003), avaliou a redução da irregularidade em pavimentos do Rio Grande do Sul após aplicação de camadas de reforço.

Em seguida serão apresentados alguns dos modelos empíricos para previsão de desempenho desenvolvidos nessas pesquisas.

#### 4.3.3.1 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Queiroz

Queiroz (1981) desenvolveu modelos empíricos e mecanístico-empíricos utilizando dados de irregularidade, entre outros parâmetros, obtidos nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Distrito Federal. Foram três tipos de modelos empíricos desenvolvidos para o Quociente de Irregularidade ( $QI$ ), com o primeiro incluindo o Número Estrutural Corrigido (Modelo 33), o segundo incluindo a deflexão com Viga Benkelman (Modelo 34) e o terceiro incluindo as duas variáveis anteriores (Modelo 35).

$$\log QI = 1,478 - 0,138ER + 0,000795A + 0,0224 \left( \frac{\log N_{acum}}{SNC} \right)^2 \quad (33)$$

$$R^2 = 0,26$$

Onde:

$A$  é a idade do pavimento desde a construção ou reabilitação (anos);

$SNC$  é o número estrutural corrigido;

$ER$  é a variável que indica se o pavimento é restaurado ou não ( $ER = 0$ , original;

$ER = 1$ , restaurado); e

$N_{acum}$  representa o número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO.

$$QI = 21,8 - 7,52ER + 5,16TR + 0,515A + 7,22 \times 10^{-5} (B \times \log N_{acum})^2 \quad (34)$$

$$R^2 = 0,48$$

Onde:

$TR$  é a variável indicadora do tipo de revestimento ( $TR = 0$ , mistura asfáltica;  $TR = 1$ , tratamento superficial); e

$B$  é a deflexão com viga Benkelman ( $10^{-2}$  mm).

$$QI = 12,63 - 5,16ER + 3,31TR + 0,393A + 8,66 \left( \frac{\log N_{acum}}{SNC} \right) + 7,17 \times 10^{-5} (B \times \log N_{acum})^2 \quad (35)$$

$$R^2 = 0,52$$

O Modelo 33 apresentou desempenho insatisfatório levando-se em consideração o valor do  $R^2$ . Isto pode ser devido ao método de cálculo de  $SNC$  utilizado. Nas regiões monitoradas para a elaboração de modelos de previsão de desempenho, o subleito predominante é constituído de solos lateríticos. A utilização dos valores medidos de  $ISC$ , que para solos lateríticos são particularmente baixos, acabou subestimando a capacidade estrutural dos pavimentos considerada nos modelos e diminuindo sua correlação com o  $QI$ .

#### 4.3.3.2 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Paterson

Paterson (1987) utilizou métodos estatísticos de regressão para o desenvolvimento de modelos dos principais defeitos em pavimentos flexíveis, utilizando dados obtidos no Brasil. Esses modelos fazem parte das versões do HDM-III e HDM-IV (com adaptações), onde alguns

deles foram elaborados para simular a progressão das deformações permanentes em trilhas de roda e irregularidade longitudinal.

A estimativa de profundidade média das trilhas de roda foi obtida através do seguinte modelo:

$$RDM = 1,0 \times AGE^{0,166} \times SNC^{-0,502} \times COMP^{-2,30} \times NE_4^{ERM} \quad (36)$$

$$R^2 = 0,42$$

Com

$$ERM = 0,0902 + 0,0384 \times DEF - 0,009 \times RH + 0,00158 \times MMP \times CRX \quad (37)$$

Onde:

*RDM* é a profundidade média das trilhas de roda (mm);

*AGE* é a idade do pavimento desde a construção, restauração ou reconstrução (anos);

*SNC* é o número estrutural corrigido;

*COMP* é o índice de compactação, definido como a compactação relativa média ponderada pela espessura da camada, sendo obtido em Paterson (1987);

*NE<sub>4</sub>* representa o número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO (milhões por faixa);

*DEF* é a deflexão máxima média medida com viga Benkelman ( $10^{-2}$  mm);

*RH* é a variável que indica se o pavimento é restaurado ou não (*RH* = 0, original; *RH* = 1, restaurado);

*MMP* é a precipitação média mensal (m/mês); e

*CRX* é a área de trincamento indexado, sendo obtido em Paterson (1987).

A irregularidade longitudinal foi estimada por Paterson (1987) da seguinte forma:

$$IRI = \left[ IRI_0 + 725(1 + SNC)^{-4,99} \times NE4 \right] \times e^{0,0153 AGE} \quad (38)$$

$$R^2 = 0,75$$

Onde:

$IRI_0$  é a irregularidade longitudinal inicial (m/km);

$SNC$  é o número estrutural corrigido;

$NE_4$  representa o número equivalente acumulado de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado com fator de carga da AASHTO (milhões por faixa); e

$AGE_3$  é a idade do pavimento desde a construção, restauração ou reconstrução (anos).

#### 4.3.3.3 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Marcon

Marcon (1996) elaborou modelos através de curvas de tendência de desempenho de pavimentos para dados levantados em 2.500 km da malha rodoviária do Estado de Santa Catarina. Alguns dos modelos foram elaborados para parâmetros como quociente de irregularidade, deflexões máximas médias, índice de gravidade global e profundidade média das trilhas de roda. Esses modelos relacionaram o parâmetro de desempenho do pavimento com a idade do revestimento ou com o número equivalente de operações do eixo padrão.

Para a irregularidade foram elaborados os seguintes modelos:

$$QI = 18,348 + 1,1635 \times IDADE \quad (39)$$

$$R^2 = 0,29$$

$$QI = 25,783 + 4,0 \times 10^{-6} \times NA - 5,0 \times 10^{-14} \times NA^2 \quad (40)$$

$$R^2 = 0,32$$

Os dados de deflexão máxima média foram ajustados aos seguintes modelos:

$$DEFM = 24,288 + 3,5458 \times IDADE \quad (41)$$

$$R^2 = 0,37$$

$$DEFM = 44,928 + 1,0 \times 10^{-5} \times NA \quad (42)$$

$$R^2 = 0,50$$

Para o índice de gravidade global foram elaborados os seguintes modelos:

$$IGG = -20,91 + 5,01 \times IDADE$$

$$TRI = 1,8228 + 0,2325 \times IDADE \quad (45)$$

$$R^2 = 0,28$$

$$TRI = 3,3051 + 5,0 \times 10^{-7} \times NA \quad (46)$$

$$R^2 = 0,26$$

Onde:

*QI* é o quociente de irregularidade (cont./km);

*DEFM* é a deflexão máxima média ( $10^{-2}$  mm);

*IGG* é o índice de gravidade global;

*TRI* é a profundidade média de trilhas de roda (mm)

*NA* é o número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf, calculado com o fator de carga da AASHTO; e

*IDADE* é a idade do pavimento desde a construção, restauração ou reconstrução (anos).

Independentemente dos coeficientes de determinação dos modelos, que na grande maioria dos modelos foram baixos, a desconsideração da variação da capacidade estrutural de pavimentos nos modelos é incoerente, pois assume que pavimentos estruturalmente mais resistentes teriam mesmo desempenho que pavimentos com resistência deficitária. Além disso, os modelos 39, 41, 43 e 45 analisam a variação do desempenho de pavimentos em função apenas da idade de seu revestimento. Neste caso, as solicitações de tráfego, determinantes na degradação de pavimentos, são negligenciadas.

#### 4.3.3.4 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Yshiba

Yshiba (2003) utilizou variáveis independentes como idade do revestimento, número anual de solicitações de tráfego e número estrutural na elaboração de modelos estatísticos de irregularidade longitudinal e deflexão com Viga Benkelman, utilizando dados obtidos na malha rodoviária do Estado do Paraná. Ele elaborou modelos de regressão através de análise de variância dividindo os pavimentos em originais e restaurados.

Para pavimentos com revestimento original, o Modelo 47 foi obtido para a determinação de irregularidade e o Modelo 48 para a determinação de deflexão.

$$\begin{aligned} IRI = 2,8 + 0,38P(I) + 0,31P(N) - 0,16P(S) \\ + 0,09 \times P(I) \times P(N) - 0,08 \times P(I) \times P(S) \end{aligned} \quad (47)$$

$$R^2 = 0,75$$

$$DEF = 56,0 + 8,7P(I) + 4,25P(N) - 4,75P(S) + 1,81 \times P(I) \times P(S) \quad (48)$$

$$R^2 = 0,62$$

Onde:

*IRI* é a irregularidade longitudinal do pavimento (m/km);

*DEF* é a deflexão determinada com Viga Benkelman ( $10^{-2}$  mm);

$P(I) = \frac{I - 13}{8}$ , sendo *I* a idade em anos do revestimento;

$P(N) = \frac{N - 5 \times 10^4}{10^5}$ , sendo *N* o número de solicitações de tráfego; e

$P(S) = \frac{S - 5,5}{2}$ , sendo *S* o número estrutural corrigido.

Para pavimentos restaurados, o Modelo 49 foi obtido para a determinação de irregularidade e o Modelo 50 para a determinação de deflexão.

$$IRI = 2,37 + 0,12P(I) + 0,22P(N) - 0,14P(S) \quad (49)$$

$$R^2 = 0,81$$

$$DEF = 47,2 + 2,2P(I) + 3,81P(N) - 2,7P(S) + 1,44 \times P(N) \times P(S) \quad (50)$$

$$R^2 = 0,83$$

A boa performance dos modelos, considerando os valores de  $R^2$ , está relacionada em parte a consideração das cargas de tráfego, idade do revestimento e capacidade estrutural do pavimento, mas principalmente ao artifício matemático utilizado na elaboração dos modelos, considerando níveis para as variáveis codificadas nos quais o desempenho dos pavimentos é semelhante.

#### 4.3.3.5 Modelos de Previsão de Desempenho Desenvolvidos por Benevides

Benevides (2006) elaborou modelos estatísticos de *IRI* utilizando dados de levantamento com perfilômetro a laser (levantados pelo autor), com os defeitos identificados em Levantamento Visual Contínuo (levantados pelo autor), valores do *PCI* (dados fornecidos pelo DERT-CE) e com a deflexão ou número estrutural corrigido calculado por correlação com deflexão (dados de deflexão fornecidos pelo DERT-CE).

Estes modelos, específicos para a malha rodoviária da região Metropolitana de Fortaleza (Ceará), a qual não tem variação climática (clima úmido – classificação da UNESCO), são apresentados nas equações seguintes.

$$IRI = -0,141 \cdot PCI - 0,0211 \cdot DEF - 0,00641 \cdot TF + 15,636 \quad (51)$$

$$R^2 = 0,86$$

$$IRI = -8,303 \cdot PCI - 0,812 \cdot NEC - 0,0050 \cdot TF + 101,844 \quad (52)$$

$$R^2 = 0,93$$

Onde:

*IRI* é a irregularidade longitudinal do pavimento (m/km);

*PCI* é o Índice de Condição do Pavimento (%);

*DEF* é a deflexão determinada com FWD ( $10^{-2}$  mm);

*NEC* é o número estrutural corrigido obtido por correlação com a deflexão determinada com FWD;

*TF* é a porcentagem padrão do defeito Trinca por Fadiga (%);

#### 4.3.3.6 Modelo de Previsão de Redução da Irregularidade Desenvolvido por Lerch

Lerch (2003) avaliou a redução da irregularidade longitudinal de pavimentos do Rio Grande do Sul após aplicação de camada de reforço. O modelo desenvolvido nesta pesquisa utilizou a espessura ( $3 \text{ cm} \leq ESP \leq 8 \text{ cm}$ ) da camada de reforço e a irregularidade existente no pavimento ( $2 \text{ m/km} \leq IRI_{antes} \leq 7 \text{ m/km}$ ) para realizar a previsão. Obteve o seguinte modelo:

$$\Delta IRI = 0,31 \cdot ESP + 0,87 \cdot IRI_{antes} - 3,17 \quad (53)$$

$$R^2 = 0,97$$

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo evidenciou-se a importância do estabelecimento de modelos de previsão de desempenho como ferramenta básica de um SGP. Foram abordadas também as vantagens do estabelecimento de modelos empíricos, relacionando o parâmetro de desempenho com o clima, o número estrutural do pavimento e o número de solicitações do tráfego.

Nesta tese são apresentados modelos de previsão para parâmetros de desempenho (*IRI*, *IGG*, *PCR* e *Do*), utilizando dados disponibilizados por Órgãos Rodoviários do Nordeste, os quais são utilizados também nas simulações de Priorização em Nível de Rede e Projeto desta tese.

Foi apresentada a importância da utilização do *PCR* (*Pavement Condition Rating*), índice obtido por Levantamento Visual e que traduz a degradação superficial de pavimentos, nas análises de necessidade atual de manutenção e como critério técnico na Priorização em Nível de Rede nos “casos estudados”.

O método de Análise Multicriterial (Método PROMETHEE), que será utilizado nesta tese para Priorização em Nível de Rede e em Nível de Projeto, será detalhado no próximo capítulo.

## **5 ANÁLISE MULTICRITERIAL: UMA FERRAMENTA PARA A TOMADA DE DECISÃO**

A tomada de decisão na Gerência de Pavimentos sempre privilegiou a análise dos custos relacionados às alternativas elencadas, bem como os seus benefícios técnicos. Essas análises objetivam atender um único critério analisado, a maximização da relação benefício/custo.

Esse método de análise geralmente atende muito bem às necessidades de Órgãos Rodoviários, Empresas Concessionárias e Organismos Financiadores na construção ou manutenção de rodovias, pois conduz a um nível de serventia desejado a um menor custo possível no período de análise.

Porém, a construção ou manutenção de rodovias, tem o poder de afetar o cotidiano social, a economia e o meio ambiente das regiões envolvidas. Obras de infra-estrutura são capazes de desenvolver sócio-economicamente regiões menos favorecidas e diminuir diferenças no desenvolvimento de cada micro-região estadual.

A tomada de decisão baseada em custo de construção e de benefícios técnicos não é capaz de avaliar as necessidades da população envolvida, da economia e, muito menos, dos impactos ambientais que cada alternativa de intervenção pode proporcionar. Não é raro, ainda, que interesses políticos façam parte da tomada de decisão.

É fácil notar que problemas de decisão nas áreas econômica, industrial, financeira e política envolvem múltiplos critérios e interventores. Exemplificando, ninguém compra um carro baseado somente no preço (critério financeiro). O conforto, a qualidade, o desempenho e o status social invariavelmente são levados em consideração. Além disso, ninguém reage da mesma forma, e cada qual escolhe de acordo com critérios pessoais.

Nesta tese analisa-se a aplicação da Análise Multicriterial em etapas de Priorização do SGP. É uma oportunidade de avaliar como “pontos de vista” diferentes na sociedade são beneficiados em alguns aspectos e prejudicados em outros. De um lado está o Órgão Rodoviário, que pretende atender aos requisitos técnicos estabelecidos a um menor custo possível, e de outro a População, que necessita da oportunidade de desenvolvimento sustentável, em termos econômico e humano, proporcionado, em parte, por uma obra de infra-estrutura rodoviária.

O problema de seleção ou classificação de alternativas submetido a múltiplos critérios não é uma tarefa simples. A busca da solução frequentemente ocorre em ambiente em que os critérios são conflitantes e o ganho em um critério pode causar a perda em outro. Por esse motivo os métodos de avaliação multicriterial não apresentam uma solução ótima, mas sim a solução que melhor satisfaz ao conjunto de critérios analisados e com menores perdas individuais possíveis.

Os problemas que envolvem múltiplos critérios são distinguidos em dois grupos diferentes. No primeiro grupo (Contínuo) o conjunto de alternativas considerado por parte do tomador de decisão é infinito, dado o caráter matemático contínuo de soluções factíveis. No segundo grupo (Discreto) o conjunto de alternativas considerado por parte do tomador de decisão é finito e normalmente não muito elevado (Ródenas & Barberis, 2002).

Os problemas de engenharia, sobretudo os de escolha de alternativas em pavimentação, se encaixam bem no Grupo Discreto de problemas multicriteriais, devido à necessidade das intervenções apontadas atenderem um desempenho mínimo especificado.

A solução de problemas multicriteriais dentro do Grupo Discreto pode ser realizada através de ferramentas conhecidas como Métodos de Preferências (utiliza funções de preferência em que, a cada par de alternativas, é associado um índice de preferência e um índice de indiferença) que classifica uma alternativa como melhor do que outra. A concepção desses métodos foi realizada por um grupo de pesquisadores franceses em meados dos anos de 1960, sendo bem aceita em todo o mundo como método de Análise Multicriterial Discreto (Ródenas & Barberis, 2002).

O primeiro pesquisador que utilizou o método de decisão multicriterial por preferências foi o francês Bernard Roy, através do método ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*).

Dentre os métodos mais recentes de análise multicriterial por preferências destaca-se o método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*). Este método foi desenvolvido por Jean Pierre Brans e Bertrand Mareschal (Brans *et al.*, 1984) da *Université Libre de Brussels* (Bélgica), sob orientação de Bernard Roy.

Esses dois métodos, especialmente o PROMETHEE, têm hoje uma grande repercussão mundial e ficaram conhecidos como métodos da Escola Européia de Decisão Multicriterial,

ou mesmo Escola Franco-Belga. É, provavelmente, o método de Análise Multicriterial mais utilizado em todo o mundo, ajudando a resolver problemas nas mais diversas áreas, como:

- Recrutamento em RH: vendedores, peritos, gerentes superiores etc.
- Classificação preferencial de projetos: financiamento, empréstimos, priorização etc.
- Planejamento estratégico: aquisição, fusão, expansão, obras de infra-estrutura etc.
- Monitoramento de desempenho: garantia da qualidade, padrões técnicos etc.
- Tomada de decisão do grupo: pontos de vista diferentes das partes interessadas etc.

Na seção seguinte é apresentado o Método PROMETHEE de Análise Multicriterial por Preferências, o qual será uma ferramenta de análise de priorização nesta pesquisa.

## 5.1 MÉTODO PROMETHEE

O PROMETHEE é um método de preferência que fornece ao tomador de decisão uma estrutura preferencial entre alternativas discretas (Porto *et al.*, 1997).

Sendo  $A$  o conjunto de alternativas, para cada ação (alternativa)  $a_i \in A$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $f_j(a_i)$  é uma avaliação dessa ação segundo o critério  $j$ ,  $j = 1, \dots, k$ . Essas avaliações podem ser representadas na matriz  $M$  (Lopes, 2005):

$$M = \begin{bmatrix} f_1(a_1) & f_2(a_1) & \dots & f_k(a_1) \\ f_1(a_2) & f_2(a_2) & \dots & f_k(a_2) \\ \vdots & \vdots & & \\ f_1(a_n) & f_2(a_n) & \dots & f_k(a_n) \end{bmatrix}$$

A partir de  $M$ , uma avaliação aos pares é efetuada, seguindo o algoritmo (Brans *et al.*, 1984):

- a) Especificar para cada critério  $f_j$  uma função de preferência generalizada ( $P_j$ ) tal que:

$$P_j : A \times A \rightarrow [0,1]$$

Na comparação entre as alternativas quaisquer  $a_r$  e  $a_s$ , pertencentes ao conjunto  $A$ , tem-se:

$P_j(a_r, a_s) = P(x) = P[f(a_r) - f(a_s)]$ , que representa a intensidade com que a alternativa (ou ação)  $a_r$  é preferível a  $a_s$  segundo o critério  $j$ , tal que:

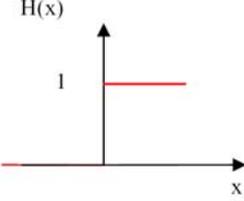
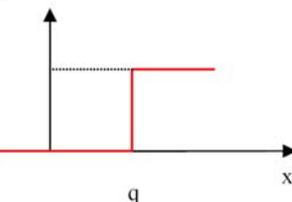
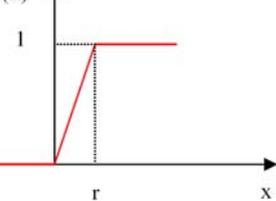
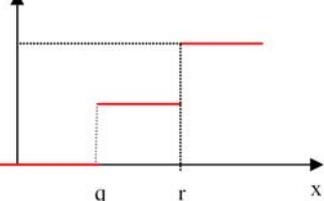
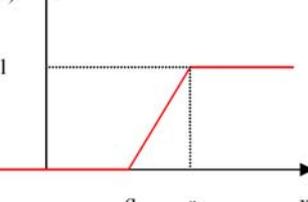
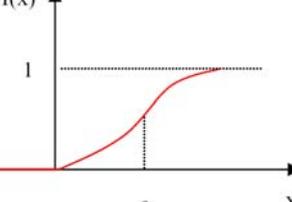
- i) Se  $P(x) = 0$  não há preferência de  $a_r$  em relação a  $a_s$ ;
- ii) Se  $P(x) \cong 0$  há fraca preferência de  $a_r$  em relação a  $a_s$ ;
- iii) Se  $P(x) \cong 1$  há forte preferência de  $a_r$  em relação a  $a_s$ ; e
- iv) Se  $P(x) = 1$  há total preferência de  $a_r$  em relação a  $a_s$ .

Se o critério precisa ser maximizado, usa-se  $x = f(a_r) - f(a_s)$  para definir a função de preferência. No caso de minimização do critério a função de preferência será dada por  $x = f(a_s) - f(a_r)$ .

Brans *et al.* (1986) determinaram seis tipos de função de preferência. As funções e representações gráficas –  $H(x)$  – são apresentadas na Tabela 8. O avaliador ainda pode modelar outras funções de preferência de interesse. O significado de cada função é:

- Na função de preferência *Linear* há indiferença entre as alternativas  $a_r$  e  $a_s$  se e somente se  $f(a_r) = f(a_s)$ . Quando as avaliações são diferentes o avaliador tem preferência total pela alternativa que possui melhor avaliação;
- Na função de preferência *U-Shape* as alternativas são indiferentes sob o ponto de vista do avaliador se não excedem o limite de indiferença  $q$ . Caso contrário, há preferência total pela alternativa  $a_r$ ;
- Na função de preferência *V-Shape*,  $r$  é o limite de preferência total, e se a diferença entre as alternativas for menor do que esse limite, então a preferência pela alternativa  $a_r$  aumenta linearmente com a diferença  $x$ . Quando a diferença é maior do que  $r$  há preferência total pela alternativa  $a_r$ ;

Tabela 8: Funções Preferência do Método PROMETHEE.

Tipo	$P(x)$	$H(x)$	Parâmetros fixados
<i>Linear</i>	$P(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$		-
<i>U-Shape</i>	$P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ 1 & x > q \end{cases}$		$q$
<i>V-Shape</i>	$P(x) = \begin{cases} x/r & x \leq r \\ 1 & x > r \end{cases}$		$r$
<i>Level</i>	$P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ 1/2 & q < x \leq r \\ 1 & x > r \end{cases}$		$q, r$
<i>V-Shape I</i>	$P(x) = \begin{cases} 0 & x \leq q \\ \frac{x-q}{r-q} & q < x \leq r \\ 1 & x > r \end{cases}$		$q, r$
<i>Gaussian</i>	$P(x) = 1 - e^{-x^2/2s^2}$		$s$

(fonte adaptada: Porto, 1997)

- Na função de preferência *Level* o avaliador deve definir o limite de indiferença  $q$  e o limite de preferência  $r$  tal que: se  $x$  é menor do que  $q$  então há indiferença entre as alternativas; se  $x$  está entre  $q$  e  $r$  há fraca preferência (1/2) por  $a_r$ ; e se  $x$  é maior do que  $r$  então a alternativa  $a_r$  é preferível à alternativa  $a_s$ ;
  - Na função de preferência *V-Shape I* o avaliador considera que sua preferência aumenta linearmente da indiferença para a total preferência entre os limites  $q$  e  $r$ ; e
  - Na função de preferência *Gaussian* é necessário apenas que o avaliador defina o parâmetro  $s$  que indica o valor a partir do qual há mudança na concavidade na curva de preferência.
- b) Definir os pesos  $\alpha_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) que são as medidas de importância de cada critério. Essa avaliação é feita pelos tomadores de decisão ou especialistas. Pode ocorrer que os pesos sejam todos iguais, se os critérios tiverem a mesma importância.
- c) Calcular para todos os pares de alternativas o índice de preferência ponderada global –  $\pi(a_r, a_s)$ , que indica o percentual de preferência da alternativa  $a_r$  em relação à alternativa  $a_s$ , levando em consideração os pesos atribuídos a cada critério.

$$\pi(a_r, a_s) = \sum_{j=1}^n \alpha_j P_j(a_r, a_s) \quad (54)$$

Onde:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1; \text{ e}$$

$$0 \leq \pi(a_r, a_s) \leq 1 \quad \forall \quad a_r, a_s \in A.$$

- d) Calcular o Fluxo de Importância Positivo que representa a média de preferência de qualquer alternativa  $a_r$  sobre todas as alternativas do conjunto  $A$ :

$$\phi^+(a_r) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{x \in A}^n \pi(a_r, x) \quad (55)$$

Onde:

$$\phi^+ : A \rightarrow [0,1]; \text{ e}$$

Quanto maior  $\phi^+(a_r)$ , melhor a alternativa.

- e) Calcular o Fluxo de Importância Negativo que representa a média de preferência de todas as alternativas sobre a alternativa  $a_r$ :

$$\phi^-(a_r) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{x \in A}^n \pi(x, a_r) \quad (56)$$

Onde:

$$\phi^- : A \rightarrow [0,1]; \text{ e}$$

Quanto menor  $\phi^-(a_r)$ , melhor a alternativa.

- f) Como saída do algoritmo, tem-se a classificação parcial (PROMETHEE I) e a classificação completa (PROMETHEE II).

O PROMETHEE I consiste na pré-ordenação parcial de alternativas. Apresenta dois fluxos de hierarquização, sendo um positivo, que mostra como uma determinada alternativa se sobressai sobre as outras, e outro negativo, mostrando como uma determinada alternativa é sobrepujada por outras. A classificação parcial das alternativas é obtida como se segue:

- $a_r$  é preferível à  $a_s$  ( $a_r P^I a_s$ ) se:
 
$$\left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a_r) > \phi^+(a_s) \text{ e } \phi^-(a_r) < \phi^-(a_s) \\ \text{ou} \\ \phi^+(a_r) = \phi^+(a_s) \text{ e } \phi^-(a_r) < \phi^-(a_s); \\ \text{ou} \\ \phi^+(a_r) > \phi^+(a_s) \text{ e } \phi^-(a_r) = \phi^-(a_s) \end{array} \right.$$
- $a_r$  é indiferente à  $a_s$  ( $a_r I^I a_s$ ) se:  $\phi^+(a_r) = \phi^+(a_s)$  e  $\phi^-(a_r) = \phi^-(a_s)$ ; e
- $a_r$  é incomparável à  $a_s$  ( $a_r J^I a_s$ ) caso contrário.

Um exemplo ilustrativo da classificação de alternativas com o PROMETHEE I pode ser observado na Figura 30. Nela, as alternativas 3 e 4 são incomparáveis, mas são preferíveis à alternativa 5.

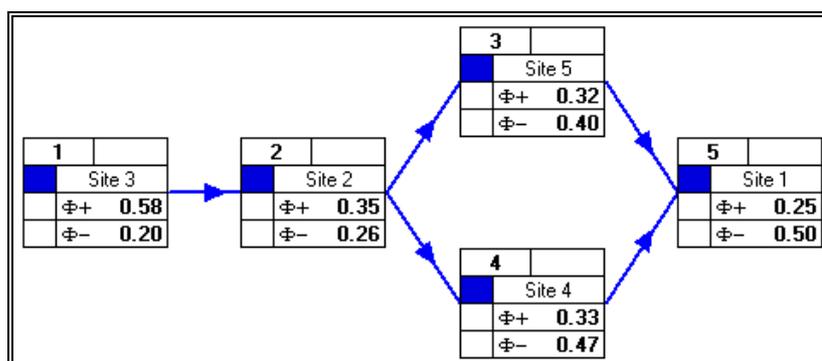


Figura 30: Exemplo ilustrativo da hierarquização resultante da aplicação do PROMETHEE I (Fonte: Decision LAB, 1998).

O PROMETHEE II consiste em hierarquizar as ações seguindo uma ordem decrescente. Generaliza o conceito da qualificação, não há “incompatibilidades”. A sua ordenação é completa e única. Esta classificação completa das alternativas é realizada através do Fluxo de Importância Líquido de preferência ( $\phi$ ) calculado pela diferença entre os fluxos de importância positivo e negativo, como se segue:

$$\phi(a_r) = \phi^+(a_r) - \phi^-(a_r) \quad (57)$$

Onde:

$$\phi: A \rightarrow R.$$

- $a_r$  é preferível à  $a_s$  ( $a_r P^H a_s$ ) se:  $\phi(a_r) > \phi(a_s)$ ; e
- $a_r$  é indiferente à  $a_s$  ( $a_r I^H a_s$ ) se:  $\phi(a_r) = \phi(a_s)$ .

Utilizando-se o exemplo ilustrativo da Figura 30 (classificação de alternativas com o PROMETHEE I) e aplicando-se a classificação completa do PROMETHEE II, observa-se na Figura 31 a classificação resultante. Nela, a incompatibilidade existente entre as alternativas 3 e 4 foi resolvida.

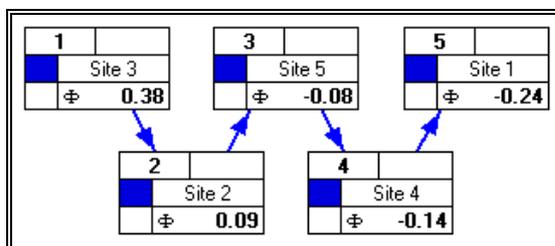


Figura 31: Exemplo ilustrativo da hierarquização resultante da aplicação do PROMETHEE II (Fonte: Decision LAB, 1998).

“O Método PROMETHEE é uma tentativa de estabelecer, de forma natural, a estrutura de preferência do tomador de decisão. Tem-se mostrado um método fácil de ser aplicado, envolvendo ao mesmo tempo uma análise mais completa e explícita” (Porto, 1997).

## 5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ficou evidenciado que a Análise Multicriterial é uma ferramenta fundamental no apoio a tomada de decisão quando estão envolvidos “pontos de vista” diferentes.

Nesta tese é aplicado o Método de Análise Multicriterial PROMETHEE para as simulações de Priorização em Nível de Rede e em Nível de Projeto. Vários critérios são utilizados nestas análises, fazendo-se a representação de necessidades dos Órgãos Rodoviários do Estado do Ceará e da Paraíba e, de outro lado, as necessidades da população em termos de desenvolvimento sustentável proporcionado por melhoramentos em rodovias nas mais diversas regiões desses Estados.

Toda a base teórica apresentada é imprescindível para a interpretação de resultados, mas a execução deste método é simplificada pela utilização de software que adota a metodologia do PROMETHEE.

No capítulo seguinte está descrita a metodologia proposta para a execução das atividades desta tese, incluindo a definição dos critérios analisados pelo Método PROMETHEE.

## 6 METODOLOGIA PARA ESTRUTURAÇÃO DO SGP

Neste Capítulo é apresentada a estruturação técnica básica dos componentes do Sistema de Gerência de Pavimentos Proposto para infra-estrutura de malha rodoviária (pavimentos asfálticos). Considera-se esta estruturação suficiente para avaliar a sua aplicabilidade em gerência de pavimentos, em especial nos Estados do Ceará e Paraíba, os quais são os “casos estudados”.

A estruturação do SGP Proposto inclui as seguintes etapas:

- Elaboração de Banco de Dados de Monitoramentos para o acompanhamento do desempenho das malhas rodoviárias;
- Proposta de Modelos Estatísticos de Previsão de Desempenho de Pavimentos para as malhas rodoviárias estudadas (apenas pavimentos asfálticos);
- Descrição da metodologia para aplicação de ferramentas da Geoestatística na determinação de Unidades de Amostragem, que serão utilizadas no levantamento de dados de desempenho nas malhas rodoviárias analisadas;
- Elaboração de Árvores de Decisão para avaliação de necessidades de intervenção em rodovias pavimentadas, apropriadas para análises em nível de rede e de projeto;
- Descrição da metodologia de Análise Multicriterial pelo Método PROMETHEE II no estabelecimento de prioridades de intervenção em pavimentos das malhas rodoviárias dos “casos estudados”. Consideram-se critérios financeiros, técnicos, sócio-econômicos e ambientais na avaliação de estratégias de intervenção que apresentaram desempenho satisfatório, de acordo com os Modelos de Previsão de Desempenho desenvolvidos.

Na seqüência são descritos as regiões de análise e os dados que foram disponibilizados para a realização deste estudo. Posteriormente, são abordadas as ferramentas utilizadas para se alcançar os objetivos propostos nesta tese.

## 6.1 CASOS ESTUDADOS

Nesta tese, a metodologia proposta é aplicada e avaliada através de dados de desempenho de pavimentos disponibilizados pelo Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará (DERT-CE) e pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Paraíba (DER-PB).

### 6.1.1 Caso de Estudo – Ceará

O estado do Ceará localiza-se na parte norte da Região Nordeste do Brasil. A sua área é de 148.825,60 km<sup>2</sup> e tem como capital a cidade de Fortaleza.

A Tabela 9 apresenta um resumo da malha rodoviária do estado do Ceará, segundo banco de dados do DERT-CE. O objeto de estudo é a malha rodoviária estadual (o mapa rodoviário do estado do Ceará, com divisão por distritos administrativos, é mostrado na Figura 32).

Tabela 9: Dados da malha rodoviária do Estado do Ceará.

Jurisdição da Rodovia	Extensão Pavimentada (km)		Extensão Não-pavimentada (km)		Malha Planejada (km)	Total Geral (km)
	Pista Simples	Pista Dupla	Leito Natural	Implantada		
Federal	2.068,40	20,10	168,30	76,50	401,00	2.734,30
Estadual Transitória (*)	603,90	6,80	–	91,50	–	702,20
Estadual	4.143,00	86,20	3.330,60	2.291,60	1.001,80	10.853,20
Acesso Estadual	142,90	5,00	10,00	7,30	–	165,20
Municipal	373,10	–	34.796,00	3.383,50	336,00	38.888,60
<b>Total (km)</b>	<b>7.331,30</b>	<b>118,10</b>	<b>38.304,90</b>	<b>5.850,40</b>	<b>1.738,80</b>	<b>53.343,50</b>
(*) Rodovia Estadual Transitória → São rodovias Estaduais existentes cujos traçados coincidam com as diretrizes de rodovias federais planejadas.						

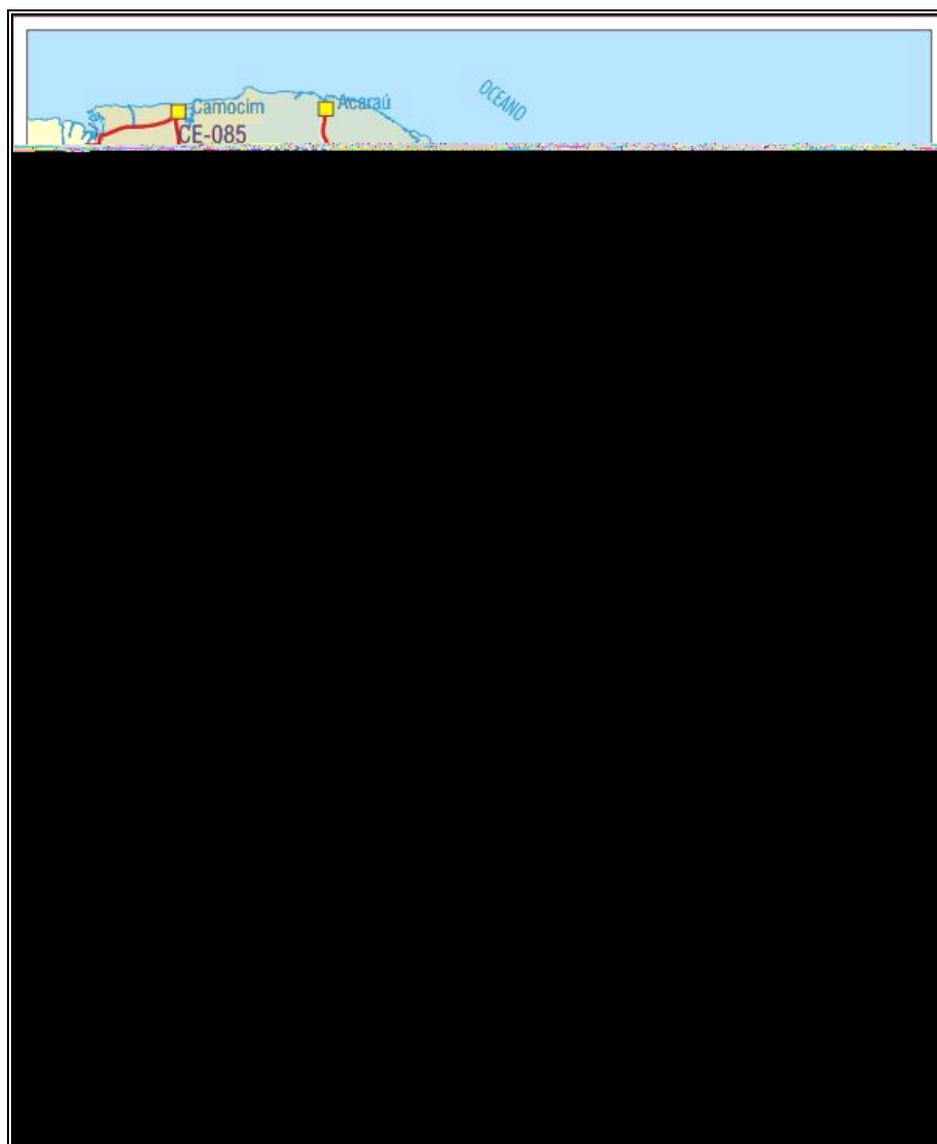


Figura 32: Mapa rodoviário do Estado do Ceará (Fonte: [www.dert.ce.gov.br](http://www.dert.ce.gov.br), 2006).

Os seguintes dados das rodovias estaduais do Ceará, constituintes do Sistema Integrado de Gestão de Manutenção (SIGMA), foram disponibilizados pelo DERT-CE:

- Altitude e pluviometria por município;
- Contagem classificada de tráfego nos anos de 1994, 1997, 2000 e 2004;
- Cadastro com datas de intervenção, espessura e tipo de materiais utilizados;
- Levantamentos deflectométricos com FWD nos anos de 1998, 2002 e 2005;

- Levantamentos de irregularidade do pavimento com integrador tipo resposta (IPR/USP) em 2001 e 2005; e
- Levantamento Visual para determinação do *PCR* em 2005.

No que diz respeito ao clima, cerca de 80% do território é de clima seco a semi-árido, com variações de temperaturas nas diferentes regiões do estado, sendo a média anual no litoral de 27°C, na serras de 22°C e no sertão de 33°C durante o dia e 23°C à noite.

As chuvas, por sua vez, são reduzidas e escassas diferindo da mesma forma, de região para região. Em alguns pontos o índice pluviométrico registrado fica abaixo dos 1.000mm e, em alguns, 600mm (bacia do rio Caxitoré). Em outros, como no vale do Cariri, Serra de Uruburetama e Baturité e chapada do Ibiapaba, as chuvas ocorrem com mais frequência, em índices superiores a 1.000 mm. Nestas serras e chapadas as chuvas são mais regulares e com período mais longo, tornando as temperaturas nestas áreas mais amenas.

### 6.1.2 Caso de Estudo – Paraíba

O estado da Paraíba localiza-se na parte leste da Região Nordeste do Brasil. A sua área é de 56.439,84 km<sup>2</sup> e tem como capital a cidade de João Pessoa.

A Tabela 10 apresenta um resumo da malha rodoviária do estado da Paraíba, segundo banco de dados do DER-PB. O objeto de estudo é a malha rodoviária estadual (o mapa rodoviário do estado da Paraíba e suas residências rodoviárias podem ser observados na Figura 33).

Os dados que foram disponibilizados pelo DER-PB, constantes no SIGA – Sistema de Informações Geográficas Aplicado ao Planejamento Rodoviário para as rodovias estaduais da Paraíba, são os seguintes:

- Contagem classificatória de tráfego entre os anos de 1981 e 2002;
- Ano da última intervenção, tipos e espessuras das camadas e *ISC* de camadas granulares e subleito; e
- Levantamentos deflectométricos com Viga Benkelman, Raio de Curvatura e *IGG* entre os anos de 1990 e 1994.

Tabela 10: Dados da malha rodoviária do Estado da Paraíba.

Jurisdição da Rodovia	Extensão Pavimentada (km)		Extensão Não-pavimentada (km)		Rede Planejada (km)	Total Geral (km)
	Pista Simples	Pista Dupla	Leito Natural	Implantada		
Federal	1.063,70	105,50	–	–	46,00	1.215,20
Estadual	2.177,00	–	1.287,00	1.379,50	198,20	5.041,70
Municipal	50,00	–	28.797,00	70,00	–	28.917,00
<b>Total (km)</b>	<b>3.290,70</b>	<b>105,50</b>	<b>30.084,00</b>	<b>1.449,50</b>	<b>244,20</b>	<b>35.173,90</b>

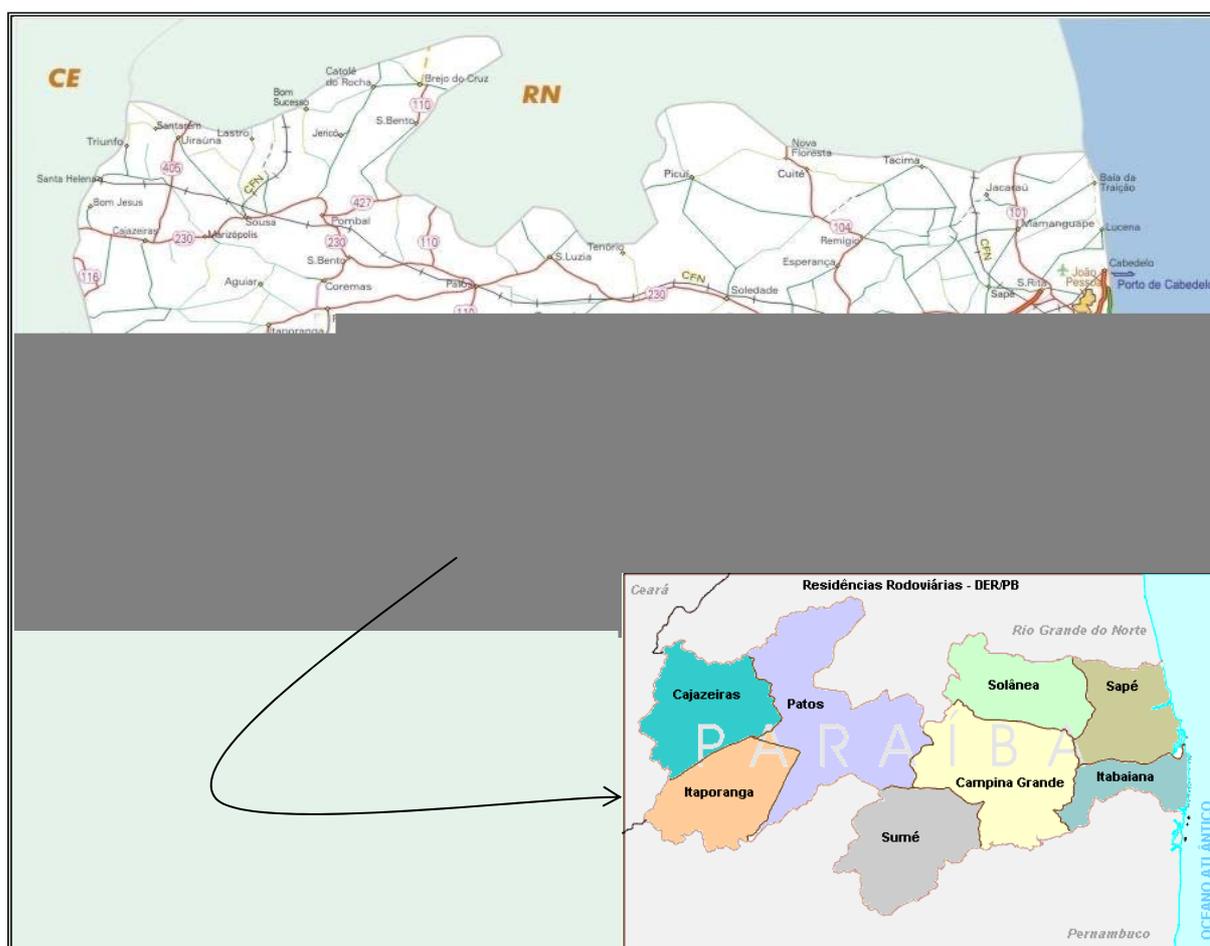


Figura 33: Mapa rodoviário do Estado da Paraíba (Fonte: www.der.pb.gov.br, 2006).

O clima neste estado varia de acordo com o relevo. Na Baixada Litorânea e na encosta leste da Borborema predomina o clima tropical úmido, com chuvas de outono-inverno e estação seca durante o verão. As chuvas no litoral atingem índices de 1.700mm anuais e temperaturas médias na casa dos 24°C. Seguindo para o interior as chuvas diminuem (800mm – encosta leste da Borborema), voltando a aumentar o índice pluviométrico no topo do planalto para 1.400mm.

No Planalto da Borborema, exceto a encosta leste, está o clima semi-árido quente; o índice pluviométrico nesta região pode ser considerado baixo chegando a 500-600mm anuais.

Uma terceira tipologia climática ocorre no oeste do Estado, no planalto do rio Piranhas. Clima tropical caracterizado por apresentar chuvas de verão e inverno seco. As temperaturas médias anuais são elevadas, marcando 26°C. O índice pluviométrico é de 600 a 800 mm/ano. A oeste da Borborema as chuvas são irregulares, o que resulta em secas prolongadas.

### 6.1.3 Classificação Pedológica da Região

O entendimento da pedologia dos estados da Paraíba e do Ceará depende da classificação e distribuição espacial de solos sobre os mesmos. A bibliografia consultada não apresentava estudo específico para classificação de solos para uso na Engenharia Rodoviária nestes estados. De acordo com esta limitação, fez-se uso do Mapeamento de Solos Brasileiros feito pelo IBGE e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), desenvolvido pela EMBRAPA (1999), para o conhecimento das características pedológicas da região.

O SiBCS divide os solos em classes de acordo com as características finais de suas formações. Essas classes são conhecidas pelos seguintes nomes: Latossolo, Argilossolo, Organossolo, Neossolo, Vertissolo, Espodossolo, Planossolo, Gleissolo, Nitossolo, Chernossolo, Cambissolo, Plintossolo e Luvisolo.

O SiBCS ainda utiliza a configuração da estrutura dos solos apresentada na Figura 34. O horizonte “O” é o de acumulação orgânica, o “A” é o de atividade biótica, no “E” é onde ocorrem processos eluviais (lixiviação de argilominerais, óxidos etc.), no “B” é onde ocorrem processos iluviais (acumulação de argilominerais, óxidos etc.), o “C” é o Saprolito e o “R” é a Rocha-sã.

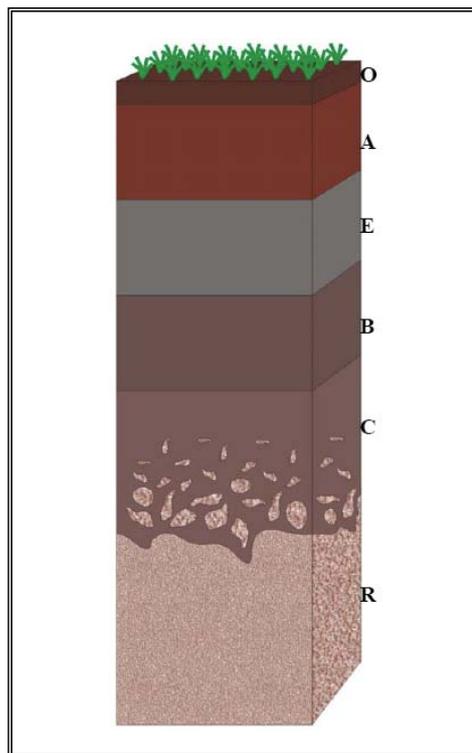


Figura 34: Horizontes constitutivos de solos considerados no SiBCS (Nowatzki, 2005).

As características pedológicas dos estados da Paraíba e do Ceará estão representadas na Figura 35, de acordo com o SiBCS. Os solos, suas constituições e comportamentos como material para pavimentação são assim apresentados em ordem decrescente de frequência na região (os perfis típicos desses solos estão na Figura 36) (EMBRAPA, 1999):

- Luvissole Crômico (TC): são solos formados pela dispersão da argila no horizonte A e posterior acúmulo no horizonte B textural (migração de argila – iluviação). Eles têm drenagem deficiente, são pouco profundos, erodíveis e apresentam argila com alta plasticidade. Constituem materiais não aconselháveis à pavimentação por serem bastante susceptíveis a deformações plásticas;
- Neossolo Litólico (RL): solos rasos essencialmente saprolíticos (conservando fragmentos bem característicos da rocha mãe), com presença de matéria orgânica, não apresentando horizonte B. Merecem atenção especial para uso na pavimentação, pois são solos que, além da presença de matéria orgânica, não têm alteração química da rocha mãe (em geral granítica), portanto com presença de mica (material de pouca resistência mecânica na presença de água);

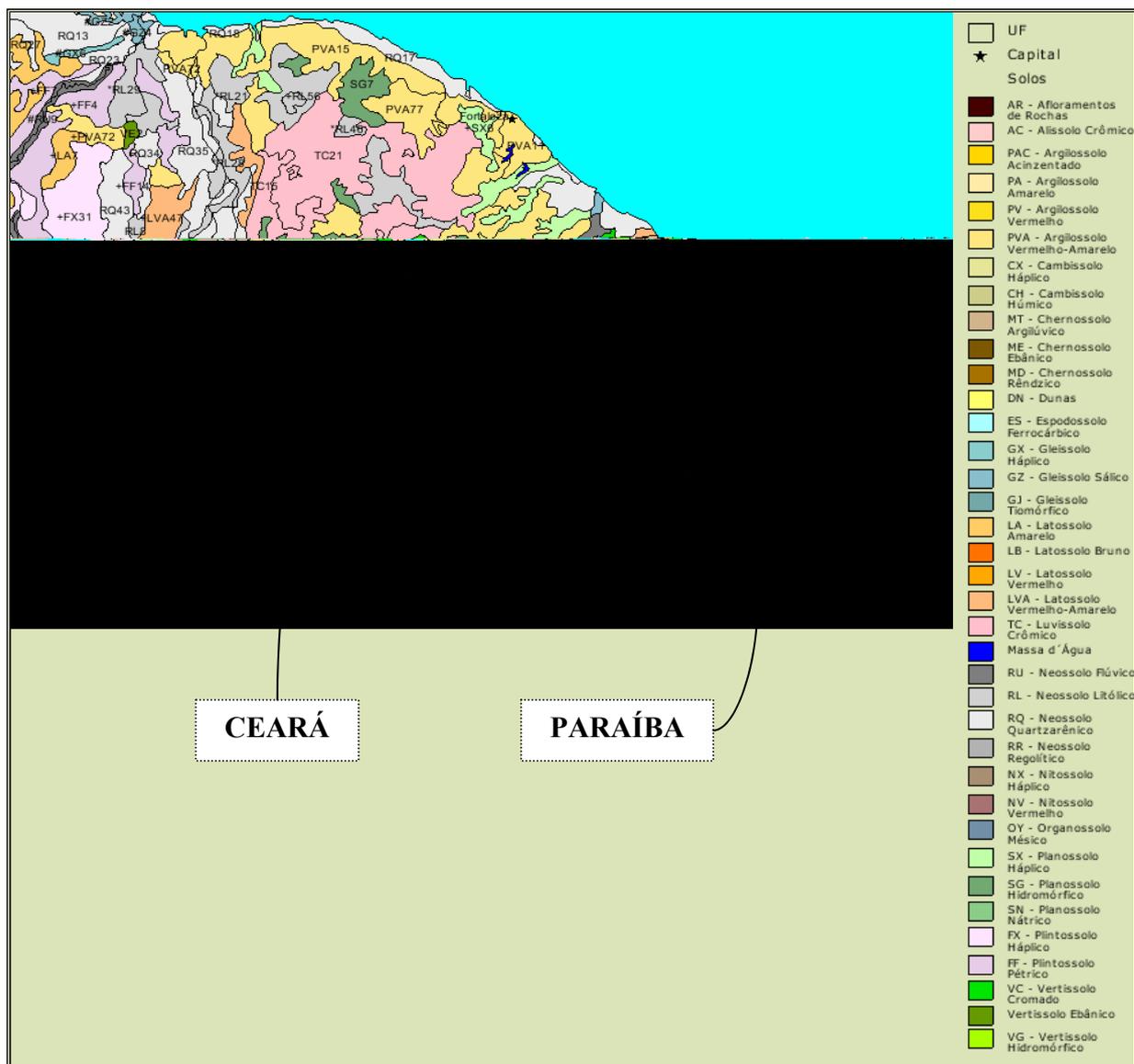


Figura 35: Mapa de Solos dos Estados da Paraíba e do Ceará (fonte: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)).

- Argilossolo Vermelho-Amarelo (PVA): são solos constituídos por material mineral, com horizonte B textural de argila predominantemente caulínica, localizado imediatamente abaixo do horizonte A. Constituem materiais bastante intemperizados quimicamente (solos lateríticos), com drenagem moderada, com camadas profundas, pouco erodíveis e apresentam argila com baixa plasticidade. Constituem materiais aconselháveis à pavimentação por serem pouco deformáveis;

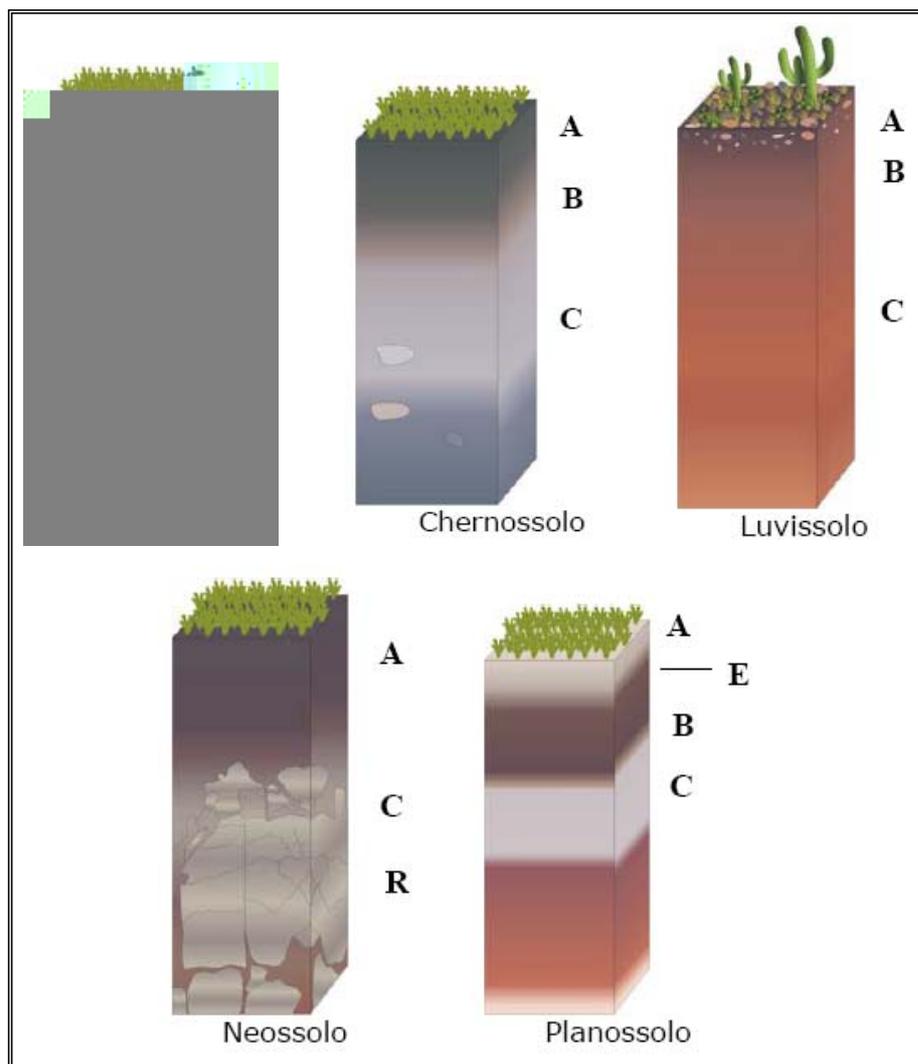


Figura 36: Alguns perfis típicos de solos da Paraíba e do Ceará (Nowatzki, 2005).

- Planossolo Hidromórfico – Ceará (SG): compreendem solos minerais mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, apresentando horizonte B plânico. São reconhecidos por apresentarem além de minerais de quartzo, teores altos de argila dispersa, detendo o lençol freático e promovendo, conseqüentemente, permeabilidade muito baixa (solo adensável). É um solo desaconselhável a pavimentação, devendo ser removido;
- Neossolo Quartzarênico – Ceará (RQ): solos saprolíticos com propriedades mecânicas melhores que os Neossolos Litólicos, devido à fração fina ser constituída por areia. Muitas vezes, quando a fração areia é transportada, formam dunas;

- Planossolo Háplico (SX): são solos formados com base em sedimentos coluviais e aluviais. Possuem características semelhantes aos Planossolos Hidromórficos, mas com problemas de drenagem um pouco menos acentuados. É um solo desaconselhável a pavimentação, devendo ser removido;
- Planossolo Nátrico – Paraíba (SN): semelhante ao Planossolo Háplico, mas com fração de argila adicionada ao horizonte B por iluviação do horizonte A, deixando-o impermeável;
- Chernossolo Argilúvico – Ceará (MT): solos saprolíticos formados por um horizonte A chernozêmico (material ativo e com matéria orgânica), com 15% ou mais de CaCO<sub>3</sub>, provavelmente em contato direto com a rocha calcária (sem horizonte B). É um solo bastante raso e pode ser insignificante para pavimentação; e
- Argissolo Acinzentado – Paraíba (PAC): solo bastante semelhante ao Argissolo Vermelho-Amarelo, diferindo apenas pela sua coloração.

Ainda observa-se muito afloramento de rocha (especialmente granítica) principalmente nas regiões de clima seco e semi-árido. Esses afloramentos, quando sãs, fornecem ótimos materiais para camadas estruturais de pavimentos (sub-base e base).

## 6.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

As ferramentas de análise que compõem o SGP Proposto são apresentadas nesta seção. Elas foram avaliadas através da aplicação nos casos de estudo.

A seqüência de atividades que deve ser respeitada para o estabelecimento do SGP Proposto pode ser observada no Fluxograma da Figura 37. Aproveitando este fluxograma, são descritas as particularidades de aplicação de cada ferramenta de trabalho para se obter um SGP bem estruturado. Além disso, essas descrições deram suporte ao cumprimento dos objetivos desta tese.

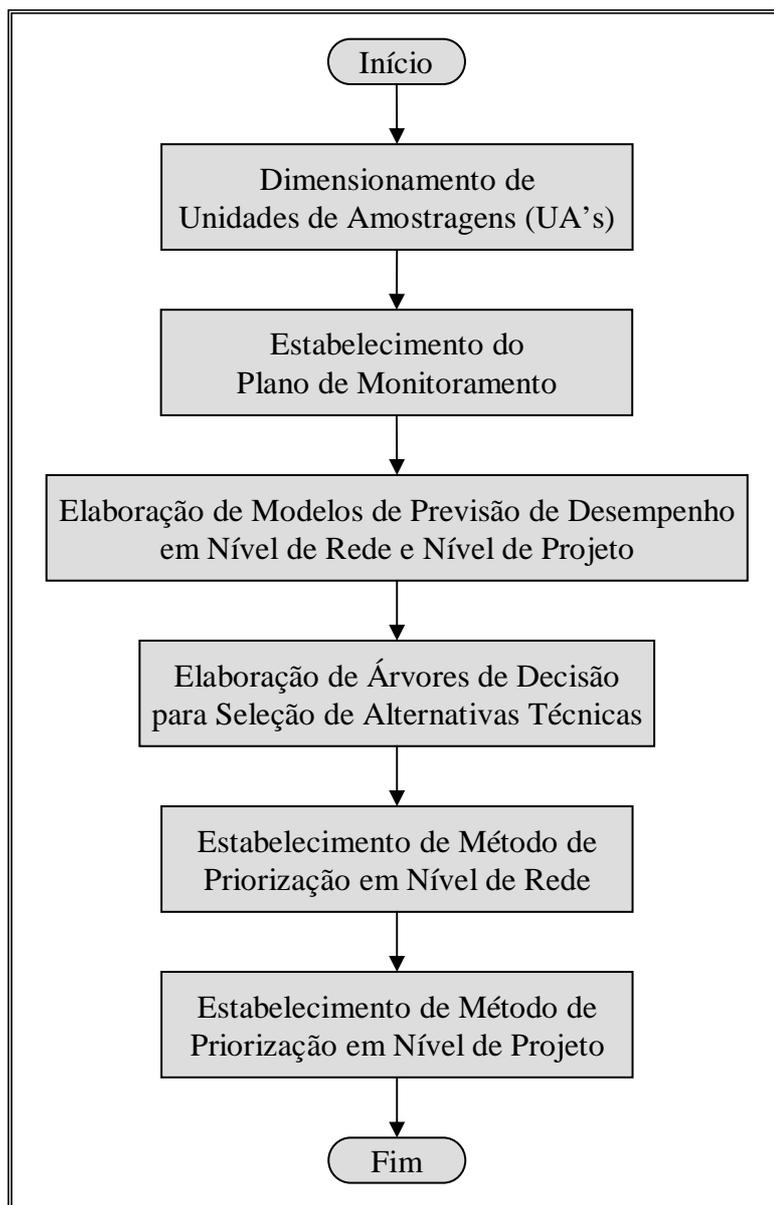


Figura 37: Macro-Fluxo de Atividades para Estruturação do SGP Proposto.

### 6.2.1 Dimensionamento de Unidades de Amostragem (UAs)

Para o dimensionamento de UAs nos “casos estados” foram levados em consideração os conceitos apresentados no Capítulo 3 desta Tese.

Nos dois estados analisados já existem segmentações definidas para trechos rodoviários. Estes trechos rodoviários são definidos para cada rodovia de acordo com a utilização de pontos

notáveis. Estes pontos notáveis são encontros com cidades, povoados, entroncamentos com outras rodovias, ou travessia de rios. Cada trecho rodoviário segue também uma codificação diferenciada por estado, de acordo com as seguintes definições:

- Ceará: XXX ECE YYYY ou XXX ACE YYYY, sendo ECE a designação de trechos rodoviários e ACE designando trechos de anéis, acessos e contornos rodoviários. A seqüência XXX designa o código da rodovia e a seqüência YYYY designa o código trecho. Como exemplo pode-se citar o trecho 040 ECE 0010, o qual pertence à rodovia estadual 040 entre os pontos notáveis Fortaleza (Av. Padre Antônio Thomaz) e a entrada da CE-025; e
- Paraíba: PB-XXX/YYYY ou PBT-XXX/YYYY, sendo PB a designação de rodovias estaduais e PBT designando rodovias estaduais transitórias. A seqüência XXX designa o código da rodovia e a seqüência YYY designa o código trecho. Como exemplo pode-se citar o trecho PB-004/003, o qual é o trecho rodoviário 003 da rodovia estadual 004 entre os pontos notáveis Bayeux e Santa Rita.

A determinação de UAs objetivou definir o número mínimo possível de pontos de amostragem em cada trecho rodoviário estudado, capaz de traduzir suas características estruturais e funcionais. Portanto, o dimensionamento de UAs servirá para o DERT-CE e o DER-PB otimizarem futuras campanhas de levantamentos de dados para análise em SGP.

Primeiramente os trechos de rodovias foram segmentados de acordo com a região climática em que estão inseridos.

A segmentação climática foi realizada em duas etapas. A primeira teve por objetivo classificar o ambiente de acordo com a variação da temperatura. A segunda de acordo com a umidade do meio.

O Manual do HDM-4 (2000) apresenta uma classificação climática baseada na amplitude térmica de acordo com a Tabela 11.

O Nordeste do Brasil está localizado em uma região de clima tropical. Portanto, a Tabela 11 não pareceu suficiente para realizar uma classificação climática completa. Alternativamente, o Índice de Aridez foi capaz de distinguir regiões climáticas de acordo com a disponibilidade de umidade no meio ambiente para um período de análise especificado.

Tabela 11: Classificação Climática de acordo com a Temperatura.

Classificação da Temperatura	Descrição	Variação da Temperatura (°C)
Tropical	Temperatura quente com baixas variações	20 até 35
Sub-tropical Quente	Dias com temperaturas altas e noites frescas, estações quente e fria	-5 até 45
Sub-tropical Frio	Dias com temperaturas moderadas, invernos frios	-10 até 30
Temperado Frio	Verão quente, geada superficial no inverno	-20 até 25
Temperado Frio Intenso	Verão frio, camadas profundas de gelo no inverno	-40 até 20

O Índice de Aridez ( $I_A$ ), utilizado oficialmente pela UNESCO no Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas para a realização de Classificação Climática, é calculado a partir da seguinte equação (Middelton *et al.*, 1992):

$$I_A = \frac{P_r}{ET_0} \quad (58)$$

Onde:

- $P_r$  precipitação média (mm); e
- $ET_0$  evapotranspiração potencial (mm).

A classificação do clima através do  $I_A$  é apresentada a seguir:

- $I_A < 0,05$  (Hiper-Árido);
- $0,05 < I_A < 0,20$  (Árido);
- $0,20 < I_A < 0,50$  (Semi-Árido);

- $0,50 < I_A < 0,65$  (Sub-Úmido Seco);
- $0,65 < I_A < 1,00$  (Sub-Úmido Úmido); e
- $I_A > 1,00$  (Úmido).

Os dados de  $P_r$  e  $ET_0$ , para o cálculo do  $I_A$  para a Paraíba e para o Ceará, foram obtidos na página da *web* da Embrapa. O mapa apresentando a classificação climática quanto ao Índice de Aridez (entre os anos de 1980 e 2006) encontra-se na Figura 38.

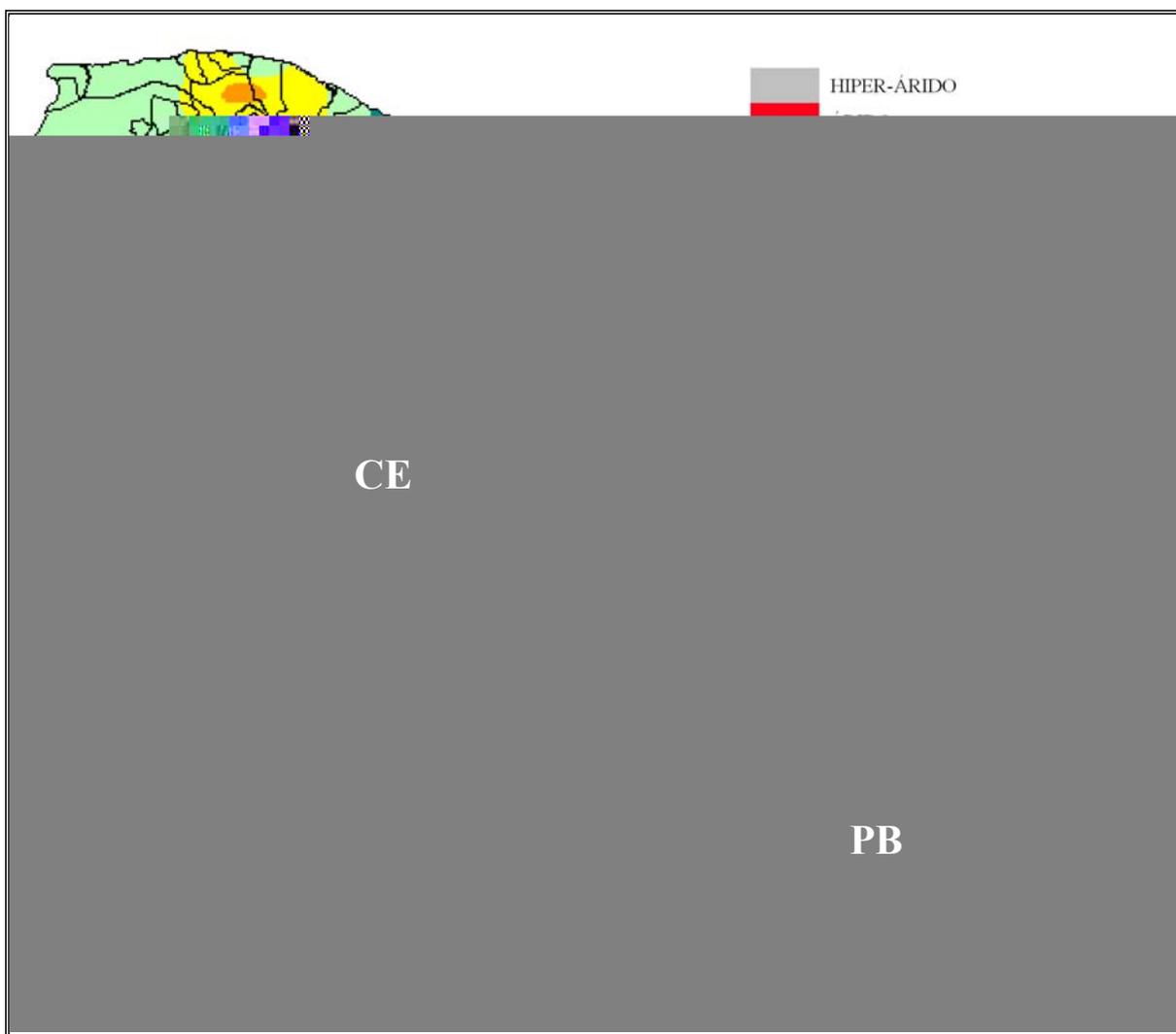


Figura 38: Mapa de Classificação Climática em função do Índice de Aridez dos estados da Paraíba e do Ceará.

Após a segmentação climática das rodovias, os segmentos estabelecidos foram novamente divididos de acordo com sua classificação funcional e com os tipos de materiais utilizados na construção dos pavimentos.

Com os novos segmentos estabelecidos, procedeu-se, em cada um, a avaliação da variação espacial de parâmetros de desempenho de pavimentos que retratem a degradação superficial (foram utilizados dados de *IGG*, fornecidos pelo DER-PB, e *PCR*, fornecido pelo DERT-CE).

Isto permitiu determinar o espaçamento máximo entre pontos de amostragem (Segmentos Homogêneos – SH) em uma rodovia, capaz de fornecer o mesmo perfil de desempenho de pavimentos que procedimentos tradicionais de monitoramento. Isto foi feito através do ajuste de um modelo ao variograma de dados reais de levantamentos realizados previamente nas rodovias. Ainda, os espaçamentos entre pontos de amostragem não superaram a extensão dos trechos de rodovia estabelecidos pelos órgãos rodoviários.

O ajuste de modelos aos variogramas foi realizado utilizando o Software VarioWin 2.2<sup>1</sup>, que fornece o modelo de maneira interativa à medida que se ajusta a curva ao Variograma identificado na tela de análise. A Figura 39 apresenta a modelagem para o *IGG*, com dados da PB-073/021, no trecho que vai da entrada PB-103 (Bilinguim) à entrada PB-111 (Campo de Santana).

Com o SH estabelecido, considerado a extensão compatível com o valor do alcance obtido através do variograma, a finalização da análise compreendeu a avaliação de erros entre valores reais e estimados, ou seja, a validação do modelo ajustado ao variograma e, portanto, da extensão considerada para o SH. Para isso foi utilizado o módulo “Validação Cruzada da Krigagem” do software GSlib 90<sup>1</sup>, o qual, utilizando o modelo estabelecido, realiza a estimativa de dados por krigagem e também gera uma matriz de erros (diferença entre valores reais e estimados). Esses erros foram avaliados através do Erro Médio Absoluto, comparando-se à magnitude dos valores lidos em campo (Albuquerque *et al.*, 2006). O Erro Médio Absoluto foi calculado pela seguinte equação (Spiegel, 1994):

---

<sup>1</sup> Os softwares utilizados nestas análises (VarioWin 2.2 e GSlib90) são de domínio público e estão disponíveis para Download (inclusive tutoriais) nos sites <http://www-sst.unil.ch/research/variowin/index.html> e <http://www.staios.com/WinGslib/>, respectivamente.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \quad (59)$$

Onde:

- $O_i$  é o  $i$ ésimo valor observado;
- $E_i$  é o  $i$ ésimo valor estimado; e
- $n$  é o número de observações.

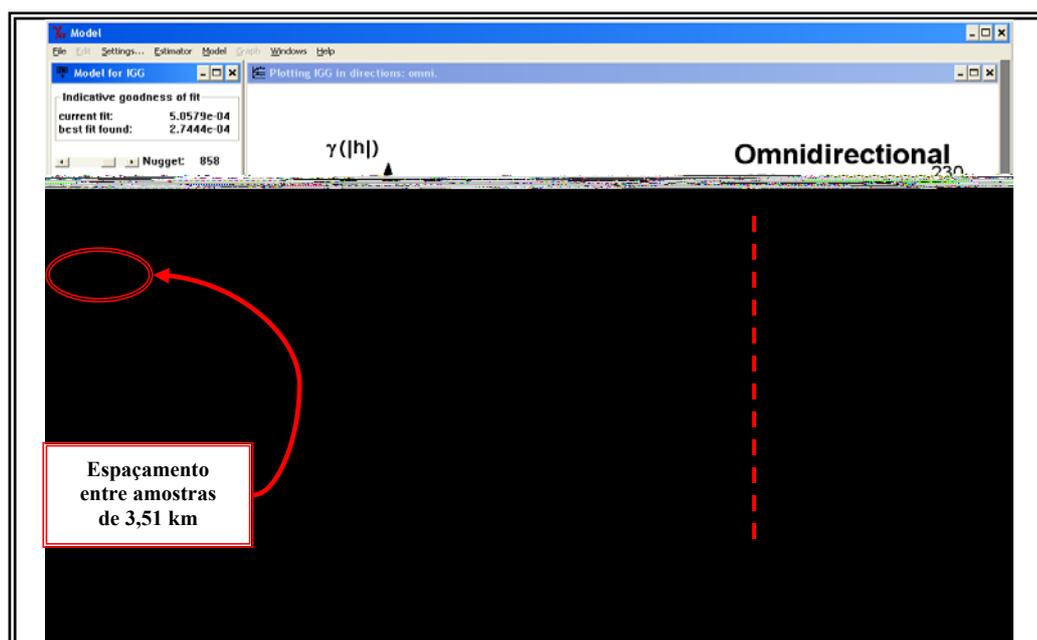


Figura 39: Exemplo de Modelagem de Variograma de Dados de *IGG* (PB-073/021).

A partir de cada SH aprovado na análise de erros, as UAs foram estabelecidas com a extensão de 1.000 metros (500 m a vante e a ré do ponto central do SH), contendo três Segmentos Testemunha de 100 m, um no início, outro no meio e o último no final da UA.



Os modelos de previsão de desempenho são determinísticos empíricos e elaborados por Regressão por Crescimento Exponencial, para o caso de *IRI*, Deflexão e *IGG*, utilizando o Método de Estimativa Quase-Newton, e por Regressão Linear Múltipla, para o caso do *PCR*.

O crescimento exponencial ocorre quando a taxa de crescimento de uma função é sempre proporcional ao valor atual do parâmetro de desempenho. Este crescimento segue uma lei exponencial. Isso implica que, crescendo exponencialmente, quanto maior o valor atual, mais rápido será a evolução para o seu estado limite (Hair *et al.*, 2005). Isto explica o caso da evolução dos valores de *IRI*, Deflexão e *IGG* no tempo.

O Método Quase-Newton foi utilizado para avaliar a função do modelo a ser ajustado através da análise de sua inclinação a partir da estimativa de derivadas de primeira e segunda ordem, respectivamente. Esta informação é usada para que a função do modelo ajustado siga uma trajetória que promova o mínimo desvio entre valores reais e estimados (Hair *et al.*, 2005).

A Regressão por Crescimento Exponencial é representada por um modelo do tipo (Hair *et al.*, 2005):

$$y = a + \exp(b + c \cdot x_1 + d \cdot x_2 + \dots) \quad (60)$$

Onde:

- $y$  é a variável dependente;
- $x_i$  é a  $i$ ésima variável independente; e
- $a, b, c, d, \dots$  são os parâmetros do modelo.

O método por Regressão Linear Múltipla foi escolhido para avaliar a evolução do *PCR*. Como o *PCR* é um parâmetro decrescente ao longo do tempo, a modelagem exponencial não seria um método adequado para descrever a sua evolução. O Método dos Mínimos Quadrados foi utilizado como técnica de otimização matemática objetivando estimar os coeficientes do modelo (Hair *et al.*, 2005).

A função que representa a Regressão Linear Múltipla é (Hair *et al.*, 2005):

$$y = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + \dots \quad (61)$$

Onde:

- $y$  é a variável dependente;
- $x_i$  é a  $i$ ésima variável independente; e
- $a, b, c, \dots$  são os parâmetros do modelo.

Um requisito implícito para emprego dos métodos de regressão apresentados anteriormente é que os erros em cada medida sejam distribuídos aleatoriamente, segundo uma distribuição normal (Hair *et al.*, 2005).

A evolução dos valores de *IRI*, Deflexão com Viga Benkelman e *FWD*, *IGG* e *PCR* (variáveis dependentes) foram avaliados através de modelos de previsão de desempenho utilizando “variáveis independentes codificadas” que expressam a classificação climática, a capacidade estrutural do pavimento e o número acumulado de tráfego, conforme explicado a seguir:

- Classificação Climática: como todos os trechos analisados encontram-se em ambiente de clima tropical, a temperatura não foi levada em consideração no ajuste dos modelos. Em contrapartida, foi utilizada a classificação climática derivada do Índice de Aridez, utilizada pela UNESCO e descrita previamente, com o objetivo de avaliar a umidade disponível no ambiente, informação bastante útil e que influencia a degradação de pavimentos. Essa classificação é expressa pela variável codificada  $C$ ;
- Capacidade Estrutural do Pavimento: foi representada pelo *SNC*, determinado pelo método da AASHTO (1993) ou da DNER-PRO 159/85, com correção pela consideração do subleito em ambos os casos. Para o cálculo do *SNC*, o conhecimento das características dos materiais granulares que constituem o pavimento, tais como tipo de material, Módulo de Resiliência ou *ISC* e espessuras, foram determinantes. Quanto ao revestimento, para efeito de análise da evolução de parâmetros de desempenho, o coeficiente estrutural considerado foi sempre o de pavimento novo (0,173 para Mistura Asfáltica com  $h > 3\text{cm}$  e 0,07 para Mistura Asfáltica com  $h \leq$

3cm; 0,04 para Tratamentos Superficiais). O *SNC* é expresso pela variável codificada *S*; e

- Número Acumulado de Tráfego: foi utilizado o número acumulado de repetições do eixo padrão, calculado com fatores de carga da AASHTO, sendo expresso pela variável codificada *N*.

A codificação destas variáveis foi utilizada para agrupá-las em intervalos de valores que conferissem semelhante influência às condições funcional e estrutural do pavimento. Intervalos com patamares diferentes foram definidos para a codificação de *S* e *N* de revestimentos em misturas asfálticas e tratamentos superficiais, levando-se em consideração a distribuição de frequência dos valores de *SNC* e  $N_{acum}$ . Os níveis codificados das variáveis *S* e *N* são apresentados na Tabela 12 para pavimentos revestidos com mistura asfáltica e tratamento superficial, e os níveis codificados para a variável *C*, que são os mesmos para os dois tipos de revestimentos, encontram-se na Tabela 13.

Tabela 12: Codificação para as variáveis independentes *S* e *N*.

Tipo de Revestimento	Variável Codificada	Níveis (código)		
		Baixo (-1)	Médio (0)	Alto (+1)
Concretos Asfálticos	<i>S</i>	$SNC \leq 3,0$	$3,0 < SNC \leq 4,0$	$SNC > 4,0$
	<i>N</i>	$N_{acum} \leq 4,0 \times 10^6$	$4,0 \times 10^6 < N_{acum} \leq 1,0 \times 10^7$	$N_{acum} > 1,0 \times 10^7$
Tratamentos Superficiais	<i>S</i>	$SNC \leq 2,5$	$2,5 < SNC \leq 3,5$	$SNC > 3,5$
	<i>N</i>	$N_{acum} \leq 8,0 \times 10^5$	$8,0 \times 10^5 < N_{acum} \leq 2,0 \times 10^6$	$N_{acum} > 2,0 \times 10^6$

Tabela 13: Codificação para a variável independente *C*.

Classificação Climática da UNESCO* (código)				
Úmido	Sub-Úmido Úmido	Sub-Úmido Seco	Semi-Árido	Árido e Hiper-Árido
(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)

\* Classificação que avalia a umidade disponível no meio.

Os dados utilizados na elaboração de cada modelo de previsão de desempenho desta tese encontram-se nos Apêndices III, IV, V e VI. Constituem os Bancos de Dados Sintetizados para cada parâmetro de desempenho dos estados do Ceará e da Paraíba.

### 6.2.3 Elaboração de Árvores de Decisão

Árvore de Decisão foi o método de seleção de alternativas de intervenção escolhida para suporte às análises de priorização. Sua utilização é fácil por ser visualmente elucidativa.

Sua elaboração seguiu o procedimento descrito no Capítulo 2 e foram utilizados valores limites críticos descritos no item 4.2, ajustados de acordo com a realidade local.

As análises propostas nesta tese se limitam às intervenções de manutenção, mas podem ser facilmente ampliadas para análise envolvendo melhoramentos, ampliações e construção de novas rodovias.

As Árvores de Decisão elaboradas nesta tese são divididas para análise em Nível de Rede e em Nível de Projeto.

Em Nível de Rede (Figura 40) foi utilizado o parâmetro *PCR* (*Pavement Condition Rating*), obtido em Levantamento Visual, como definidor do tipo de intervenção de manutenção (Nada a Fazer; Conserva; Lama Asfáltica – ou Micro-Revestimento; Correções Localizadas ou Recapeamento; Restauração; e Reconstrução da Pista). Foram utilizadas as faixas de valores do *PCR* que correspondem a um pavimento em estado excelente, bom, regular, deficiente, ruim e péssimo. Os tipos de intervenção indicados foram utilizados para análise em Nível de Rede.

No SGP em Nível de Projeto (Figura 41) o *IRI* e o *PCR* são utilizados para a seleção de alternativas possíveis de intervenção, pois estes parâmetros retratam a condição funcional e são indicadores da condição estrutural do pavimento. Utilizaram-se faixas de valores de *IRI* e *PCR* para se determinar o conceito de serventia de um pavimento e indicar as alternativas de manutenção. Tais alternativas servirão aos Órgãos Rodoviários do Nordeste na análise de Otimização Multicriterial em Nível de Projeto. Ainda, as alternativas de intervenção receberam uma codificação conforme se segue:

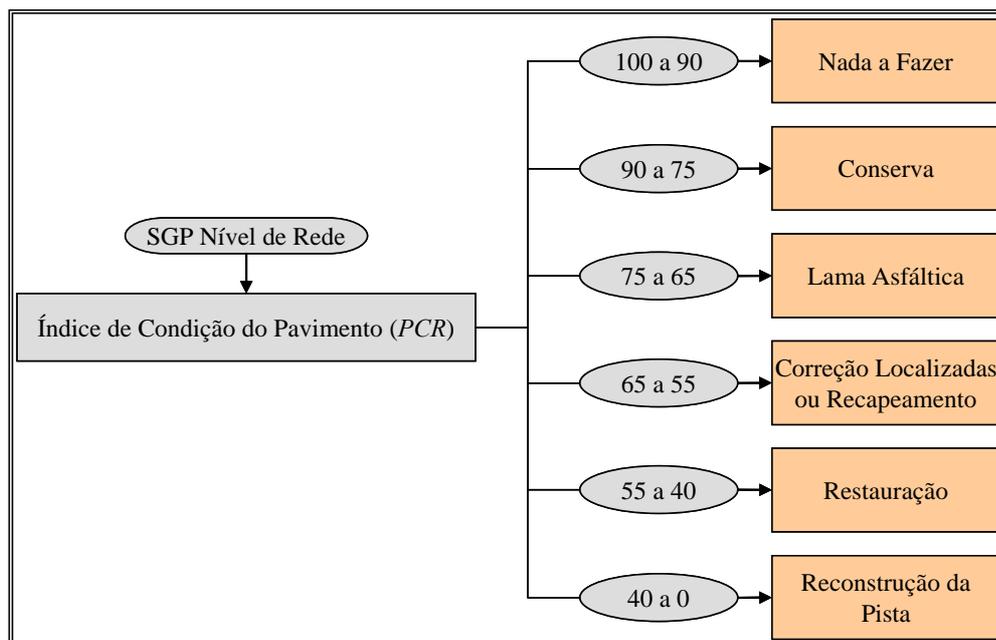


Figura 40: Árvore de Decisão para Análise de SGP em Nível de Rede.

- (RS) Remendo superficial;
- (RP) Remendo profundo;
- (LA) Lama Asfáltica;
- (TSS) Tratamento Superficial Simples;
- (TSD) Tratamento Superficial Duplo;
- (RE) Recapeamento simples em CBUQ;
- (RRT) Remoção e Reconstrução Total do Revestimento Asfáltico;
- (FR+RE) Fresagem Total ou Parcial do Revestimento e aplicação de camada em CBUQ;
- (CI+RE) Camada Granular Intermediária contra Reflexão de Trincas e Recapeamento;
- (Geo+RE) Colocação de Geotêxtil após uma Pintura de Ligação na camada existente (trincada), seguida de Recapeamento;

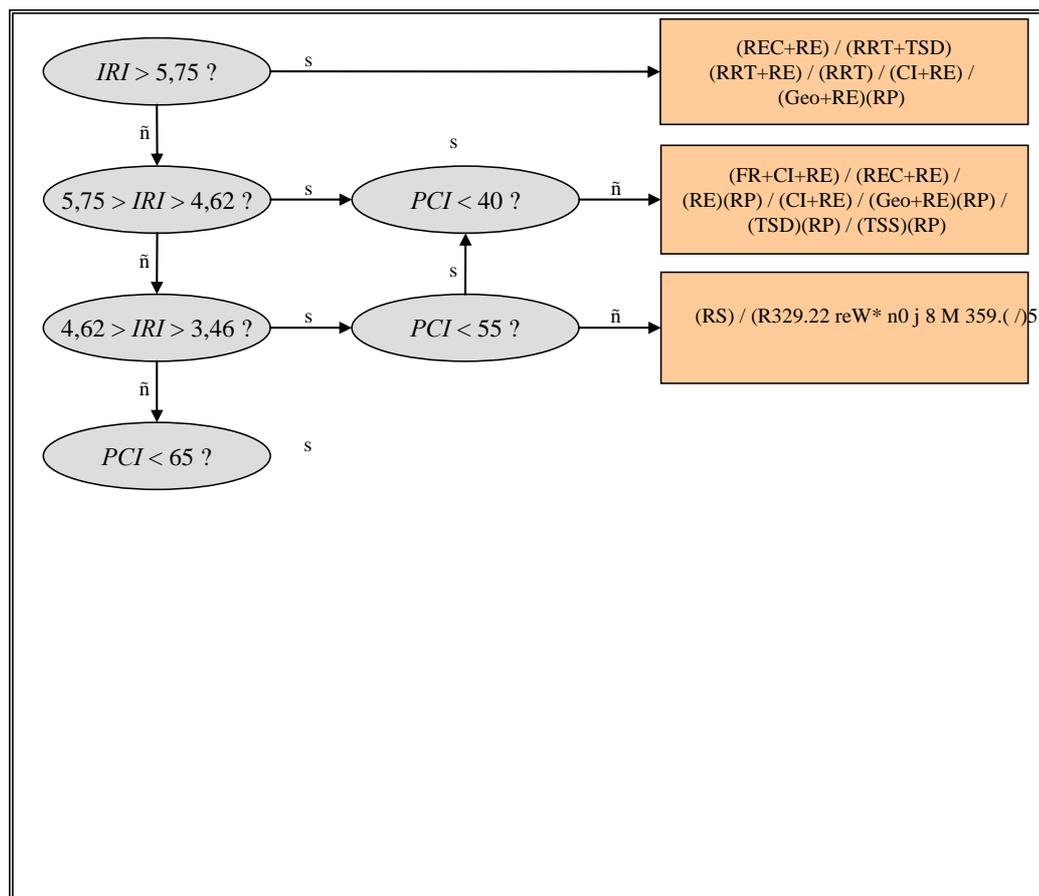


Figura 41: Árvore de Decisão para Análise de SGP em Nível de Projeto.

- (FR+CI+RE) Fresagem Parcial do Revestimento deteriorado, seguida de aplicação de Camada Intermediária contra Reflexão de Trincas e cobertura com Revestimento em CBUQ;
- (REC+RE) Reciclagem do Revestimento e da Base Granular deteriorados, formando-se uma Base Tratada com Emulsão, espuma de asfalto ou Cimento e construindo-se um novo Revestimento;
- (RRT+TSD) Remoção e Reconstrução (com ou sem reciclagem) do Revestimento existente e da camada de Base, seguida de aplicação de camada de TSD; e
- (RRT+RE) Remoção e Reconstrução (com ou sem reciclagem) do Revestimento existente e da camada de Base, seguida de aplicação de camada de CBUQ.

Quando a necessidade do trecho analisado for “Reconstrução da Pista”, as áreas identificadas devem ser diretamente analisadas em etapa de Projeto de Pavimentação, levando-se em

consideração as tecnologias disponíveis, com realização de diagnóstico para avaliar as causas da degradação completa do pavimento.

Para a etapa de Projeto de Pavimentação, é fundamental que a nova estrutura seja avaliada mecanisticamente e que sejam atendidos os requisitos descritos na Árvore de Decisão para Análise de Dimensionamento de Pavimento (Figura 42).

Os parâmetros analisados na Figura 42 são a Deflexão Máxima no Topo do Revestimento ( $\delta_{\text{máx}}$ ), a Deformação Específica de Extensão na fibra inferior da Camada Asfáltica nova ( $\epsilon_{\text{T máx}}$  – critério de fadiga), a Tensão de Tração na fibra inferior da Camada Asfáltica nova ( $\sigma_{\text{T máx}}$  – critério relacionado à ruptura brusca do revestimento), o Fator de Segurança quanto à ruptura por cisalhamento na base granular (FS) e a Tensão Vertical no Subleito ( $\sigma_{\text{Z máx}}$ ).

Os modelos para a determinação dos valores admissíveis variam com os tipos de materiais analisados. Devem-se priorizar os modelos de Deflexão Admissível da norma DNER-PRO 269/94 e de Heukelom e Klomp (1962) para Tensão Vertical no Subleito. Para Deformação Específica de Extensão e para o FS (quanto à ruptura por cisalhamento da base granular), sugere-se adotar modelos incluídos no Método de Dimensionamento Mecânico da República Sul-Africana (Paterson e Maree, 1994).

As análises de projeto mecânico de pavimentos são sugestões apresentadas e plenamente aplicáveis, mas não fazem parte do escopo desta tese.

#### 6.2.4 Priorização em Nível de Rede

A ferramenta de Priorização avaliada nesta tese foi o Método de Análise Multicriterial do PROMETHEE II. Esta ferramenta, com metodologia descrita no Capítulo 5, é capaz de analisar diversos critérios para fornecer decisões hierarquizadas.

Este tipo de análise é de fundamental importância quando se pretende, além de executar uma obra com melhor relação benefício/custo, proporcionar um mecanismo de desenvolvimento às regiões menos favorecidas, através de obras de infra-estrutura como rodovias. O objetivo maior de obras de infra-estrutura é, justamente, alavancar desenvolvimento sócio-econômico.

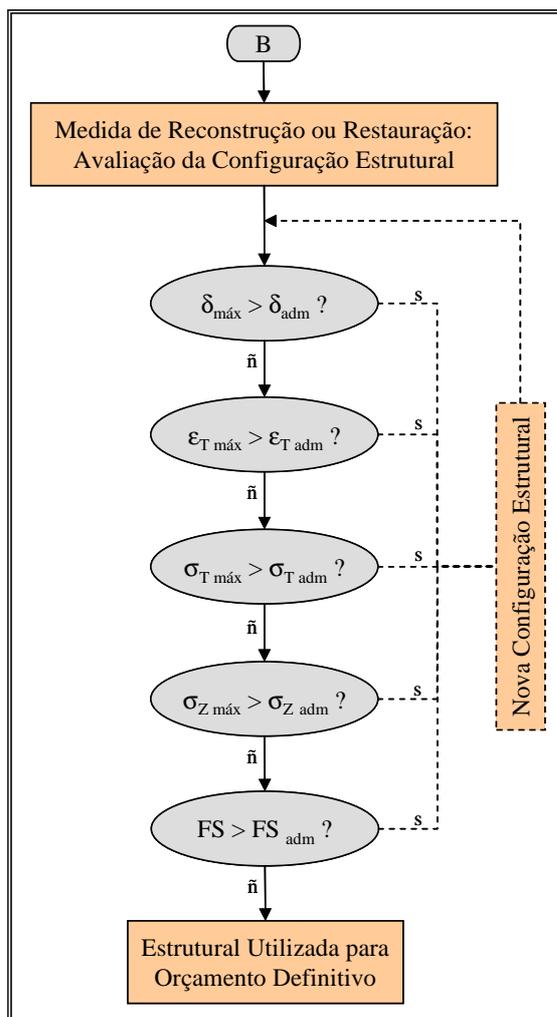


Figura 42: Árvore de Decisão para Análise de Dimensionamento de Pavimento.

Em Nível de Rede, as análises foram processadas de acordo com a situação atual de cada Trecho Rodoviário. Primeiramente foi realizado um diagnóstico de rede, verificando a necessidade presente de intervenção de cada trecho rodoviário, de acordo com os valores previstos de *PCR* para a data da análise, e foi levantado o Custo de Manutenção (*CM*) associado, representando o custo direto para recolocar o pavimento em condições aceitáveis, conforme definido na Tabela 14.

Esses custos servem para o Planejamento Plurianual de Investimentos por parte dos Órgãos Rodoviários, de acordo com a hierarquização estabelecida no processo de Priorização em Nível de Rede, obedecendo às restrições orçamentárias.

Tabela 14: Custos de Alternativas em Nível de Rede para Pista Simples.

<b>Tipo de Alternativa</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário Médio (R\$)</b>
Conserva	km/ano	6.000
Lama Asfáltica	km	8.000
TSD	km	12.000
Correções de Defeitos	km	35.000
Mistura Asfáltica	m <sup>3</sup>	120
Reconstrução	km	200.000

(fonte: página na Internet do DNIT – [www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br), 2005)

Com o perfil das necessidades atuais e futuras de cada trecho rodoviário (em termos de *PCR*) e com os demais critérios de análise, a ferramenta do PROMETHEE II foi aplicada em uma “Simulação de Priorização em Nível de Rede”, hierarquizando os trechos quanto à necessidade de intervenção. Devido à grande quantidade de trechos rodoviários existentes nos estados do Ceará e Paraíba, as análises foram realizadas em uma amostra aleatória no total de 40 trechos.

Os critérios utilizados na análise em Nível de Rede, seus pesos de influência e suas funções de preferência estão descritos nos itens seguintes, levando-se em consideração as seguintes categorias: técnico-financeiras, econômicas, sociais, ambientais e de transporte.

#### 6.2.4.1 Critérios Técnico-financeiros

Os critérios técnico-financeiros utilizados na análise foram o valor do *PCR* atual (no ano de análise), a Vida Residual do pavimento (tempo restante para que o *PCR* seja igual a 75), o Número Anual de Operações do Eixo Padrão ( $N_{ano}$ ) e o Custo de Manutenção em função do *PCR* atual e da extensão do trecho. As funções preferência e os pesos adotados para cada critério são os seguintes:

- *PCR* atual: a função preferência foi a *Linear* (minimizar<sup>2</sup>) e o peso para este critério será de 30%;
- Vida Residual (anos): a função preferência foi a *Linear* (minimizar) e o peso para este critério será de 10%;
- Número Anual de Repetições do Eixo Padrão ( $N_{ano}$ ): a função preferência foi a *Linear* (maximizar<sup>2</sup>) e o peso para este critério será de 10%; e
- Custo de Manutenção (R\$): a função preferência foi a *Linear* (minimizar) e o peso para este critério será de 10%.

#### 6.2.4.2 Critérios Econômicos

Para a análise dos critérios econômicos empregou-se o banco de dados existente na página do IBGE na *web* ([www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)) sobre os municípios brasileiros. Foram utilizados os dados relativos à agropecuária (PIB Agropecuário e Potencial Agrícola), indústria (PIB Industrial) e turismo (Via de Acesso Turístico) dos municípios servidos diretamente por cada trecho rodoviário analisado. As funções preferência e os pesos adotados para cada critério são os seguintes:

- PIB Agropecuário (R\$): a função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso para este critério será de 2,5%;
- Potencial Agrícola: foi utilizado o mapa da Figura 43 para a identificação da região agrícola que cada trecho rodoviário está inserido. A função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso para este critério será de 2,5%. A escala adotada na análise é de Boa (10) a Desfavorável (1), conforme conceitos identificados na Figura 43;
- PIB Industrial (R\$): a função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso para este critério foi de 2,5%; e

---

<sup>2</sup> Minimizar a função preferência implica em priorizar os valores em ordem crescente. Já maximizar a função preferência implica em priorizar os valores em ordem decrescente.

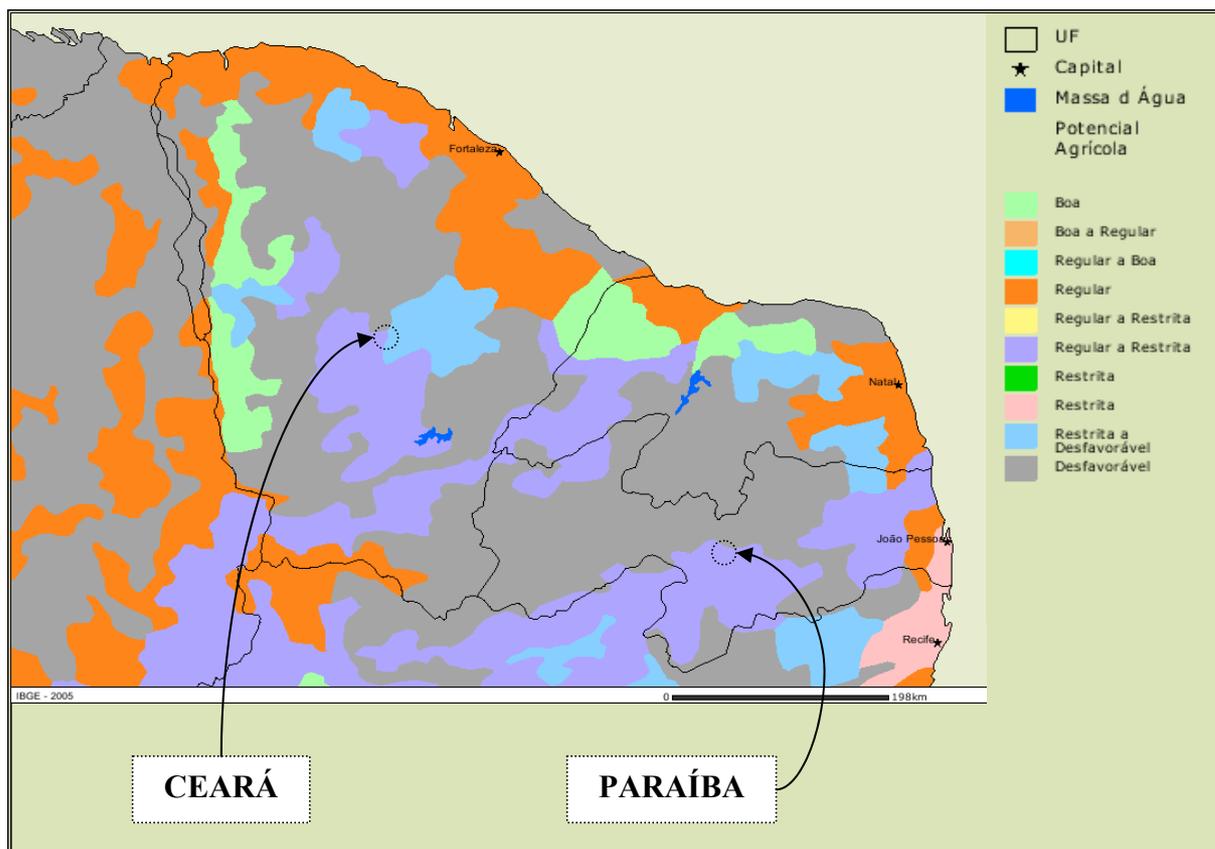


Figura 43: Mapeamento do Potencial Agrícola dos Estados estudados.

- Via de Acesso Turístico: um trecho rodoviário considerado via turística recebe a pontuação 2, caso contrário recebe pontuação 1. A função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso para este critério foi de 2,5%.

#### 6.2.4.3 Critérios Sociais

Na análise dos critérios sociais também fez-se uso do banco de dados existente na página do IBGE na *web* ([www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)) sobre os municípios brasileiros. Foram utilizados os dados relativos à População, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e PIB *per capita* dos municípios servidos diretamente por cada trecho rodoviário analisado. As funções preferência e os pesos adotados para cada critério são os seguintes:

- População: A função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso para este critério 5%;

- IDH: A função preferência foi a *Linear* (minimizar) e o peso para este critério 2,5%;
- PIB *per capita* (R\$/hab.): A função preferência foi a *Linear* (minimizar) e o peso para este critério 2,5%.

#### 6.2.4.4 Critérios Ambientais

Os critérios ambientais analisados foram:

- Necessidade de Extração de Recursos Minerais; e
- Proximidade de Unidades de Proteção.

Para a análise da Necessidade de Extração de Recursos Minerais foram atribuídas pontuações relativas ao nível de utilização de recursos minerais em cada tipo de intervenção apontada na Árvore de Decisão para Análise de SGP em Nível de Rede (Figura 40). Para a situação de “Nada a Fazer” não houve necessidade de extração de recursos minerais (pontuação 0). Para a “Conserva” foi considerada uma necessidade “Muito Baixa” (pontuação 1) de extração de recursos minerais, para aplicação de “Lama Asfáltica” é “Baixa” (pontuação 2), para “Correções Localizadas ou Recapeamento” é “Moderada” (pontuação 3), “Restauração” é “Alta” (pontuação 4) e para “Reconstrução da Pista” é “Muito Alta” (pontuação 5). A função preferência foi a *Linear* (minimizar) e o peso para este critério 5%.

Quanto a Proximidade de Unidades de Proteção, foi utilizada a distância em quilômetros do Trecho Rodoviário até a Unidade de Proteção Ambiental (Figura 44) mais próxima. Entendendo-se que quanto menor for essa distância maior será a vulnerabilidade da Unidade de Proteção Ambiental, então deseja-se que essa distância seja a maior possível. Portanto, foi utilizada a função preferência *Linear* (maximizar) com peso 5%.

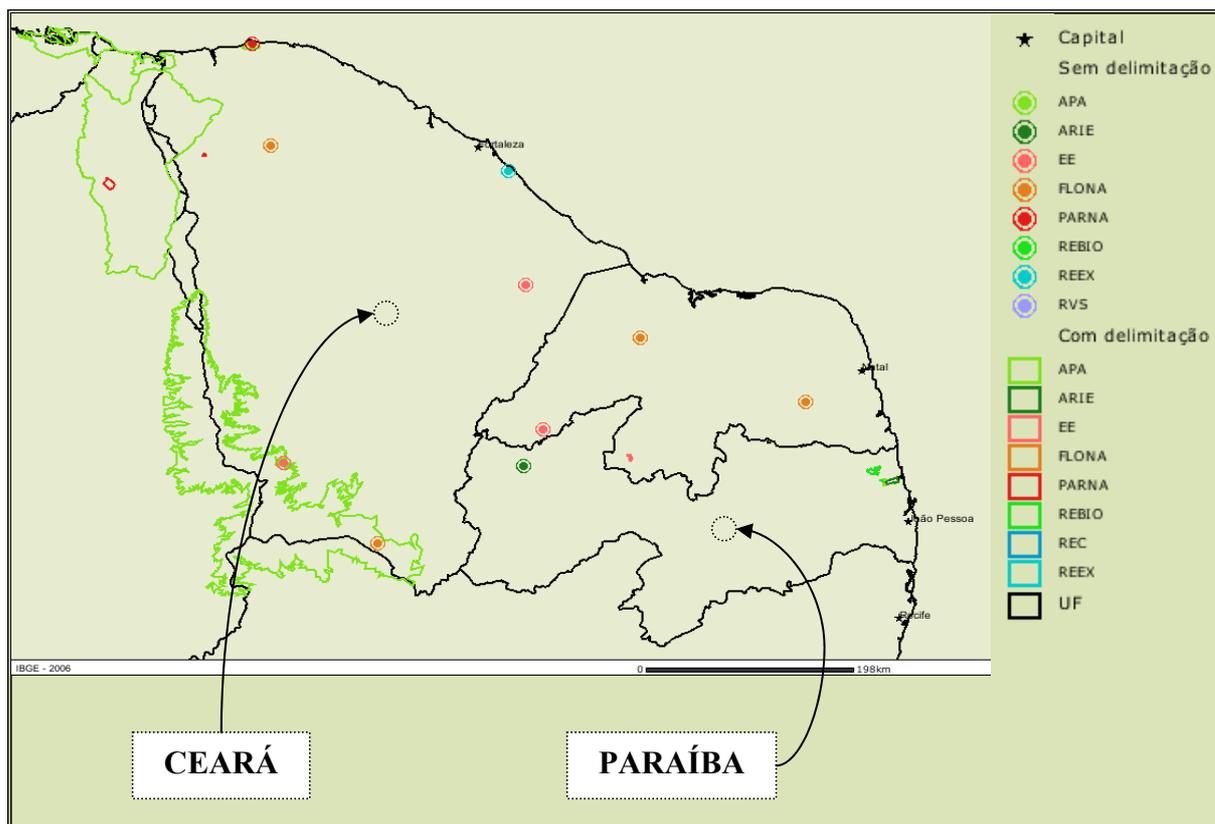


Figura 44: Mapeamento das Unidades de Proteção Ambiental nos Estados estudados.

No caso do VDM e Extensão do Segmento, foram utilizados os dados fornecidos pelos Órgãos Rodoviários do Ceará e Paraíba. Para a Frota Disponível nas Cidades, foi utilizado o banco de dados existente na página do IBGE na *web* sobre os municípios brasileiros, utilizando-se o somatório das frotas dos municípios que são ligados pelo Trecho Rodoviário analisado. As funções preferência e os pesos adotados para cada critério foram os seguintes:

- VDM: A função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso de 5%;
- Frota Disponível nas Cidades: A função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso de 2,5%; e
- Extensão do Segmento (km): A função preferência foi a *Linear* (maximizar) e o peso de 2,5%.

O resumo dos critérios utilizados para análise de priorização em nível de rede, bem como as funções de preferência e os pesos de cada critério estão apresentados na Figura 45.

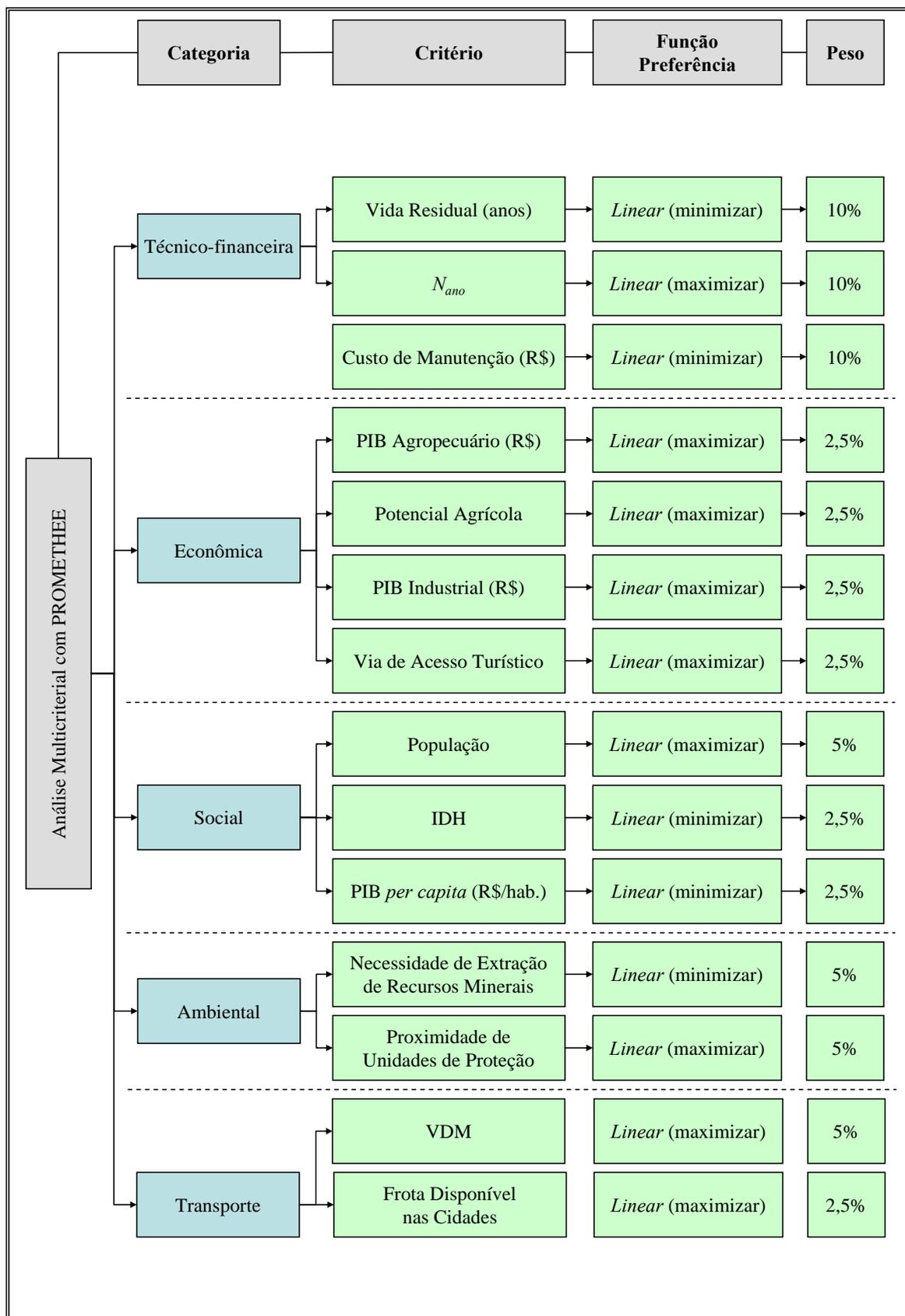


Figura 45: Critérios, Funções Preferência e Pesos para Priorização no SGP em Nível de Rede.

### 6.2.5 Priorização em Nível de Projeto

A ferramenta para Otimização de alternativas de intervenção em Nível de Projeto foi a mesma que em Nível de Rede. A diferença entre as duas análises foram os critérios analisados neste nível. Foi utilizado o software Decision Lab 2000<sup>3</sup>, o qual aplica a metodologia do PROMETHEE II, apresentada no Capítulo 5.

Como o objetivo desta etapa da pesquisa foi analisar o Método PROMETHEE II aplicado à otimização em Nível de Projeto, foram escolhidos os dois Trechos Rodoviários do Estado do Ceará e do Estado da Paraíba com maior prioridade de intervenção, segundo resultados da priorização em Nível de Rede.

As categorias de critérios analisadas foram as financeira e técnica, conforme apresentado na seqüência. O período adotado para análise foi de 10 anos.

#### 6.2.5.1 Critério Financeiro

O critério financeiro analisado foi o Custo do Ciclo de Vida (CCV) do pavimento, obtido através da Equação 2 no Capítulo 2 desta tese.

Os custos foram contabilizados para todos os anos de análise, levando-se em consideração as necessidades de intervenção definidas por previsão de desempenho, após aplicações das múltiplas estratégias, e pela árvore de decisão para nível de projeto. A análise incluiu a alternativa de “Nada a Fazer”.

No cálculo do CCV, foram utilizados os custo de serviços de pavimentação para o Nordeste Brasileiro contidos nas Tabelas do SICRO2, disponibilizadas na página da *web* do DNIT ([www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br)).

Como o CCV é fator fundamental para obtenção de financiamento e fluxo de caixa das contas públicas, este critério recebeu o maior peso dentre os analisados em nível de projeto (50%). A função preferência utilizada foi a *V-Shape* (minimizar).

---

<sup>3</sup> O Software Decision Lab 2000 e seu tutorial estão disponíveis, em sua versão de triagem, no site <http://www.visualdecision.com>.

### 6.2.5.2 Critérios Técnicos

Foram adotados os valores de *IRI*, Deflexão com FWD ( $D_{0\ FWD}$ ) e o *PCR* ao final do período de análise, resultante do conjunto de alternativas de manutenção empregados neste período (obtidos através de modelos de previsão de desempenho).

A escolha desses parâmetros de desempenho não teve o objetivo de validação dos modelos de previsão de desempenho, mas apenas de padronizar os parâmetros de análise para facilitar a comparação dos resultados da otimização entre os dois estados.

Foram analisados cinco conjuntos de alternativas de manutenção aplicáveis nos trechos analisados (de acordo com a árvore de decisão em nível de projeto), e foi acrescentada na análise a alternativa “Nada a Fazer” (ND).

Os pesos de cada parâmetro de desempenho e as funções preferência respeitaram o seguinte:

- Para o *IRI* foi *V-Shape* (minimizar), com peso de 16,67%;
- Para o *PCR* foi *V-Shape* (maximizar), com peso de 16,67%; e
- Para a  $D_{0\ FWD}$  foi *V-Shape* (minimizar), com peso de 16,66%.

O resumo dos critérios utilizados para análise de otimização em nível de projeto, bem como as funções preferência e os pesos de cada critério estão apresentados na Figura 46.

## 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As etapas de desenvolvimento do Sistema de Gerência de Pavimentos para Órgãos Rodoviários do Nordeste Brasileiro foram apresentadas neste capítulo, incluindo os critérios para levantamento de dados (dimensionamento de UAs), para elaboração de modelos de previsão de desempenho, seleção de alternativas e análise de Priorização em Nível de Rede e Otimização em Nível de Projeto.

No próximo capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, com o objetivo de estabelecer as vantagens e limitações das ferramentas propostas para utilização em SGPs.

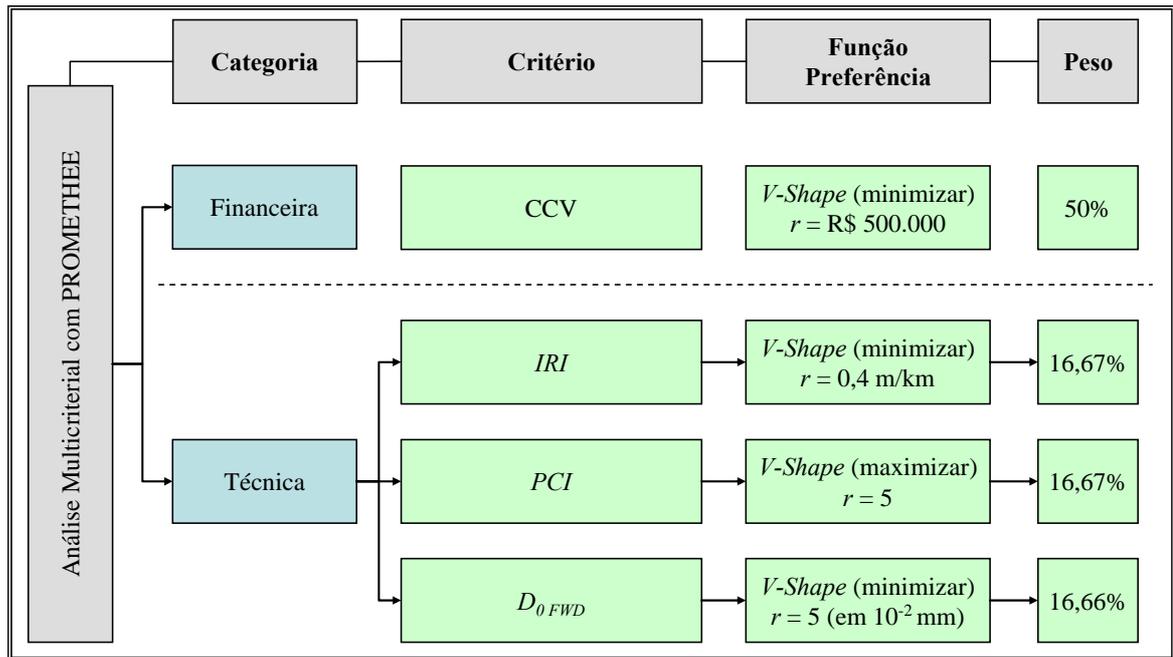


Figura 46: Critérios, Funções Preferência e Pesos para Priorização no SGP em Nível de Projeto.



- Otimização em Nível de Projeto, com apresentação das etapas de cálculo dos parâmetros de desempenho e do custo do ciclo de vida (*CCV*) para cada alternativa analisada na “Simulação de Otimização em Nível de Projeto”.

## 7.1 DIAGNÓSTICO DAS MALHAS RODOVIÁRIAS

A ocorrência, extensão e frequência de defeitos em pavimentos estão intimamente relacionados às solicitações de tráfego, aos materiais utilizados em pavimentação e à idade do pavimento.

Por outro lado, o comportamento estrutural dos pavimentos é influenciado pela umidade existente nas camadas granulares do pavimento e do subleito, derivadas das precipitações e suas condições de drenagem. A temperatura também é determinante na variação do módulo de resiliência de misturas asfálticas e oxidação do ligante, com seus efeitos agravados em ambientes com grandes amplitudes térmicas diárias como a Região Nordeste do Brasil.

Nas seções seguintes são apresentados os diagnósticos dos pavimentos das malhas rodoviárias do Estado da Paraíba e do Ceará, focando como as condições pedológicas, climáticas e de tráfego influenciaram nos resultados dos monitoramentos dos parâmetros de desempenho.

### 7.1.1 Diagnóstico da Malha da Paraíba

O DER/PB disponibilizou resultados de monitoramentos de Deflexão com Viga Benkelman ( $Do_{VB}$ ) e de Índice de Gravidade Global (*IGG*).

Na data do levantamento dos parâmetros de desempenho, a idade da última capa de revestimento aplicada aos pavimentos variava entre 10 e 25 anos. A extensão total dos trechos monitorados foi de 627 km, sendo 147 km em pavimentos revestidos em mistura asfáltica e 480 km revestidos em tratamento superficial.

Os diagnósticos da condição da malha rodoviária para o  $Do_{VB}$  e o *IGG* são apresentados através do resumo estatístico da Tabela 15. As Figuras 47 e 48 apresentam gráficos de frequência por setores para o  $Do_{VB}$  e o *IGG*, respectivamente, observando-se a situação global

da malha rodoviária (amostra fornecida pelo DER/PB) e separadamente para pavimentos revestidos em mistura asfáltica e em tratamento superficial.

Tabela 15: Diagnóstico da Malha Rodoviária da Paraíba.

Análise	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Nº de Trechos
Toda a Malha Rodoviária						
$DO_{VB}$ ( $10^{-2}$ mm)	53	50	22	14	137	601
<i>IGG</i>	113	100	67	3	551*	602
Malha com Revestimento em Mistura Asfáltica						
$DO_{VB}$ ( $10^{-2}$ mm)	53	49	25	14	137	139
<i>IGG</i>	122	111	65	20	294	139
Malha com Revestimento em Tratamento Superficial						
$DO_{VB}$ ( $10^{-2}$ mm)	54	50	21	16	129	462
<i>IGG</i>	110	96	67	3	551*	463

\* O pavimento estava totalmente degradado.

O conceito atribuído aos valores de *IGG* médio para a malha rodoviária da Paraíba (valores fornecidos pelo DER/PB) é Ruim.

O mecanismo de degradação dos pavimentos no estado da Paraíba está relacionado a três aspectos principais: deformações plásticas de camadas inferiores, trincamento por fadiga derivado do tráfego elevado (revestimento em mistura asfáltica) e trincamento e desgaste do revestimento por variação da temperatura associada ao envelhecimento do ligante asfáltico.

As deformações plásticas são bastante influenciadas pelos subleitos existentes e camadas estruturais dos pavimentos (na maior parte dos pavimentos foram utilizados solos da região como base e sub-base).

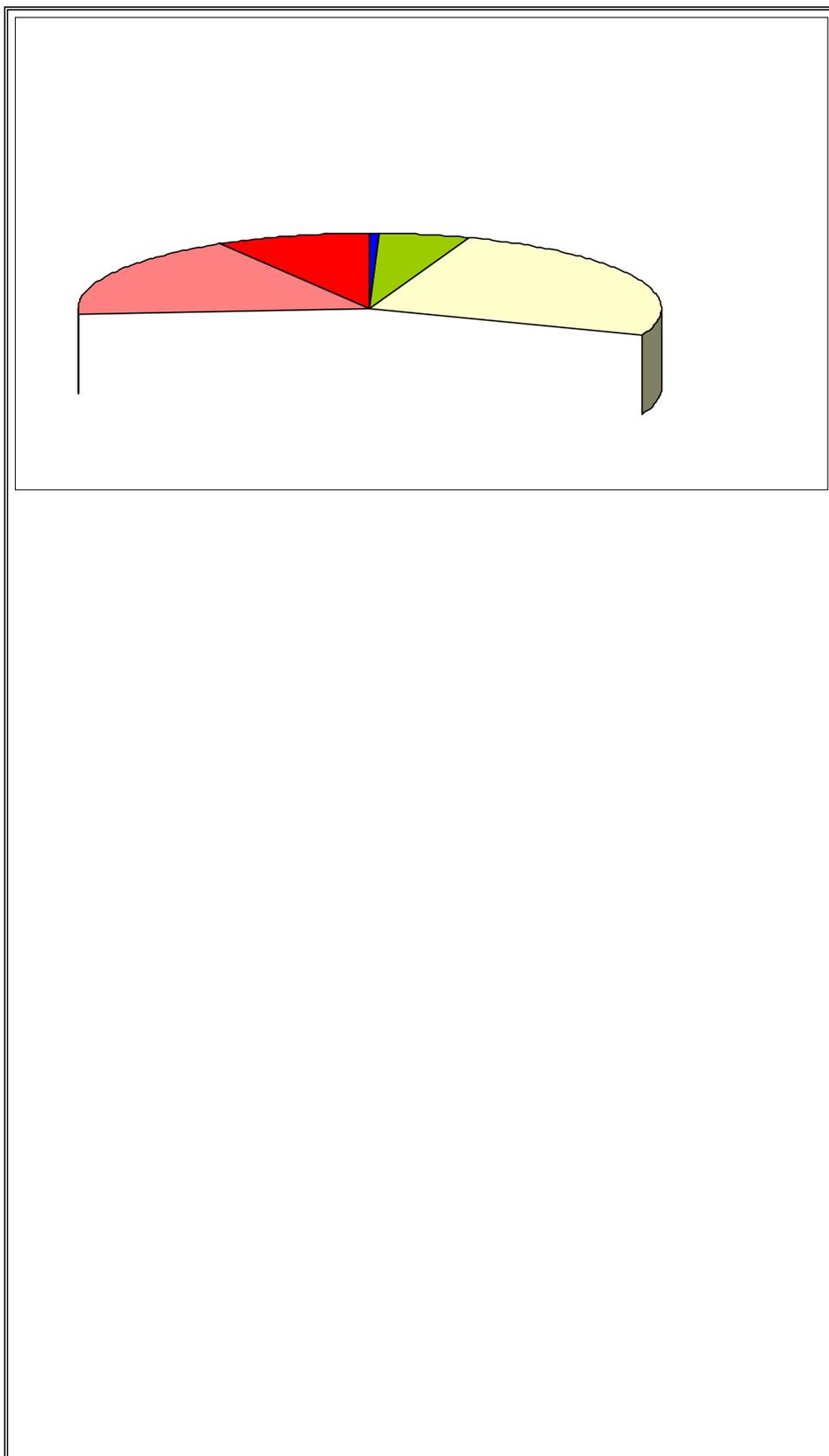


Figura 47: Distribuição de frequência de deflexão na malha rodoviária do Estado da Paraíba.

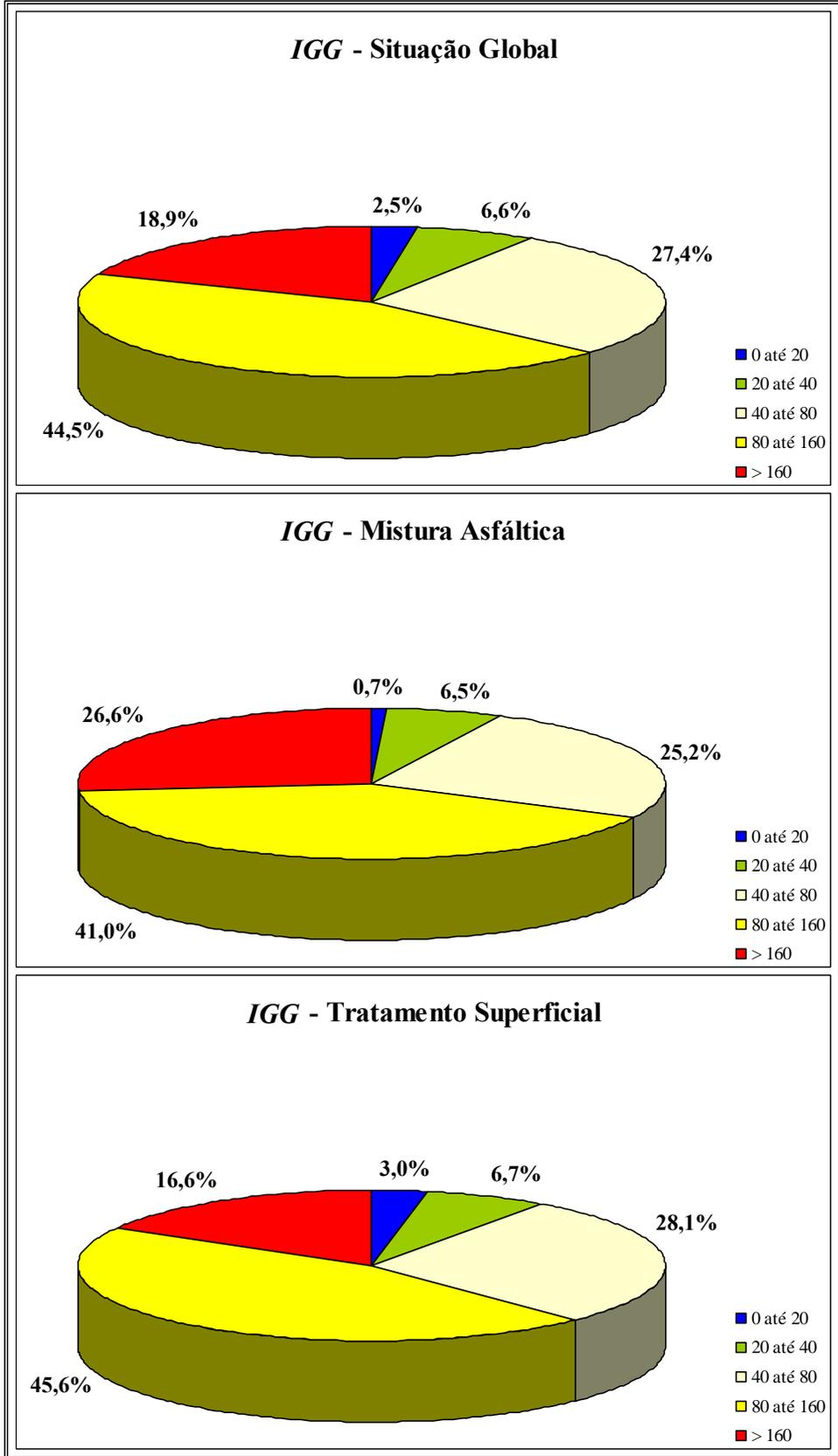


Figura 48: Distribuição de freqüência de IGG na malha rodoviária do Estado da Paraíba.

Os tipos de solos disponíveis na maior parte das localidades dos trechos rodoviários estudados na Paraíba são o Luvissole Crômico (material de alta plasticidade) e Neossolo Litólico (solo saprolítico com presença de mica – baixa resistência ao cisalhamento na presença de água). As características desses solos contribuem na ocorrência de deformações permanentes em camadas granulares e influencia nos valores altos de *IGG* dos pavimentos analisados. Um aspecto importante é que os pavimentos construídos com este tipo de material ficam expostos a clima úmido (fator desencadeador das reações físicas e químicas destes solos) por apenas três ou quatro meses no ano, pois localizam-se em regiões de clima seco a semi-árido. Em condição climática seca estes solos apresentam bons comportamentos.

O trincamento por fadiga ocasionado pela ação de tráfego elevado nos pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica é um dos importantes mecanismos de degradação dos pavimentos do estado da Paraíba, onde a média do número de solicitações acumuladas de tráfego para os trechos rodoviários analisados era de  $6,93 \times 10^6$ . Sabendo-se que as configurações das seções transversais de todos pavimentos analisados revestidos em Mistura Asfáltica são iguais, foi possível concluir a grande influência da degradação derivada do trincamento por fadiga (correlação entre  $Do_{VB}$  e  $N_{acum}$  foi de 0,58).

Outro mecanismo de degradação superficial importante foi o envelhecimento do ligante asfáltico dos revestimentos em mistura asfáltica e em tratamento superficial. Estes revestimentos ficam expostos a altas temperaturas durante todo o ano, acelerando o processo de oxidação do ligante asfáltico. Outro fator que contribui para este fenômeno é a espessura delgada das capas (tratamento superficial não maior que 2,5 cm e mistura asfáltica em 5 cm).

A ação do clima contribui para a rápida oxidação do ligante, tornando a mistura asfáltica mais frágil e propensa ao trincamento apenas em virtude das tensões geradas pelas oscilações térmicas diárias (na região do semi-árido a variação da temperatura do ar do dia para a noite pode atingir até 20°C em determinadas épocas do ano), processo esse conhecido também por trincamento gerado pelo fenômeno de envelhecimento (Figura 49).

No caso de tratamentos superficiais, o fator importante derivado da oxidação do ligante é o arrancamento de agregados pela ação do tráfego (desgaste), pois o filme de ligante perde as características aglutinantes (Figura 50).



Figura 49: Trincamento de bloco, não associado às cargas de tráfego, no km 1+600 da PB-079 (revestimento em CBUQ).



Figura 50: Desgaste em TSD oxidado no km 1+500 da PB-054.

Afundamentos por fluência plástica em mistura asfáltica, devido às altas temperaturas em associação ao tráfego, poderia ser um mecanismo importante de degradação destes revestimentos se as suas espessuras não fossem tão delgadas.

### 7.1.2 Diagnóstico da Malha do Ceará

O DERT-CE disponibilizou resultados de monitoramentos de Deflexão com FWD ( $DO_{FWD}$ ), de Irregularidade Longitudinal ( $IRI$ ) e de Índice de Condição do Pavimento ( $PCR$ ).

Na realização dos levantamentos de  $DO_{FWD}$  e  $IRI$ , a idade da última capa de revestimento aplicada aos pavimentos variava entre 1 e 15 anos. Já no levantamento do  $PCR$ , a idade da capa variava entre 1 e 18 anos. A extensão total dos trechos monitorados foi de 3.396 km, sendo 1.322 km em pavimentos revestidos em mistura asfáltica e 2.074 km revestidos em tratamento superficial.

Os diagnósticos da condição da malha rodoviária para o  $DO_{FWD}$ , o  $IRI$  e o  $PCR$  são apresentados na Tabela 16. As Figuras 51, 52 e 53 apresentam gráficos de distribuição de frequência por setores de  $DO_{FWD}$ ,  $IRI$  e  $PCR$ , respectivamente, observando-se a situação global da malha rodoviária e especificamente para pavimentos revestidos em mistura asfáltica e em tratamento superficial. Ainda, o DERT-CE realizou no ano de 2005 uma avaliação dos pavimentos da malha definindo os principais tipos de defeitos superficiais para cada trecho rodoviário (apresentado na Figura 54).

Observa-se que os valores médios de  $IRI$  são bastante altos, tanto para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica, quanto para pavimentos em Tratamento Superficial (maiores que 3,50 m/km, valor limite residual considerado pelo DNIT). A maior contribuição para estes elevados valores de irregularidade é da própria construção, pois os pavimentos são abertos ao tráfego já com elevados valores de  $IRI$ .

Quando analisando os valores de  $PCR$ , constatam-se seus bons conceitos relacionados à degradação superficial, tanto para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica, quanto em Tratamento Superficial. Isto reforça que os altos valores de irregularidade da malha viária do Ceará não derivam apenas de defeitos em pavimentos, já que 80% dela têm  $PCR$  superiores a 75 (para valores abaixo devem realizar-se manutenções segundo a ODOT, 2004).

Tabela 16: Diagnóstico da Malha Rodoviária do Ceará.

<b>Análise</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Nº de Trechos</b>
<b>Toda a Malha Rodoviária</b>						
<i>DO<sub>FWD</sub></i> (10 <sup>-2</sup> mm)	47	45	13	17	121	467
<i>IRI</i> (m/km)	3,97	3,64	1,37	1,65	10,56	465
<i>PCR</i>	83	87	11	39	91	466
<b>Malha com Revestimento em Mistura Asfáltica</b>						
<i>DO<sub>FWD</sub></i> (10 <sup>-2</sup> mm)	46	45	15	17	121	241
<i>IRI</i> (m/km)	4,10	3,51	1,68	1,65	10,56	239
<i>PCR</i>	82	87	11	39	91	241
<b>Malha com Revestimento em Tratamento Superficial</b>						
<i>DO<sub>FWD</sub></i> (10 <sup>-2</sup> mm)	48	45	11	22	92	226
<i>IRI</i> (m/km)	3,82	3,68	0,93	2,39	7,68	226
<i>PCR</i>	83	88	10	40	91	225

As deflexões médias de pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica e em Tratamento Superficial, aproximaram-se bastante, evidenciando o bom critério na escolha de materiais empregados em pavimentos com tratamento superficial. Com efeito, a maior concentração de rodovias encontra-se no sul do estado e no seu litoral, regiões essas onde há disponibilidade de bons materiais para pavimentação, sobretudo o Argissolo Vermelho-Amarelo.



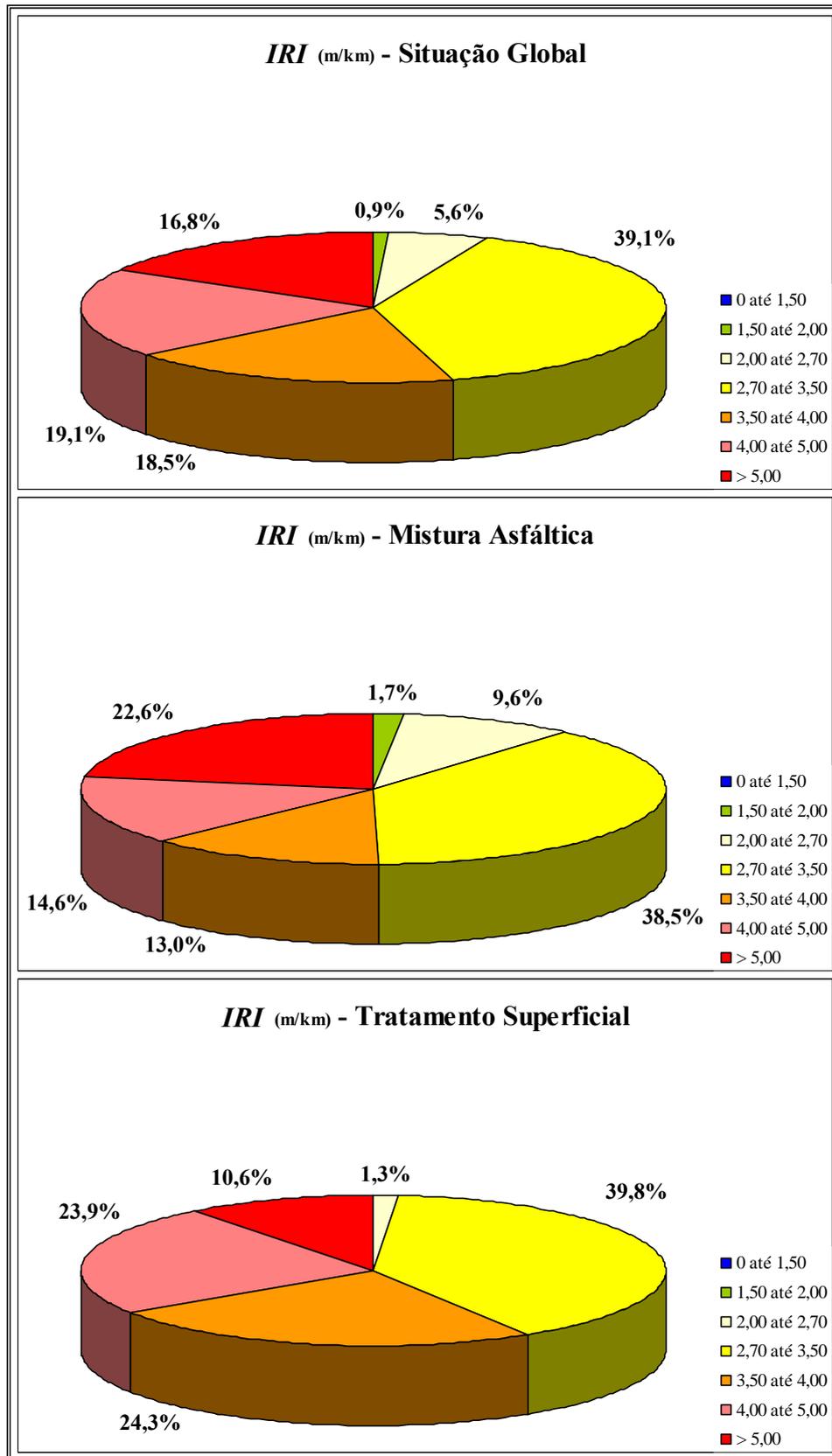


Figura 52: Distribuição de frequência de *IRI* na malha rodoviária do Estado do Ceará.

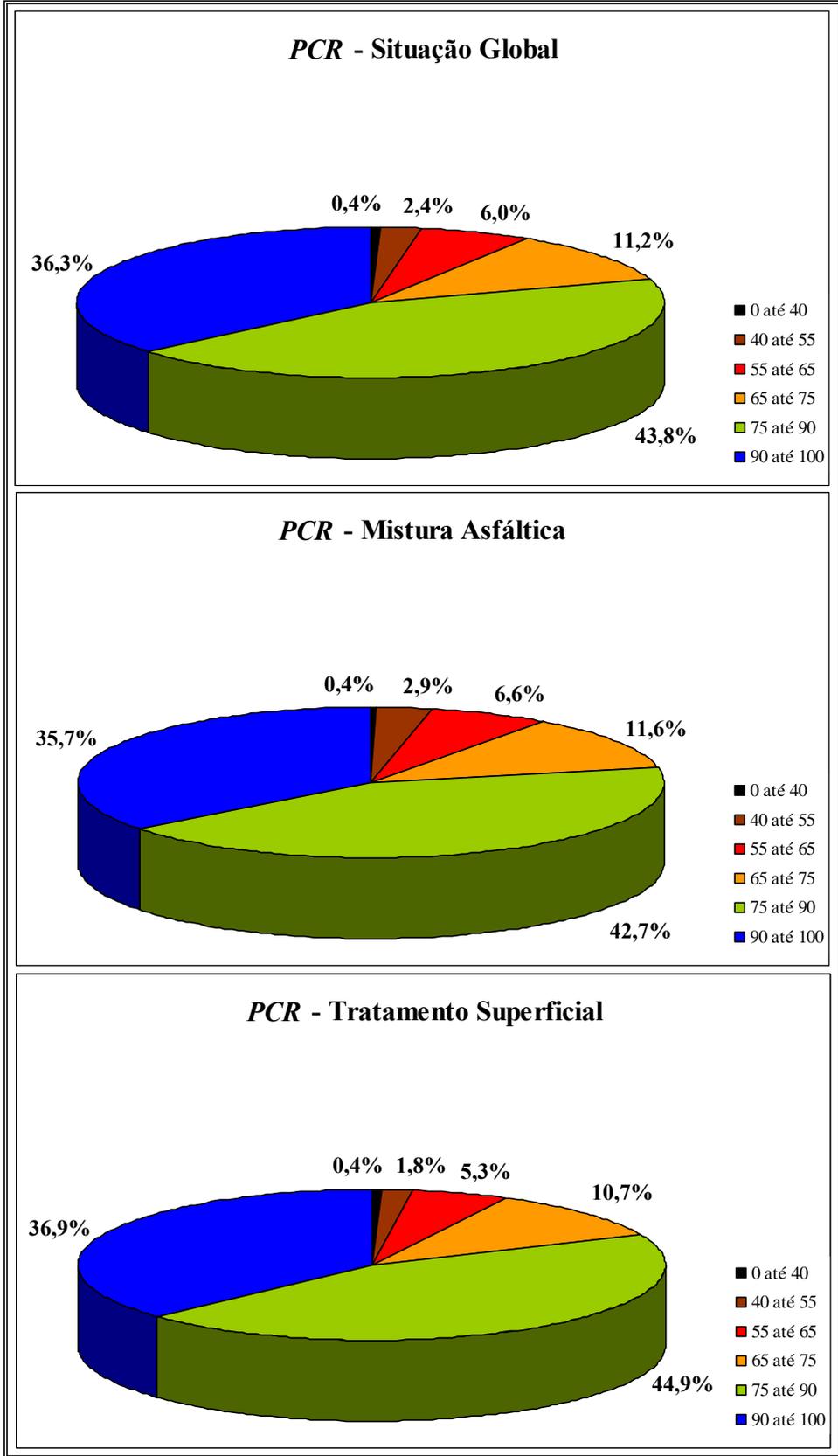


Figura 53: Distribuição de freqüência de PCR na malha rodoviária do Estado do Ceará.

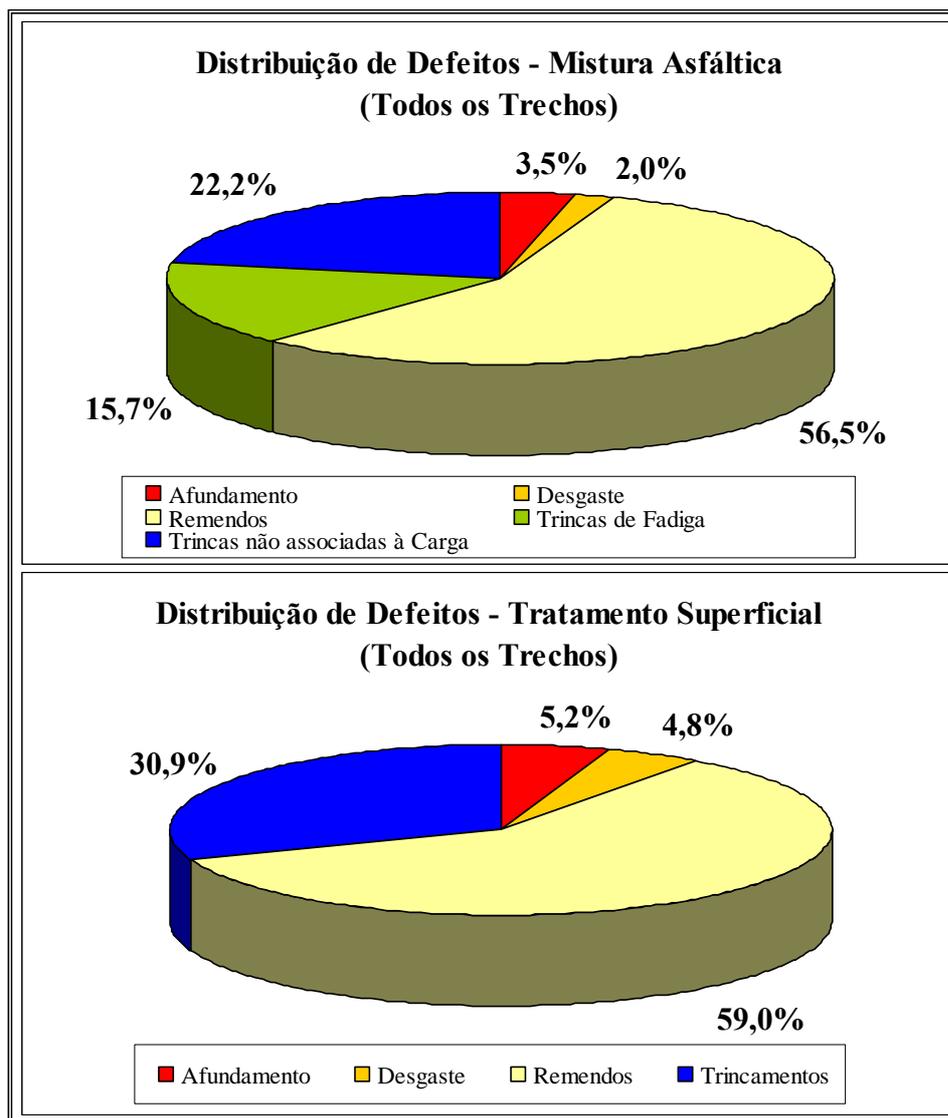


Figura 54: Distribuição de frequência de defeitos predominantes em pavimentos do Ceará.

Analisando os gráficos da Figura 54, observa-se que o principal defeito detectado em pavimentos (de acordo com metodologia do *PCR*) é a existência de remendos. O trincamento em pavimentos é o segundo tipo mais frequente de defeitos, certamente sendo ele o responsável pela necessidade de realização de remendos. Esses trincamentos não estão associados apenas às cargas de tráfego, mas também ao efeito do clima, repetindo-se o que também acontece no estado da Paraíba, onde as altas temperaturas agem nos pavimentos durante todo o ano, proporcionando o aceleração do processo de oxidação do ligante asfáltico. O revestimento mais frágil acaba por trincar em virtude das tensões geradas pelas oscilações térmicas diárias (essa variação pode chegar a 20°C em regiões semi-áridas). Em mistura asfáltica, as trincas por envelhecimento normalmente se propagam de cima para baixo

na camada (*top-down*), e sua forma, normalmente, é do tipo irregular com espaçamento maior que 0,50 m. Uma vez iniciado, o trincamento tende a propagar-se por toda a área coberta pelo revestimento (IPR-710, 2005).

Particularmente em tratamentos superficiais, a oxidação também acelera o processo de arracamento de agregados pela ação do tráfego, embora em menor escala no Ceará, pois os revestimentos ainda estavam bastante jovens.

Como esperado, problemas originados de afundamentos e desgaste da superfície do revestimento, mesmo sendo em menor escala, são mais freqüentes em pavimentos revestidos em Tratamento Superficiais que em Mistura Asfáltica.

Os problemas originados pela utilização de solos inadequados, observados no estado da Paraíba, não se repetem para a malha rodoviária do Ceará. Porém é necessário afirmar que a utilização de critérios mais rígidos para inspeção de pavimentos evitaria valores iniciais de *IRI* tão elevados. Em complemento, o aumento da irregularidade ao longo do tempo tem como principal contribuinte os remendos superficiais, cujo aparecimento é muito influenciado pelas patologias derivadas da ação do tráfego.

## 7.2 DIMENSIONAMENTO DE UNIDADES DE AMOSTRAGEM

O estabelecimento de Unidades de Amostragem (UAs) objetiva dar suporte à etapa de Avaliação e Monitoramento em Sistemas de Gerência de Pavimentos.

O estudo de UAs possibilita a análise do desempenho de todas as intervenções aplicadas ao pavimento ao longo do tempo.

Contudo, o dimensionamento de UAs pressupõe a existência de uma avaliação completa do trecho rodoviário analisado, permitindo analisar a variabilidade espacial da degradação do pavimento, explicando-se como todos os elementos (subleito, estrutura, tráfego, clima etc.) que interferem neste fenômeno agiram ao longo do tempo.

A ferramenta que proporciona esta análise é o Variograma, a qual permite uma representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço.

As variáveis de desempenho escolhidas para o dimensionamento de UAs foram as que contabilizaram problemas superficiais de pavimentos. No estado do Ceará o parâmetro *PCR* foi o utilizado, enquanto na Paraíba foi o *IGG*.

Nas seções seguintes são apresentados os resultados dos dimensionamentos de UAs realizados para os dois estados.

### 7.2.1 Dimensionamento de UA na Paraíba

Os trechos rodoviários do estado da Paraíba que tiveram UAs dimensionadas são apresentados na Tabela 17. Os variogramas e seus modelos são apresentados no Apêndice I desta tese. Estes modelos são válidos para o gráfico compreendido até a máxima variância de krigagem (*nugget effect* mais o *sill* – ver Capítulo 3).

Na mesma Tabela 17 é apresentada a quantidade final de Unidades de Amostragem obtida pelo número inteiro resultante da razão entre a extensão do trecho rodoviário e o alcance (extensão longitudinal da plataforma do pavimento em que os processos de degradação superficial possuem características semelhantes entre si). A extensão do Segmento Homogêneo (SH), onde a UA de 1km deve estar inserida (centralizada no SH), é, portanto, aproximadamente o alcance do variograma de *IGG*.

Os alcances verificados a partir dos variogramas variaram entre 1,76 km e 12,65 km. O único variograma indefinido (os dados existentes não permitiram definir modelo de variação espacial) foi o da PB-041, onde os segmentos homogêneos assumiram a mesma extensão das unidades de amostragem (1 km).

As médias dos valores observados ( $\bar{O}$ ) e dos valores estimados por krigagem ( $\bar{E}$ ) a partir do modelo do variograma foram praticamente as mesmas para todos os trechos rodoviários analisados (ver Apêndice I).

Como exemplo cita-se o trecho rodoviário da PB-238, em que a média dos valores observados ( $\bar{O}$ ) foi igual a 106,0 e dos valores estimados por krigagem ( $\bar{E}$ ) foi de 104,7.

Tabela 17: Dimensionamento de UAs, em função do *IGG*, para Rodovias da Paraíba.

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
PB-004	PB-004/005	15+100	28+100	13000	3600	04
	PB-004/007	28+100	46+900	18800		05
PB-018	PB-018/001	0+000	3+500	3500	1764	02
	PB-018/003	3+500	14+500	11000		06
	PB-018/005	14+500	16+300	1800		01
PB-025	PB-025/001	0+000	10+500	10500	5070	02
	PB-025/002	10+500	11+400	900		01
PB-041	PB-041/007	28+600	36+400	7800	ND*	08
PB-044	PB-044/005	14+300	20+400	6100	2632	03
	PB-044/007	20+400	23+600	3200		02
PB-054	PB-054/001	0+000	8+300	8300	1960	04
	PB-054/003	8+300	18+700	10400		05
PB-065	PB-065/001	0+000	8+900	8900	4158	02
PB-073	PB-073/001	0+000	11+500	11500	5750	02
	PB-073/003	11+500	21+800	10300		02
	PB-073/005	21+800	25+000	3200		01
	PB-073/007	25+000	54+300	29300		05
	PB-073/009	54+300	57+200	2900		01
	PB-073/011	57+200	68+100	10900		02
	PB-073/015	68+100	80+000	11900		02
	PB-073/017	80+000	82+400	2400	01	
	PB-073/019	82+400	97+800	15400	7200	02
	PB-073/021	97+800	109+400	11600	3510	04
	PB-073/023	109+400	113+200	3800		01
PB-079	PB-079/001	0+000	4+500	4500	9000	01
	PB-079/003	4+500	22+800	18300		02
	PB-079/005	22+800	35+200	12400		02
	PB-079/007	35+200	38+800	3600		01
PB-087	PB-087/007	16+900	37+600	20700	3600	06
PB-097	PB-097/001	0+000	8+000	8000	4514	02
	PB-097/003	8+000	18+300	10300		03
PB-105	PB-105/001	0+000	16+300	16300	7260	03
	PB-105/003	16+300	22+800	6500		01
	PB-105/005	22+800	26+100	3300		01
	PB-105/007	26+100	32+200	6100		01
	PB-105/009	32+200	35+200	3000		01

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 17</i>						
PBT-110	PBT-110/011	53+000	70+400	17400	6710	03
	PBT-110/013	70+400	83+200	12800		02
	PBT-110/015	83+200	85+000	1800		01
	PBT-110/017	85+000	87+200	2200		01
PB-111	PB-111/007	37+200	51+300	14100	2574	06
PB-148	PB-148/001	0+000	14+500	14500	6890	02
	PB-148/003	14+500	29+100	14600		02
PB-238	PB-238/001	0+000	20+000	20000	9940	02
PB-325	PB-325/001	0+000	12+300	12300	1875	07
	PB-148/003	12+300	18+300	6000		03
	PB-148/005	18+300	34+700	16400	12650	02
	PB-148/007	34+700	48+800	14100		02
	PB-148/009	48+800	56+800	8000		01
PB-325	PB-148/011	56+800	75+330	18+530	12650	01
PB-366	PB-366/011	67+600	77+600	10000	2200	05
	PB-366/013	77+600	85+700	8100		04
PB-393	PB-393/003	18+500	25+400	6900	2808	03
	PB-393/005	25+400	26+500	1100		01
PBT-405	PBT-405/001	0+000	24+130	24130	3634	07
PBT-408	PBT-408/001	0+000	5+600	5600	2070	03
	PBT-408/003	5+600	9+500	3900		02
PB-420	PB-420/001	0+000	6+300	6300	1860	04
	PB-420/003	6+300	11+900	5600		03
PBT-426	PBT-426/001	0+000	12+800	12800	6800	02
	PBT-426/003	12+800	34+300	21500		04

\* O Variograma foi indefinido, ou seja, não foi detectada dependência espacial, portanto as UAs se distribuem em toda a extensão do trecho com SHs de 1 km.

Apesar das médias dos valores krigados terem se aproximado da média dos valores medidos em campo, as análises por Validação Cruzada forneceram valores de Erro Médio Absoluto (EMA) altos (variando entre 9,6% e 76,0% do valor médio nos trechos – ver Apêndice I).

Outro fator importante é que a maioria dos variogramas apresentou valores do *nugget effect* (efeito pepita – elemento constituinte de modelos de variograma) bastante altos. Isto pode ser derivado de erros de medição do parâmetro de desempenho durante o monitoramento ou da variabilidade em pequena extensão não captada pela amostragem realizada. Na Figura 55 é

apresentado um variograma típico de *IGG* para a malha rodoviária da Paraíba, onde fica evidente a grande contribuição do *nugget effect* na variância de krigagem.

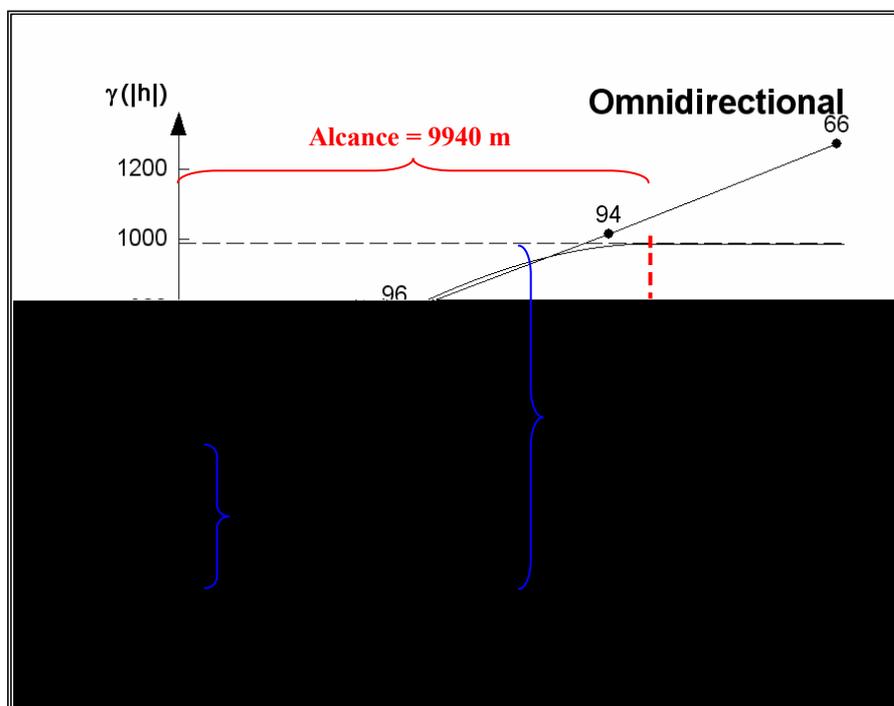


Figura 55: Representação típica do *Nugget Effect* na variância de krigagem de *IGG* para rodovias da Paraíba (PB-238).

O procedimento adotado para inferência de dados (krigagem) de *IGG* a partir de valores espaçados (definido pelos modelos dos variogramas) para o Estado da Paraíba acabou por suavizar os valores extremos, fator este que contribui para os altos *EMAs* mencionados anteriormente. Contudo, como a mensuração das médias de *IGG* não foi afetada pelo método de inferência, confirma-se a adequada aplicabilidade deste procedimento para análises em Sistemas de Gerência de Pavimentos, onde o que interessa é a condição média de trechos rodoviários. A aplicabilidade da geoestatística para análises do *IGG* em Projetos Rodoviários (especificamente para a malha rodoviária estadual da Paraíba) não pode ser cogitada justamente por não se apresentar eficiente no tratamento de eventos pontuais.

De acordo com o dimensionamento realizado, pode ser feita uma comparação de custos de monitoramentos de pavimentos realizados por métodos tradicionais e através da metodologia proposta.

Um plano de monitoramento tradicional (sugerido a empresas concessionárias de rodovias) prevê levantamentos de parâmetros de desempenho em toda a extensão da malha viária, via de regra pela seguinte aplicação (IPR-710/2005):

- Deflexão com FWD a cada 80 metros – anualmente;
- Irregularidade Longitudinal com conjunto de aparelhos Tipo Resposta em toda a extensão da rodovia – semestralmente;
- Levantamento Visual Contínuo (LVC) em toda a extensão da rodovia – trimestralmente; e
- Levantamento Objetivo (*ATR*, outros defeitos e cálculo do *IGG*) em toda a extensão da rodovia – semestralmente.

O plano de monitoramento proposto, chamado de “Otimização de Campanhas de Monitoramento”, consiste no levantamento de dados de parâmetros de desempenho nos três Segmentos Testemunha (ST) que compõe a Unidade de Amostragem (ver Figura 14) e Levantamento Visual Contínuo em toda a malha rodoviária, atendendo aos seguintes critérios:

- Deflexão com FWD nos três STs (100m cada) das UAs dimensionadas, espaçada em 20m – anualmente;
- Irregularidade Longitudinal com equipamento MERLIN nos três STs (100m cada) das UAs dimensionadas – semestralmente;
- LVC em toda a extensão da rodovia (metodologia do *PCR*) – trimestralmente; e
- Levantamento Objetivo (*ATR*, outros defeitos e cálculo do *IGG*) nos três STs (100m cada) das UAs dimensionadas – semestralmente.

A comparação de custos entre o “Plano de Monitoramento Tradicional” e o método de “Otimização de Campanhas de Monitoramento” para as rodovias estudadas na Paraíba está apresentada na Tabela 18. A adoção do método de Otimização de Campanhas de Monitoramento resultaria em uma economia de R\$ 377.200,00 por faixa de tráfego ao ano. Isto representa uma redução de 82,4% do custo do “Plano de Monitoramento Tradicional”. A extensão necessária para monitoramentos representa 4,1% do total.

Tabela 18: Comparação de custos entre o plano de monitoramento tradicional e otimizado para as rodovias estudadas na Paraíba\*.

Método de Monitoramento	Bacias de Deflexão FWD <sup>1</sup>	IRI (Tipo Resposta <sup>2</sup> )	IRI (MERLIN <sup>3</sup> )	Levantamento Objetivo <sup>4</sup>	LVC <sup>5</sup>	Totais
PMT**	125.400,00	18.810,00		250.800,00	62.700,00	457.710,00
OCM***	5.100,00		2.510,00	10.200,00	62.700,00	80.510,00

Observações:

\* Extensão total analisada no Estado da Paraíba foi de 627 km (custos contabilizados apenas em uma faixa da pista). O número total de UAs resultante dos dimensionamentos é de 85 ( $85 \times 3 \times 0,100 = 25,5$  km);

\*\* PMT = Plano de Monitoramento Tradicional;

\*\*\* OCM = Otimização de Campanhas de Monitoramento.

Valores típicos de Monitoramentos aplicados às Concessionárias de Rodovias no Rio Grande do Sul:

- 1) Levantamento de Bacias de Deflexão com FWD no valor de R\$ 200,00 / km (espaçamento de 40 m);
- 2) Levantamento de Irregularidade Longitudinal com conjunto Tipo Resposta no valor de R\$ 15,00 / km;
- 3) Levantamento de Irregularidade Longitudinal com equipamento MERLIN no valor de R\$ 50,00 / km;
- 4) Levantamento Objetivo no valor de R\$ 200,00 / km;
- 5) LVC no valor de R\$ 25,00 / km.

## 7.2.2 Dimensionamento de UA no Ceará

Em todos os trechos rodoviários estaduais do Ceará foram aplicados os procedimentos da Geoestatística para dimensionamento de UAs. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 19. Os variogramas e seus modelos ajustados são apresentados no Apêndice II desta tese. Estes modelos são válidos para o gráfico compreendido até a máxima variância de krigagem (*nugget effect* mais o *sill* – ver Capítulo 3).

A Tabela 19 apresenta também o número de Unidades de Amostragem necessário para cada trecho rodoviário, resultante da razão entre a sua extensão e o “alcance do modelo do seu variograma” (extensão longitudinal da plataforma do pavimento em que os processos de degradação superficial possuem características semelhantes entre si). A extensão do Segmento Homogêneo (SH), onde a UA de 1km deve estar inserida (centralizada no SH), é aproximadamente o alcance do variograma de PCR.

Tabela 19: Dimensionamento de Unidades de Amostragem para Rodovias do Ceará.

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
CE-025	025ECE0010	0+000	6+335	6335	3000	2
CE-025	025ECE0030	6+335	13+323	6988	3000	2
CE-025	025ECE0050	13+323	18+395	5072	3000	2
CE-040	040ECE0010D	0+000	6+940	6940	6710	1
CE-040	040ECE0030D	6+940	9+400	2460	6710	1
CE-040	040ECE0050D	9+400	13+694	4294	6710	1
CE-040	040ECE0070D	13+735	19+045	5310	6710	1
CE-040	040ECE0090D	19+045	22+914	3869	6710	1
CE-040	040ECE0110D	22+952	25+485	2533	6710	1
CE-040	040ECE0130	25+463	31+951	6488	6710	1
CE-040	040ECE0150	31+951	41+082	9131	6710	1
CE-040	040ECE0170	41+082	51+022	9940	6710	1
CE-040	040ECE0190	51+022	56+194	5172	6710	1
CE-040	040ECE0210	56+194	65+270	9076	6710	1
CE-040	040ECE0230	65+270	75+668	10398	6710	2
CE-040	040ECE0250	75+668	89+704	14036	6710	2
CE-040	040ECE0270	89+704	108+680	18976	6710	3
CE-040	040ECE0290	108+680	116+108	7428	6710	1
CE-040	040ECE0310	116+108	125+119	9011	6710	1
CE-040	040ECE0330	125+119	127+768	2649	6710	1
CE-040	040ECE0350	127+768	139+183	11415	6710	2
CE-060	060ECE0010D	0+000	3+838	3838	35260	1
CE-060	060ECE0030D	3+838	7+644	3806	35260	1
CE-060	060ECE0050D	7+644	13+453	5809	35260	1
CE-060	060ECE0070D	13+463	19+720	6257	35260	1
CE-060	060ECE0090D	19+720	21+670	1950	35260	1
CE-060	060ECE0110	21+694	26+961	5267	35260	1
CE-060	060ECE0130	26+961	42+826	15865	35260	1
CE-060	060ECE0150	42+826	49+747	6921	35260	1
CE-060	060ECE0170D	49+747	52+195	2448	35260	1
CE-060	060ECE0190	52+195	62+787	10592	35260	1
CE-060	060ECE0210	62+787	73+463	10676	35260	1
CE-060	060ECE0230	73+463	75+308	1845	35260	1
CE-060	060ECE0250	75+308	87+760	12452	35260	1
CE-060	060ECE0270	87+760	99+583	11823	35260	1
CE-060	060ECE0290	99+583	109+811	10228	35260	1
CE-060	060ECE0310	109+811	141+155	31344	35260	1
CE-060	060ECE0330	141+155	158+676	17521	35260	1
CE-060	060ECE0350	158+676	168+036	9360	35260	1
CE-060	060ECE0370	168+036	198+220	30184	35260	1
CE-060	060ECE0390	198+220	248+763	50543	35260	1
CE-060	060ECE0430	262+315	284+823	22508	35260	1
CE-060	060ECE0450	284+823	289+047	4224	35260	1
CE-060	060ECE0470	289+047	306+445	17398	35260	1
CE-060	060ECE0490	306+445	313+493	7048	35260	1
CE-060	060ECE0510	313+493	335+069	21576	35260	1
CE-060	060ECE0530	335+069	337+096	2027	35260	1
CE-060	060ECE0550	337+096	366+636	29540	35260	1
CE-060	060ECE0570	366+636	368+963	2327	35260	1
CE-060	060ECE0590	368+963	375+019	6056	35260	1
CE-060	060ECE0610	375+019	379+420	4401	35260	1
CE-060	060ECE0630	379+420	403+835	24415	35260	1
CE-060	060ECE0650	403+835	420+855	17020	35260	1

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-060	060ECE0670	420+855	436+982	16127	35260	1
CE-060	060ECE0710	446+982	457+542	10560	35260	1
CE-060	060ECE0730	457+542	463+987	6445	35260	1
CE-060	060ECE0790	492+101	509+254	17153	35260	1
CE-060	060ECE0810	509+254	519+302	10048	35260	1
CE-060	060ECE0830D	519+302	529+077	9775	35260	1
CE-060	060ECE0850	529+137	538+145	9008	35260	1
CE-060	060ECE0870	538+145	567+422	29277	35260	1
CE-060	060ECE0890	567+422	569+362	1940	35260	1
CE-060	060ECE0910	569+362	583+239	13877	35260	1
CE-065	065ECE0010D	0+000	5+661	5661	26040	1
CE-065	065ECE0030D	5+661	9+225	3564	26040	1
CE-065	065ECE0050D	9+258	16+093	6835	26040	1
CE-065	065ECE0070D	16+119	18+108	1989	26040	1
CE-065	065ECE0090	18+108	26+672	8564	26040	1
CE-065	065ECE0110	26+672	44+769	18097	26040	1
CE-065	065ECE0130	44+769	61+712	16943	26040	1
CE-065	065ECE0150	61+712	84+429	22717	26040	1
CE-065	065ECE0170	84+429	90+982	6553	26040	1
CE-065	065ECE0190	90+982	94+624	3642	26040	1
CE-065	065ECE0210	94+624	103+243	8619	26040	1
CE-065	065ECE0230	103+243	121+803	18560	26040	1
CE-085	085ECE0010D	0+000	2+903	2903	17500	1
CE-085	085ECE0030D	2+963	4+446	1483	17500	1
CE-085	085ECE0050	4+475	6+431	1956	17500	1
CE-085	085ECE0070	6+431	21+159	14728	17500	1
CE-085	085ECE0090	21+159	29+496	8337	17500	1
CE-085	085ECE0110	29+496	33+888	4392	17500	1
CE-085	085ECE0130	33+888	40+516	6628	17500	1
CE-085	085ECE0150	40+516	49+174	8658	17500	1
CE-085	085ECE0170	49+174	63+465	14291	17500	1
CE-085	085ECE0190	63+465	72+239	8774	17500	1
CE-085	085ECE0210	72+239	77+277	5038	17500	1
CE-085	085ECE0230	77+277	93+306	16029	17500	1
CE-085	085ECE0250	93+306	101+101	7795	17500	1
CE-085	085ECE0270	101+101	108+195	7094	17500	1
CE-085	085ECE0280	108+195	127+338	19143	17500	1
CE-085	085ECE0350	191+038	201+085	10047	30750	1
CE-085	085ECE0370	201+085	217+547	16462	30750	1
CE-085	085ECE0390	217+547	225+405	7858	30750	1
CE-085	085ECE0410	225+405	232+805	7400	30750	1
CE-085	085ECE0430	232+805	258+218	25413	30750	1
CE-085	085ECE0510	316+922	319+750	2828	36000	1

<b>Rodovia</b>	<b>Trecho Rodoviário</b>	<b>km Inicial</b>	<b>km Final</b>	<b>Extensão (m)</b>	<b>Alcance do Variograma (m)</b>	<b>Nº de UAs</b>
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-138	138ECE0020	0+702	14+703	14001	4845	3
CE-138	138ECE0070	64+779	73+559	8780	AM**	1
CE-138	138ECE0090	73+559	86+712	13153	AM**	1
CE-138	138ECE0110	86+712	128+968	42256	AM**	1
CE-138	138ECE0130	128+968	134+259	5291	AM**	1
CE-138	138ECE0210	168+259	187+129	18870	5325	4
CE-138	138ECE0230	187+129	194+069	6940	5325	1
CE-138	138ECE0250	194+069	207+587	13518	5325	3
CE-138	138ECE0270	217+715	224+339	6624	5325	1
CE-138	138ECE0290	224+339	254+339	30000	5325	6
CE-138	138ECE0330	268+339	286+509	18170	5325	3
CE-151	151ECE0030	12+000	21+299	9299	2100	4
CE-152	152ECE0050	25+9663.68	567.38	3.24	11.46 reW* n67.38	3.24
					11.2	-11.46 refQ1 1 1 scn152.4 578.9

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-176	176ECE0330	409+375	412+083	2708	51000	1
CE-176	176ECE0350	412+083	455+990	43907	51000	1
CE-176	176ECE0370	455+990	487+165	31175	51000	1
CE-176	176ECE0390	487+165	523+378	36213	51000	1
CE-176	176ECE0410	525+266	544+761	19495	51000	1
CE-176	176ECE0430	544+761	566+217	21456	51000	1
CE-178	178ECE0010	0+000	25+836	25836	45080	1
CE-178	178ECE0030	25+836	36+879	11043	45080	1
CE-178	178ECE0050	36+879	40+693	3814	45080	1
CE-178	178ECE0070	40+693	69+797	29104	45080	1
CE-178	178ECE0090	69+797	88+223	18426	45080	1
CE-178	178ECE0110	88+223	103+030	14807	45080	1
CE-179	179ECE0050	16+428	32+886	16458	7000	2
CE-179	179ECE0070	32+886	40+588	7702	7000	1
CE-179	179ECE0230	114+646	139+147	24501	10400	2
CE-183	183ECE0010	0+000	5+902	5902	1280	5
CE-183	183ECE0030	5+902	26+294	20392	1280	16
CE-183	183ECE0050	26+294	35+743	9449	1280	7
CE-183	183ECE0070	35+743	42+386	6643	1280	5
CE-183	183ECE0090	42+386	53+203	10817	1280	8
CE-187	187ECE0210	112+189	142+029	29840	25200	1
CE-187	187ECE0230	142+029	159+690	17661	25200	1
CE-187	187ECE0250	159+690	169+755	10065	25200	1
CE-187	187ECE0270	169+755	182+664	12909	25200	1
CE-187	187ECE0290	182+664	189+691	7027	25200	1
CE-187	187ECE0310	189+691	205+967	16276	25200	1
CE-187	187ECE0330	205+967	231+679	25712	25200	1
CE-187	187ECE0350	231+679	239+469	7790	25200	1
CE-187	187ECE0370	239+469	256+836	17367	25200	1
CE-187	187ECE0390	256+836	287+780	30944	25200	1
CE-187	187ECE0410	287+780	294+172	6392	25200	1
CE-187	187ECE0420	294+172	312+713	18541	25200	1
CE-187	187ECE0430	312+713	315+086	2373	25200	1
CE-187	187ECE0440	315+086	346+157	31071	25200	1
CE-187	187ECE0450	346+157	348+553	2396	25200	1
CE-187	187ECE0470	348+553	395+677	47124	25200	2
CE-187	187ECE0490	395+677	427+993	32316	25200	1
CE-187	187ECE0510	427+993	446+815	18822	25200	1
CE-187	187ECE0530	446+815	483+248	36433	25200	1
CE-187	187ECE0670	636+856	663+162	26306	AM**	1
CE-189	189ECE0070	48+659	82+023	33364	5250	6
CE-216	216ECE0010	0+000	7+471	7471	2135	3
CE-232	232ECE0210	121+952	152+397	30445	AM**	1
CE-232	232ECE0230	152+397	160+889	8492	AM**	1
CE-240	240ECE0010	0+000	4+000	4000	ND*	4
CE-241	241ECE0010	0+000	14+515	14515	AM**	1
CE-243	243ECE0010	0+000	10+686	10686	3050	4
CE-251	251ECE0070	27+800	32+372	4572	1080	4
CE-251	251ECE0090	32+372	34+947	2575	1080	2
CE-253	253ECE0010	0+000	3+316	3316	AM**	1
CE-253	253ECE0030	3+316	12+789	9473	AM**	1
CE-253	253ECE0050	12+789	22+436	9647	AM**	1
CE-253	253ECE0070	22+436	37+654	15218	AM**	1
CE-253	253ECE0210	111+702	116+012	4310	ND*	4

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-253	253ECE0490	380+358	390+889	10531	1650	6
CE-253	253ECE0510	390+889	411+237	20348	1650	12
CE-257	257ECE0050	15+000	19+244	4244	AM**	1
CE-257	257ECE0170	100+444	131+942	31498	26250	1
CE-257	257ECE0190	131+942	155+997	24055	26250	1
CE-257	257ECE0210	155+997	164+337	8340	26250	1
CE-257	257ECE0230	164+337	206+789	42452	26250	2
CE-257	257ECE0250	206+789	210+239	3450	26250	1
CE-257	257ECE0270	210+239	237+835	27596	26250	1
CE-257	257ECE0290	237+835	272+092	34257	26250	1
CE-261	261ECE0010	0+000	12+539	12539	AM**	1
CE-261	261ECE0030	12+539	18+028	5489	AM**	1
CE-261	261ECE0050	18+039	23+575	5536	AM**	1
CE-261	261ECE0070	23+575	33+730	10155	AM**	1
CE-261	261ECE0090	33+730	42+171	8441	AM**	1
CE-263	263ECE0010	0+000	11+459	11459	2340	5
CE-263	263ECE0030	11+459	30+574	19115	2340	8
CE-265	265ECE0070	41+600	47+063	5463	AM**	1
CE-265	265ECE0110	51+163	74+911	23748	14400	2
CE-265	265ECE0130	74+911	79+578	4667	14400	1
CE-265	265ECE0150	79+578	111+246	31668	14400	2
CE-265	265ECE0170	111+246	124+523	13277	14400	1
CE-265	265ECE0190	124+523	152+730	28207	14400	2
CE-265	265ECE0210	152+730	175+780	23050	14400	2
CE-265	265ECE0330	293+580	323+719	30139	AM**	1
CE-265	265ECE0350	323+719	353+931	30212	AM**	1
CE-265	265ECE0370	353+931	384+999	31068	4000	8
CE-265	265ECE0390	384+999	399+034	14035	4000	4
CE-266	266ECE0310	319+200	346+768	27568	4400	6
CE-269	269ECE0030	15+000	43+125	28125	ND*	28
CE-269	269ECE0070	55+125	61+321	6196	AM**	1
CE-269	269ECE0090	61+321	79+532	18211	AM**	1
CE-275	275ECE0010	0+000	25+132	25132	3100	8
CE-275	275ECE0050	25+132	34+057	8925	3100	3
CE-277	277ECE0010	0+000	34+558	34558	1650	21
CE-277	277ECE0190	151+758	166+758	15000	AM**	1
CE-282	282ECE0070	56+100	68+825	12725	1060	12
CE-282	282ECE0110	78+946	95+322	16376	1530	11
CE-282	282ECE0130	95+322	106+691	11369	1530	7
CE-284	284ECE0030	10+000	20+452	10452	31000	1
CE-284	284ECE0050	20+452	24+594	4142	31000	1
CE-284	284ECE0090	44+594	75+310	30716	31000	1
CE-284	284ECE0130	97+310	100+996	3686	31000	1
CE-284	284ECE0150	100+996	136+524	35528	31000	1
CE-284	284ECE0170	136+524	142+139	5615	31000	1
CE-284	284ECE0190	142+139	150+244	8105	31000	1
CE-286	286ECE0030	8+000	13+091	5091	ND*	5
CE-288	288ECE0010	0+000	26+613	26613	11440	2
CE-292	292ECE0010D	0+000	6+8161	269.82 137.7203	Tm0 Tc( )TjETq2( )TjEI403.8 135.38 1403.852	

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-292	292ECE0110	91+614	112+160	20546	2700	8
CE-292	292ECE0130	112+160	145+179	33019	2700	12
CE-292	292ECE0150	145+179	154+149	8970	2700	3
CE-293	293ECE0010	0+000	9+675	9675	4500	2
CE-293	293ECE0030	9+675	14+872	5197	4500	1
CE-293	293ECE0050	14+872	29+252	14380	4500	3
CE-293	293ECE0070	29+252	50+704	21452	4500	5
CE-293	293ECE0090	50+704	61+749	11045	4500	2
CE-313	313ECE0130	120+847	125+221	4374	AM**	1
CE-321	321ECE0010	0+000	25+962	25962	AM**	1
CE-321	321ECE0050	36+493	45+993	9500	AM**	1
CE-323	323ECE0010	0+000	12+805	12805	ND*	13
CE-327	327ECE0010	0+000	26+855	26855	AM**	1
CE-327	327ECE0030	26+855	34+635	7780	AM**	1
CE-329	329ECE0010	0+000	7+471	7471	ND*	7
CE-329	329ECE0070	27+364	41+062	13698	AM**	1
CE-329	329ECE0090	41+062	55+920	14858	ND*	15
CE-341	341ECE0010	0+000	11+561	11561	AM**	1
CE-341	341ECE0030	11+561	15+995	4434	AM**	1
CE-341	341ECE0050	15+995	28+560	12565	AM**	1
CE-341	341ECE0070	28+560	48+240	19680	AM**	1
CE-341	341ECE0110	49+463	62+309	12846	ND*	13
CE-341	341ECE0130	62+309	77+984	15675	AM**	1
CE-341	341ECE0150	77+984	89+651	11667	ND*	12
CE-346	346ECE0030	7+322	13+684	6362	ND*	6
CE-346	346ECE0070	16+304	19+916	3612	AM**	1
CE-346	346ECE0090	19+916	24+856	4940	AM**	1
CE-348	348ECE0070	44+000	48+072	4072	AM**	1
CE-348	348ECE0110	51+215	57+268	6053	AM**	1
CE-348	348ECE0130	57+268	59+347	2079	1500	1
CE-348	348ECE0150	59+347	68+142	8795	1500	6
CE-348	348ECE0170	68+142	76+703	8561	1500	6
CE-350	350ECE0050	14+557	27+707	13150	AM**	1
CE-351	351ECE0010	0+000	10+218	10218	AM**	1
CE-352	352ECE0010	0+000	1+690	1690	AM**	1
CE-352	352ECE0030	1+690	6+712	5022	ND*	5
CE-354	354ECE0150	88+814	109+645	20831	1080	19
CE-354	354ECE0170	109+645	123+435	13790	1080	13
CE-354	354ECE0190	123+435	158+061	34626	1080	32
CE-354	354ECE0210	158+061	181+522	23461	1080	22
CE-354	354ECE0250	181+522	187+598	6076	1080	6
CE-354	354ECE0270	187+598	195+964	8366	1080	8
CE-354	354ECE0410	268+069	282+821	14752	1560	9
CE-354	354ECE0530	321+742	336+221	14479	12000	1
CE-354	354ECE0550	336+221	351+931	15710	12000	1
CE-356	356ECE0010	0+000	8+896	8896	4800	2
CE-356	356ECE0050	12+538	27+926	15388	4800	3
CE-356	356ECE0070	27+926	34+350	6424	4800	1
CE-358	358ECE0010	0+000	4+385	4385	1800	2
CE-358	358ECE0030	4+385	16+395	12010	1800	7
CE-358	358ECE0050	16+395	27+395	11000	1800	6
CE-359	359ECE0010	0+000	22+612	22612	AM**	1
CE-359	359ECE0030	22+612	31+817	9205	AM**	1
CE-359	359ECE0050	31+817	47+458	15641	AM**	1

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-359	359ECE0070	47+458	66+323	18865	AM**	1
CE-359	359ECE0090	66+323	91+433	25110	AM**	1
CE-359	359ECE0110	91+433	93+020	1587	AM**	1
CE-359	359ECE0130	93+020	98+915	5895	AM**	1
CE-362	362ECE0030	2+828	19+483	16655	17071	1
CE-362	362ECE0050	19+483	42+875	23392	17071	1
CE-362	362ECE0070	42+875	54+952	12077	17071	1
CE-362	362ECE0090	54+952	78+940	23988	17071	1
CE-362	362ECE0110	78+940	97+810	18870	17071	1
CE-362	362ECE0190	113+410	127+480	14070	12800	1
CE-362	362ECE0210	127+480	134+005	6525	12800	1
CE-362	362ECE0230	134+005	144+791	10786	12800	1
CE-362	362ECE0250	145+626	164+516	18890	12800	1
CE-362	362ECE0270	164+516	190+801	26285	12800	2
CE-363	363ECE0050	38+224	67+527	29303	2000	15
CE-363	363ECE0070	67+527	78+060	10533	AM**	1
CE-363	363ECE0110	86+267	125+813	39546	AM**	1
CE-364	364ECE0010	0+000	10+400	10400	32000	1
CE-364	364ECE0030	10+400	38+646	28246	32000	1
CE-364	364ECE0050	38+646	53+758	15112	32000	1
CE-364	364ECE0070	53+758	63+388	9630	32000	1
CE-364	364ECE0090	63+388	66+166	2778	32000	1
CE-364	364ECE0110	66+166	90+245	24079	32000	1
CE-366	366ECE0010	0+000	25+167	25167	AM**	1
CE-366	366ECE0030	25+167	32+917	7750	AM**	1
CE-366	366ECE0050	32+917	37+687	4770	AM**	1
CE-366	366ECE0070	37+687	47+788	10101	AM**	1
CE-366	366ECE0090	47+788	74+496	26708	AM**	1
CE-366	366ECE0190	162+346	188+871	26525	1025	26
CE-368	368ECE0010	0+000	41+083	41083	1260	33
CE-371	371ECE0010	0+000	3+642	3642	1716	2
CE-371	371ECE0030	3+642	6+283	2641	1716	2
CE-371	371ECE0050	6+283	10+613	4330	1716	3
CE-371	371ECE0090	30+613	33+987	3374	AM**	1
CE-371	371ECE0130	48+987	59+393	10406	3080	3
CE-371	371ECE0230	111+793	113+150	1357	7000	1
CE-371	371ECE0250	113+150	136+702	23552	7000	3
CE-371	371ECE0270	136+702	156+137	19435	7000	3
CE-371	371ECE0290	156+137	189+096	32959	7000	5
CE-371	371ECE0310	189+096	225+496	36400	7000	5
CE-371	371ECE0330	225+496	240+913	15417	7000	2
CE-371	371ECE0350	240+913	250+496	9583	7000	1
CE-371	371ECE0370	250+496	269+541	19045	7000	3
CE-371	371ECE0390	269+541	284+641	15100	7000	2
CE-371	371ECE0450	327+668	349+154	21486	1500	14
CE-371	371ECE0570	424+459	451+142	26683	10080	3
CE-371	371ECE0590	451+142	476+508	25366	10080	3
CE-371	371ECE0610	476+508	508+377	31869	10080	3
CE-375	375ECE0050	55+600	71+915	16315	8200	2
CE-375	375ECE0110	80+298	99+728	19430	9200	2
CE-375	375ECE0120	99+728	110+593	10865	9200	1
CE-375	375ECE0150	114+279	134+171	19892	9200	2
CE-375	375ECE0170	134+171	150+487	16316	9200	2
CE-377	377ECE0010	0+000	11+120	11120	1120	10

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-377	377ECE0030	11+120	29+435	18315	1120	16
CE-377	377ECE0050	29+435	36+037	6602	1120	6
CE-377	377ECE0070	36+037	40+845	4808	1120	4
CE-377	377ECE0090	40+845	58+945	18100	1120	16
CE-377	377ECE0130	69+004	76+267	7263	1200	6
CE-377	377ECE0150	76+267	86+359	10092	1200	8
CE-384	384ECE0010	0+000	18+894	18894	1200	16
CE-384	384ECE0030	18+894	29+767	10873	1200	9
CE-384	384ECE0050	29+767	44+297	14530	1200	12
CE-386	386ECE0010	0+000	19+200	19200	7020	3
CE-386	386ECE0030	19+200	43+618	24418	7020	3
CE-386	386ECE0050	43+618	59+117	15499	7020	2
CE-386	386ECE0090	70+506	72+544	2038	AM**	1
CE-388	388ECE0030	26+000	39+458	13458	MA***	13
CE-393	393ECE0010	0+000	5+426	5426	2400	2
CE-393	393ECE0030	5+426	7+706	2280	2400	1
CE-393	393ECE0070	12+903	21+035	8132	2400	3
CE-397	397ECE0130	48+579	54+476	5897	1050	6
CE-397	397ECE0170	60+776	73+769	12993	1050	12
CE-422	422ECE0010	0+000	4+101	4101	AM**	1
CE-422	422ECE0030	4+101	11+247	7146	AM**	1
CE-422	422ECE0050	11+247	20+153	8906	AM**	1
CE-423	423ECE0010	0+000	8+000	8000	1220	7
CE-426	426ECE0010	0+000	9+120	9120	AM**	1
CE-434	434ECE0010	0+000	40+279	40279	AM**	1
CE-440	440ECE0010	0+000	7+378	7378	ND*	7
CE-440	440ECE0030	7+378	24+741	17363	ND*	17
CE-452	452ECE0010	0+000	3+256	3256	3309	1
CE-452	452ECE0030	3+256	6+479	3223	3309	1
CE-453	453ECE0010	0+000	9+163	9163	1450	6
CE-454	454ECE0030	1+956	13+135	11179	5115	2
CE-455	455ECE0010	0+000	19+754	19754	5925	3
CE-456	456ECE0010	0+000	15+754	15754	AM**	1
CE-456	456ECE0030	15+754	44+505	28751	AM**	1
CE-456	456ECE0050	44+505	57+251	12746	AM**	1
CE-469	469ECE0010	0+000	21+008	21008	AM**	1
CE-481	481ECE0010	0+000	12+918	12918	AM**	1
CE-481	481ECE0030	12+918	16+242	3324	AM**	1
CE-492	492ECE0010	0+000	8+151	8151	1380	6
CE-494	494ECE0010	0+000	16+709	16709	AM**	1
CE-501	501ECE0010D	0+000	5+000	5000	AM**	1
CE-502	502ECE0010	0+000	0+000	0+000	AM**	1
					1280	3

Rodovia	Trecho Rodoviário	km Inicial	km Final	Extensão (m)	Alcance do Variograma (m)	Nº de UAs
<i>Continuação da Tabela 19</i>						
CE-515	515ACE0010	0+000	3+002	3002	ND*	3
CE-516	516ACE0010	0+000	1+669	1669	ND*	2
CE-517	517ACE0010	0+000	3+558	3558	AM**	1
CE-518	518ACE0010	0+000	0+606	606	ND*	1
CE-519	519ACE0010	0+000	4+383	4383	AM**	1
CE-520	520ACE0010	0+000	2+784	2784	AM**	1
CE-521	521ACE0010	0+000	3+124	3124	AM**	1
CE-522	522ACE0010	0+000	0+885	885	ND*	1
CE-523	523ACE0010	0+000	1+013	1013	AM**	1
CE-524	524ACE0010	0+000	5+559	5559	ND*	6
CE-525	525ACE0010	0+000	3+176	3176	AM**	1
CE-526	526ACE0010	0+000	0+987	987	ND*	1
CE-527	527ACE0010	0+000	1+870	1870	ND*	2
CE-528	528ACE0010	0+000	1+771	1771	ND*	2
CE-529	529ACE0010	0+000	0+989	989	AM**	1
CE-530	530ACE0010	0+000	4+465	4465	1620	3
CE-531	531ACE0010	0+000	4+252	4252	1600	3
CE-532	532ACE0010	0+000	2+082	2082	AM**	1
CE-533	533ACE0010	0+000	4+893	4893	AM**	1
CE-534	534ACE0010	0+000	2+717	2717	ND*	3
CE-535	535ACE0010	0+000	7+949	7949	AM**	1
CE-536	536ACE0010	0+000	2+546	2546	AM**	1
CE-537	537ACE0010	0+000	1+842	1842	AM**	1
CE-538	538ACE0010	0+000	3+893	3893	ND*	4
CE-539	539ACE0010	0+000	1+043	1043	ND*	1
CE-540	540ACE0010	0+000	2+251	2251	AM**	1
CE-544	544ACE0010	0+000	5+133	5133	AM**	1
CE-545	545ACE0010	0+000	0+941	941	AM**	1
CE-546	546ACE0010	0+000	5+728	5728	AM**	1
CE-547	547ACE0010	0+000	0+518	518	AM**	1
CE-548	548ACE0010	0+000	0+210	210	AM**	1
CE-549	549ACE0010	0+000	6+261	6261	AM**	1
CE-550	550ACE0010	0+000	1+391	1391	AM**	1
CE-551	551ACE0010	0+000	1+265	1265	ND*	1
CE-552	552ACE0010	0+000	12+247	12247	AM**	1

\* O Variograma foi indefinido devido a não detecção de dependência espacial ou pelo fato do trecho rodoviário ser bastante curto. Portanto, as UAs se distribuem em toda a extensão do trecho com SHs de 1 km;

\*\* Trecho Rodoviário com Alcance Máximo, pois os valores medidos de *PCR* são praticamente iguais em todo o trecho rodoviário, portanto o SH tem a sua extensão, com a UA de 1km localizada no ponto médio;

\*\*\* Alcance menor que 1km. Como o comprimento mínimo de SHs foi estabelecido em 1km, então os mesmos terão a mesma extensão das UAs (1km).

Os alcances verificados a partir dos variogramas variaram entre 1,03 km e 51,00 km. Trinta trechos rodoviários tiveram variogramas indefinidos; em 15 deles os dados existentes de *PCR* não permitiram definir modelo de variação espacial e nos outros 15 a extensão dos trechos era bastante curta, o que também impossibilitou a avaliação (todos eles eram anéis rodoviários). As médias dos valores observados ( $\bar{O}$ ) e dos valores estimados por krigagem ( $\bar{E}$ ) a partir do modelo do variograma foram praticamente as mesmas para todos os trechos rodoviários

analisados (entre os trechos rodoviários 187ECE0210 e 187ECE0530 o  $\bar{O}$  e o  $\bar{E}$  foram 83,1; os demais resultados encontram-se no Apêndice II).

As análises por Validação Cruzada forneceram valores de Erro Médio Absoluto (*EMA*) (ver Apêndice II) bastante baixos (variando entre 0,6% e 19,7% do valor médio nos trechos). Apenas em 02 dos 83 modelos de variograma para krigagem elaborados, o *EMA* foi acima do intervalo anterior (aproximadamente 30% da média do *PCR*). Ainda, mais da metade dos modelos elaborados resultaram em *EMA* abaixo de 10% da média do *PCR* no trecho.

Igualmente ao verificado nos variogramas para *IGG* na Paraíba, os valores do *nugget effect* (efeito pepita) foram altos. Conforme dito na seção anterior, isto pode ser derivado de erros de medição do parâmetro de desempenho durante o monitoramento ou da variabilidade em pequena extensão não captada pela amostragem realizada. A Figura 56 apresenta um variograma típico de *PCR* para a malha rodoviária do Ceará, onde fica evidente a grande contribuição do *nugget effect* na variância de krigagem.

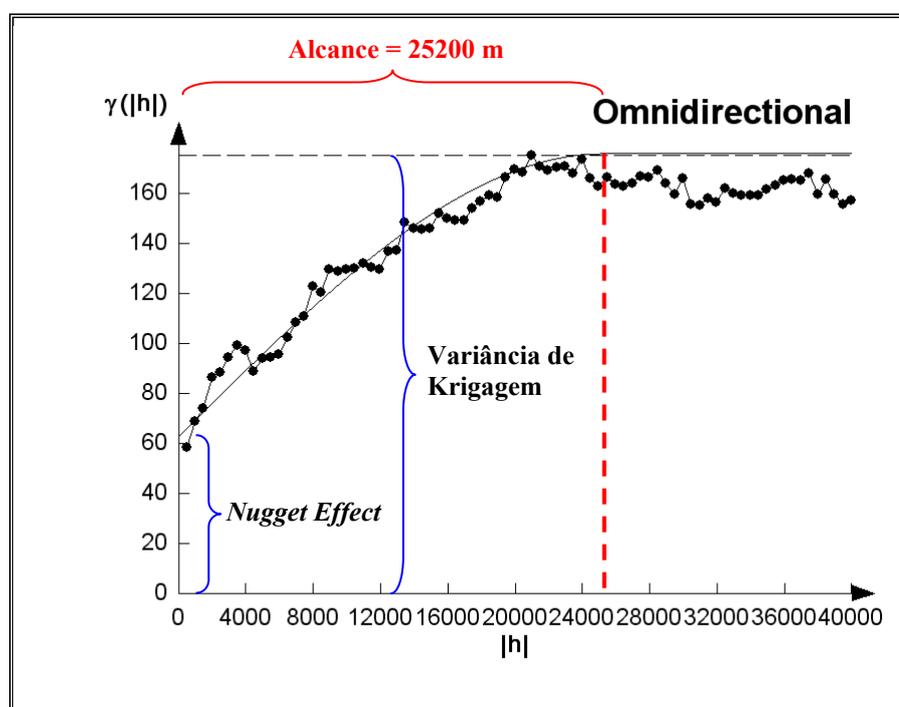


Figura 56: Representação típica do *Nugget Effect* na variância de krigagem para rodovias do Ceará (187ECE0210 a 187ECE0530).

O procedimento adotado para inferência de dados (krigagem) de *PCR* a partir de valores espaçados (definido pelos modelos dos variogramas) para o Estado do Ceará foi adequado, levando-se em consideração que as médias dos valores inferidos por krigagem foram bastante próximos a dos reais e que os valores de *EMA* obtidos foram relativamente baixos.

Neste contexto, o método de inferência por krigagem para valores de *PCR* no estado do Ceará tem adequada aplicabilidade tanto para análises em Sistemas de Gerência de Pavimentos quanto para análises de Projetos Rodoviários. Diferentemente ao que aconteceu com a inferência do *IGG* na Paraíba, a aplicação dos procedimentos da Geoestatística ao *PCR*, especificamente para a malha rodoviária estadual do Ceará, foi mais eficiente em não ocultar eventos pontuais nos pavimentos.

Uma comparação de custos de monitoramentos também foi realizada utilizando o “Plano de Monitoramento Tradicional” e o método de “Otimização de Campanhas de Monitoramento” (descritos anteriormente) para a malha rodoviária estadual do Ceará. Esta comparação está apresentada na Tabela 20, e a adoção do método de Otimização de Campanhas de Monitoramento resulta em uma economia de R\$ 2.468.360,00 por faixa ao ano, com uma redução dos custos com monitoramentos em quase 75%.

Tabela 20: Comparação de custos entre o plano de monitoramento tradicional e otimizado para a malha rodoviária estadual do Ceará\*.

Método de Monitoramento	Bacias de Deflexão FWD <sup>1</sup>	IRI (Tipo Resposta <sup>2</sup> )	IRI (MERLIN <sup>3</sup> )	Levantamento Objetivo <sup>4</sup>	LVC <sup>5</sup>	Totais
PMT**	1.190.400,00	178.560,00		2.380.800,00	595.200,00	3.344.960,00
OCM***	80.400,00		40.200,00	160.800,00	595.200,00	876.600,00

Observações:

\* Extensão total analisada no Estado do Ceará foi de 5.952 km (custos contabilizados apenas em um lado da pista). O número total de UAs resultante dos dimensionamentos é de 1340 (1340 x 3 x 0,100 = 402 km);

\*\* PMT = Plano de Monitoramento Tradicional;

\*\*\* OCM = Otimização de Campanhas de Monitoramento.

Valores típicos de Monitoramentos aplicados às Concessionárias de Rodovias no Rio Grande do Sul:

- 1) Levantamento de Bacias de Deflexão com FWD no valor de R\$ 200,00 / km (espaçamento de 40 m);
- 2) Levantamento de Irregularidade Longitudinal com conjunto Tipo Resposta no valor de R\$ 15,00 / km;
- 3) Levantamento de Irregularidade Longitudinal com equipamento MERLIN no valor de R\$ 50,00 / km;
- 4) Levantamento Objetivo no valor de R\$ 200,00 / km;
- 5) LVC no valor de R\$ 25,00 / km.

Aplicando o procedimento de Otimização de Campanhas de Monitoramento, é possível reduzir a extensão de monitoramentos para 6,8% da extensão total da malha.

Os resultados da aplicação da Geoestatística para o banco de dados de *IGG* (Paraíba) e *PCR* (Ceará) demonstraram que a teoria das Variáveis Regionalizadas é capaz de descrever quantitativamente a variação destes dois parâmetros no espaço.

O fato dos valores destes dois parâmetros dependerem de referência espacial (a localização geográfica influencia as características dos materiais de pavimentação, clima, tráfego etc.), a Geoestatística possibilita a eficaz descrição dos fenômenos de deterioração de pavimentos. Modelos de previsão que considerem os principais mecanismos que afetam o comportamento do pavimento ao longo do tempo, e, sobretudo, que sejam desenvolvidos especificamente para a região analisada, também são capazes de estimar a condição aproximada a real. Este princípio foi utilizado nesta pesquisa para o desenvolvimento dos modelos descritos a seguir.

### 7.3 PROPOSIÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA PAVIMENTOS DA MALHA RODOVIÁRIA DO NORDESTE

No Capítulo 6 desta tese foi previsto o desenvolvimento de modelos determinísticos empíricos, elaborados através de Regressão por Crescimento Exponencial, para os parâmetros de desempenho *IRI*, Deflexão e *IGG*, utilizando o Método de Estimativa Quase-Newton, e por Regressão Linear Múltipla, para o parâmetro *PCR*.

As variáveis independentes codificadas utilizadas nos modelos foram o *C* (correspondente à classificação climática da UNESCO: -1 / -0,5 / 0 / +0,5 / +1), o *S* (estabelecido por níveis do Número Estrutural Corrigido – *SNC*: -1 / 0 / +1) e o *N* (estabelecido por níveis do Número de Repetições do Eixo Padrão de 8,2tf calculado pelo método da AASHTO –  $N_{acum}$ : -1 / 0 / +1). Detalhes sobre os níveis codificados das variáveis para pavimentos revestidos em mistura asfáltica e em tratamento superficial podem ser observados na seção 6.2.2 desta tese.

Para cada modelo de previsão de desempenho elaborado foram realizadas as seguintes análises de consistências:

- Cálculo da Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP) entre valores estimados e reais;
- Avaliação do Scatterplot entre valores observados e previstos, e cálculo do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) dos modelos; e
- Avaliação do Nível de Significância Observado para cada parâmetro dos modelos.

A Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre as  $n$  previsões ( $y_{i_{previsto}}$ ) e observações ( $y_{i_{observado}}$ ), descrita percentualmente. O REMQP mede o erro típico da previsão do modelo (Spiegel, 1994), sendo estabelecido um patamar tolerável de 15% para as análises desta proposta de SGP. É calculada pela expressão:

$$REMQP = 100\% \times \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i_{observado}} - y_{i_{previsto}}}{y_{i_{observado}}} \right)^2} \quad (62)$$

O Scatterplot consiste em um gráfico de dispersão utilizado para analisar a simetria da curva ajustada entre valores observados e previstos pelos modelos, e estabelecer seus Coeficientes de Determinação ( $R^2$ ). O  $R^2$  é calculado pelo quadrado do coeficiente de correlação de Pearson (Spiegel, 1994). É uma medida da proporção da variabilidade no parâmetro de desempenho do modelo (variável independente), explicada pela variabilidade dos fatores utilizados no mesmo ( $C$ ,  $S$  e  $N$ ). Foi estabelecido um  $R^2$  mínimo tolerável de 0,7 para as análises dos modelos elaborados nesta proposta de SGP.

O processo de modelagem das variáveis de desempenho foi realizado utilizando o software Statistica<sup>4</sup>. Como resultados, o software forneceu os parâmetros do modelo de acordo com o tipo escolhido, o erro padrão associado a cada parâmetro do modelo, o respectivo valor de *t-Student* (razão entre cada parâmetro do modelo e seu erro padrão), com o seu grau de liberdade, e os correspondentes *p-levels* (níveis de significância observados).

O *p-level* deve ser comparado ao Nível de Significância adotado na análise ( $\alpha$  – risco do teste rejeitar a hipótese nula, sendo esta verdadeira). A norma DNER-PRO277/97 do DNIT

---

<sup>4</sup> STATISTICA for Windows, Release 4.3-B, é um produto da StatSoft, consistindo em um banco de softwares sobre estatística univariada e multivariada.

estabelece um nível de significância padrão de 10%, devido à grande variabilidade constatada em controles de serviços de pavimentação.

Portanto, caso o *p-level* de um determinado parâmetro do modelo seja menor que o nível de significância a ser comparado, este é dito como significativo na previsão de desempenho. O contrário indica que o parâmetro do modelo é pouco significativo e que contribui para os erros de estimativa (Hair *et al.*, 2005).

Nas seções seguintes são apresentados os critérios para a seleção dos dados utilizados na modelagem de cada parâmetro de desempenho, os resultados das modelagens, das análises de confiabilidade e a formalização dos modelos obtidos utilizando dados da malha rodoviária da Paraíba e do Ceará.

### 7.3.1 Modelos de Previsão de Desempenho Obtidos com Dados da Paraíba

Os parâmetros de desempenho que foram analisados na Paraíba são o *IGG* (Índice de Gravidade Global) e a *DO<sub>VB</sub>* (Deflexão Máxima com Viga Benkelman). Os dados dos parâmetros de desempenho, o cadastro das rodovias, as seções transversais, características dos materiais constituintes e dados sobre pesquisa de tráfego foram fornecidos pelo DER-PB.

Foi necessária uma análise comparativa de mapas georreferenciados do sistema rodoviário da Paraíba (Apêndice VII) e da distribuição do clima no estado (ver Figura 38) para atribuir a classificação climática dos trechos rodoviários estudados e, conseqüentemente, o nível *C*.

Para o cálculo do Número Estrutural Corrigido (*SNC*) foram utilizados os Índices de Suporte Califórnia (*ISC*) das camadas de base, sub-base e subleito, disponibilizados pelo Órgão Rodoviário. A utilização do *ISC* requer alguns cuidados, pois este índice não avalia as deformações recuperáveis dos solos, que são fundamentais na vida de fadiga dos revestimentos asfálticos. No entanto, o *ISC* é indicativo de resistência, bastante importante na análise de ruptura de camadas de solos. É preciso salientar que o emprego do *ISC* na obtenção do *SNC* foi realizado pela inexistência, na atualidade, de dados suficientes de módulo de resiliência de materiais para pavimentação da Paraíba. Reconhece-se que esta é uma limitação dos modelos elaborados, e que novos modelos para previsão de desempenho deverão ser

propostos no futuro, com  $SNC$  calculado em função do módulo de resiliência dos materiais granulares tipicamente aplicados em pavimentos paraibanos.

Complementando o cálculo do  $SNC$ , a consideração do revestimento foi para a sua situação inicial, ou seja, o revestimento sem defeitos, logo após a abertura ao tráfego.

Os coeficientes estruturais das camadas granulares foram calculados de acordo com a proposição na pesquisa PIRC (Queiroz, 1981; DNER-PRO 159/85; Paterson, 1987), apresentados no Capítulo 4 desta tese. O coeficiente estrutural de revestimento em Mistura Asfáltica foi considerado igual a 0,173 e para Tratamento Superficial foi igual a 0,04 (representando a condição inicial do pavimento).

A partir dos resultados obtidos, foram atribuídos os códigos de  $S$  de acordo com os níveis estabelecidos de  $SNC$  para cada tipo de revestimento.

O  $N_{acum}$  foi calculado empregando os fatores de carga da AASHTO. Foram disponibilizadas pesquisas de tráfego dos anos de 1990, 1997, 1999, 2000, 2001 e 2002, constituindo um bom histórico de tráfego. A partir dos resultados obtidos, foram atribuídos os códigos da variável  $N$  de acordo com os níveis de  $N_{acum}$  estabelecidos para cada tipo de revestimento.

Devido à pequena quantidade de trechos rodoviários disponíveis para análise, todos os dados fornecidos pelo Órgão Rodoviário estiveram, a priori, aptos para a modelagem. Em seguida, o tratamento da redundância e dos valores bastante discrepantes foi considerado para evitar subestimação ou superestimação pelos modelos, ajustando-se a curva ao  $R^2$  limite.

Os dados utilizados para os modelos de  $IGG$  e de  $DO_{VB}$  encontram-se nos Apêndices III (Mistura Asfáltica) e IV (Tratamento Superficial). O resumo destes dados encontra-se na Tabela 21.

A regressão por crescimento exponencial de  $IGG$  e de  $DO_{VB}$  para revestimento em Mistura Asfáltica e em Tratamento Superficial, utilizando as variáveis codificadas  $C$ ,  $S$  e  $N$ , resultou nos dados apresentados da Tabela 22 a 25. Nelas são apresentados os Parâmetros dos Modelos com seus  $p$ -levels associados, o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e a Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP).

Tabela 21: Resumo dos dados utilizados em modelos de previsão de desempenho na Paraíba.

Análise	Banco de dados de <i>IGG</i>			Banco de dados de <i>Do<sub>VB</sub></i>		
	<i>IGG</i>	<i>SNC</i>	<i>N<sub>acum</sub></i>	<i>Do<sub>VB</sub></i> (0,01 mm)	<i>SNC</i>	<i>N<sub>acum</sub></i>
<b>Mistura Asfáltica</b>						
<b>Mínimo</b>	34	2,79	3,10E+06	26	3,33	2,28E+06
<b>Média</b>	76	4,02	6,93E+06	36	4,18	4,70E+06
<b>Mediana</b>	58	4,15	5,53E+06	33	4,22	3,36E+06
<b>Máximo</b>	213	5,06	1,05E+07	60	4,83	1,05E+07
<b>Tratamento Superficial</b>						
<b>Mínimo</b>	29	1,35	0,00E+00	31	1,83	0,00E+00
<b>Média</b>	89	3,27	1,71E+06	51	3,47	1,92E+06
<b>Mediana</b>	90	3,43	1,75E+06	53	3,53	2,02E+06
<b>Máximo</b>	170	4,25	4,19E+06	75	4,40	4,19E+06

Tabela 22: Parâmetros do Modelo de Previsão de *IGG* (Mistura Asfáltica).

<b>Estrutura do modelo: <math>IGG_{(MA)} = 47,7 + e^{(3,31+0,53C-1,55S+0,46N)}</math></b>					
<i>IGG</i>	<i>a<sub>1</sub></i>	<i>a<sub>2</sub></i>	<i>a<sub>3</sub></i>	<i>a<sub>4</sub></i>	<i>a<sub>5</sub></i>
<b>Coefficientes</b>	47,72794	3,312907	0,530351	-1,54723	0,463460
<b>Erro Médio</b>	7,32636	0,394007	0,241025	0,37736	0,139201
<b>t<sub>(22)</sub></b>	6,51455	8,408245	2,200400	-4,10019	3,329433
<b>p-level</b>	≅ 0	≅ 0	0,038575	0,00047	0,003042
<b>REMQP = 21,65 %</b>			<b>R<sup>2</sup> = 0,88</b>		

Tabela 23: Parâmetros do Modelo de Previsão de *Do<sub>VB</sub>* (Mistura Asfáltica).

<b>Estrutura do modelo: <math>Do_{VB(MA)} = e^{(3,747+0,092C-0,095S+0,299N)}</math></b>				
<i>Do<sub>VB</sub></i> (10 <sup>-2</sup> mm)	<i>a<sub>1</sub></i>	<i>a<sub>2</sub></i>	<i>a<sub>3</sub></i>	<i>a<sub>4</sub></i>
<b>Coefficientes</b>	3,7471	0,091775	-0,09519	0,29911
<b>Erro Médio</b>	0,0177	0,029775	0,02889	0,01775
<b>t<sub>(34)</sub></b>	211,9936	3,082279	-3,29543	16,85361
<b>p-level</b>	≅ 0	0,005100	0,00305	≅ 0
<b>REMQP = 7,55 %</b>			<b>R<sup>2</sup> = 0,91</b>	

Tabela 24: Parâmetros do Modelo de Previsão de *IGG* (Tratamento Superficial).

$$\text{Estrutura do modelo: } IGG_{TS} = e^{( \quad + , \quad \cdot C - \quad \cdot S + , \quad \cdot N )}$$

$$\text{Como: } S = \frac{SNC - (SNC_{\text{máximo}} + SNC_{\text{mínimo}})/2}{(SNC_{\text{máximo}} - SNC_{\text{mínimo}})/2}$$

∴

Para misturas asfálticas têm-se:

Na modelagem de *IGG* para mistura asfáltica (Tabela 21) :

$$SNC_{\text{máximo}} = 5,06$$

$$SNC_{\text{mínimo}} = 2,79$$

$$S_{IGG(MA)} = \frac{SNC - (5,06 + 2,79)/2}{(5,06 - 2,79)/2} = \frac{SNC - 3,93}{1,14}$$

repetindo-se para deflexão em misturas asfálticas:

$$S_{Do_{VB}(MA)} = \frac{SNC - 4,08}{0,75}$$

Para tratamentos superficiais têm-se:

$$S_{IGG(TS)} = \frac{SNC - 2,80}{1,45} \quad ; \quad S_{Do_{VB}(TS)} = \frac{SNC - 3,12}{1,29}$$

Tabela 26: Codificação para as variáveis independentes *C*, *S* e *N*.

Tipo de Revestimento	Variável Codificada	Níveis (código)		
		Baixo (-1)	Médio (0)	Alto (+1)
Concretos Asfálticos	<i>S</i>	$SNC \leq 3,0$	$3,0 < SNC \leq 4,0$	$SNC > 4,0$
	<i>N</i>	$N_{acum} \leq 4,0 \times 10^6$	$4,0 \times 10^6 < N_{acum} \leq 1,0 \times 10^7$	$N_{acum} > 1,0 \times 10^7$
Tratamentos Superficiais	<i>S</i>	$SNC \leq 2,5$	$2,5 < SNC \leq 3,5$	$SNC > 3,5$
	<i>N</i>	$N_{acum} \leq 8,0 \times 10^5$	$8,0 \times 10^5 < N_{acum} \leq 2,0 \times 10^6$	$N_{acum} > 2,0 \times 10^6$

Classificação Climática da UNESCO* (código) <span style="float: right;">cont. Tabela 26</span>				
Úmido	Sub-Úmido Úmido	Sub-Úmido Seco	Semi-Árido	Árido e Hiper-Árido
$I_A > 1,00$	$0,65 < I_A < 1,00$	$0,50 < I_A < 0,65$	$0,20 < I_A < 0,50$	$I_A < 0,20$
(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)

\* Classificação que avalia a umidade disponível no meio (ver subseção 6.2.1).

- $N$  é o nível relacionado ao número acumulado de solicitações pelo eixo padrão de 8,2tf ( $N_{acum}$ ), calculado com fatores de carga da AASHTO (ver Tabela 26). Alternativamente, pode ser calculado com os valores máximo e mínimo de  $N_{acum}$  utilizados na modelagem de cada parâmetro de desempenho realizada (ver Tabela 21):

$$\text{Como: } N = \frac{N_{acum} - (N_{acum \text{ máximo}} + N_{acum \text{ mínimo}})/2}{(N_{acum \text{ máximo}} - N_{acum \text{ mínimo}})/2}$$

∴

Para misturas asfálticas têm-se:

Na modelagem de  $IGG$  para mistura asfáltica (Tabela 21) :

$$N_{acum \text{ máximo}} = 1,05 \times 10^7$$

$$N_{acum \text{ mínimo}} = 3,10 \times 10^6$$

$$N_{IGG(MA)} = \frac{N_{acum} - (1,05 \times 10^7 + 3,10 \times 10^6)/2}{(1,05 \times 10^7 - 3,10 \times 10^6)/2} = \frac{N_{acum} - 6,80 \times 10^6}{3,70 \times 10^6}$$

repetindo-se para deflexão em misturas asfálticas:

$$N_{Do_{VB}(MA)} = \frac{N_{acum} - 6,37 \times 10^6}{4,09 \times 10^6}$$

Para tratamentos superficiais têm-se:

$$N_{IGG(TS)} = N_{DoVB(TS)} = \frac{N_{acum} - 2,10 \times 10^6}{2,10 \times 10^6}$$

Os valores de  $R^2$  foram maiores que 0,7 para todos os modelos, porém os valores de REMQP, especificamente para os dois modelos de *IGG*, foram altos (bem acima de 15%). Esta variabilidade dos valores de *IGG* já foi detectada na seção 7.2.1 pela análise dos valores de Erro Médio Absoluto (*EMA*) no dimensionamento de UAs. Provavelmente isto é em decorrência das próprias ponderações existentes no método de cálculo do *IGG*.

Nos modelos apresentados nas Tabelas 22, 23, 24 e 25, pode-se observar que os efeitos de todos os fatores (*C*, *S* e *N*) são estatisticamente significativos ( $p\text{-level} < 0,10$ ). Para o caso de *C*, quanto mais seco o clima, maiores são os valores de *IGG* e *DoVB*, confirmando, como comentado no item 7.1.1, a provável influência do clima na oxidação do ligante asfáltico e conseqüente degradação do revestimento (envelhecido devido à amplitude térmica diária nestas regiões). Como já esperado, quanto menor for *S* e maior *N*, maiores serão o *IGG* e *DoVB*, tanto para misturas asfálticas quanto para tratamentos superficiais.

Deve-se alertar que a sazonalidade do clima pode influenciar bastante nos valores de deflexão medidos em campo. Os modelos de deflexão elaborados nesta tese levam em consideração apenas o clima médio em um determinado período de análise estabelecido. As variações da deflexão durante o ano, ocasionadas pela presença ou ausência de umidade, podem induzir a grandes diferenças entre valores observados em campo e calculados pelos modelos, sendo, portanto, um fator a ser considerado nas suas utilizações.

As Figuras 57 a 60 apresentam os Scatterplots relacionando através de uma reta os valores observados em campo e previstos pelos modelos. Vale salientar que quanto mais aproximada a  $45^\circ$  for a inclinação da reta de regressão das figuras, menores são os erros por superestimação ou subestimação na inferência de parâmetros de desempenho e, conseqüentemente, nos processos de priorização em nível de rede ou de projeto.

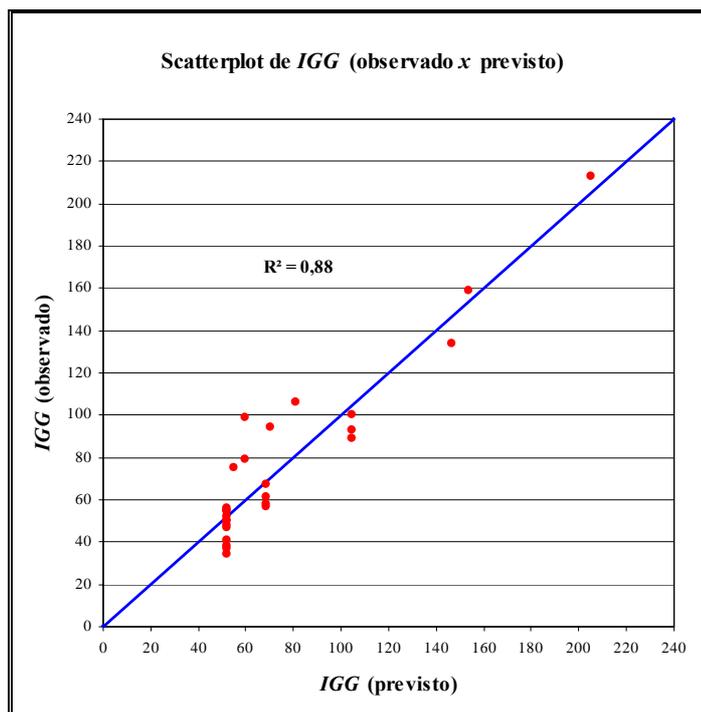


Figura 57: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de  $IGG$  para Mistura Asfáltica e observados em campo.

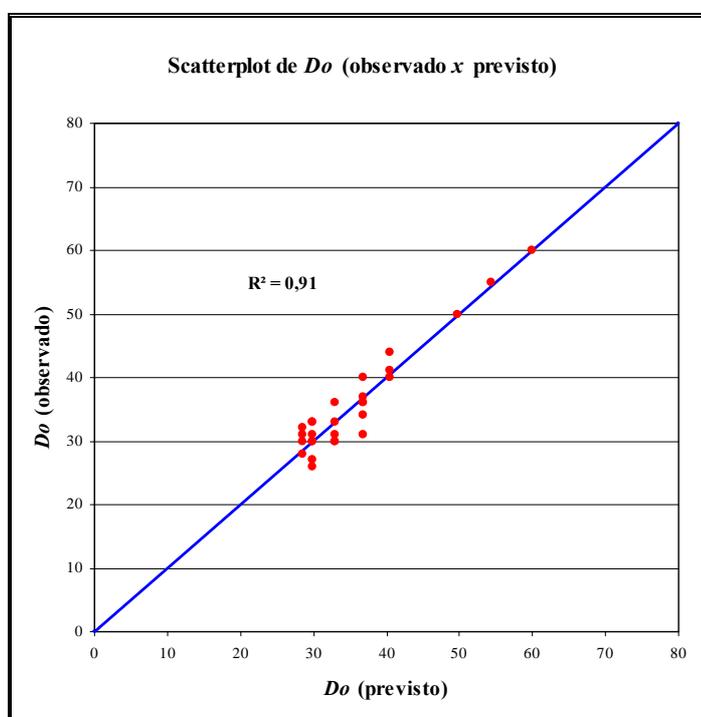


Figura 58: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de  $Do_{VB}$  para Mistura Asfáltica e observados em campo.

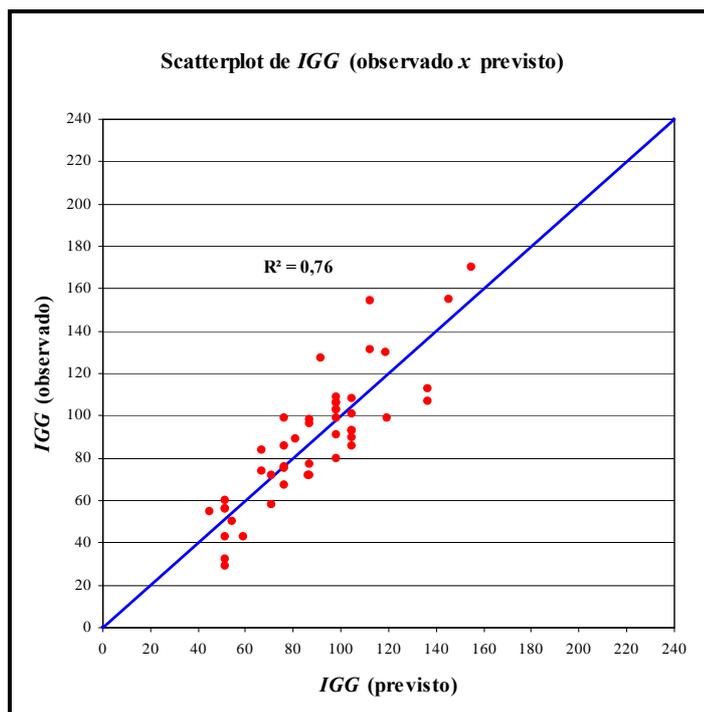


Figura 59: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de *IGG* para Tratamento Superficial e observados em campo.

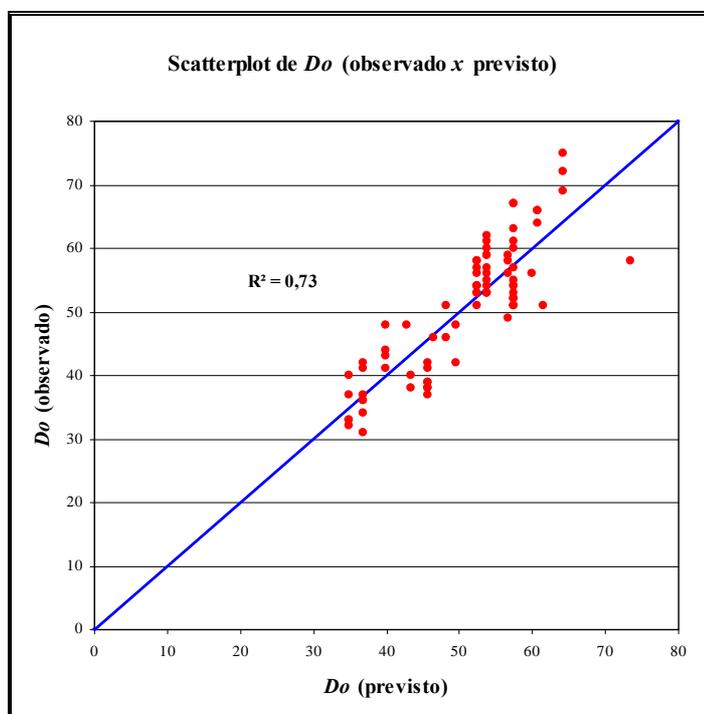


Figura 60: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de  $Do_{VB}$  para Tratamento Superficial e observados em campo.

Observa-se que as retas mais simétricas são dos modelos de  $IGG$  e  $Do_{VB}$  para misturas asfálticas (Figuras 57 e 58, respectivamente), nos quais os valores de  $R^2$  foram mais altos.

A inclinação das retas apresentadas nas Figuras 59 e 60, respectivamente para os modelos de  $IGG$  e  $Do_{VB}$  para tratamento superficial, evidenciam uma pequena tendência em superestimar os valores mais baixos e subestimar os valores mais altos, quando comparado aos valores observados em campo. Contudo, quando se distanciam de valores extremos, estes modelos convergem aos valores reais.

### 7.3.2 Modelos de Previsão de Desempenho Obtidos com Dados do Ceará

Os parâmetros de desempenho analisados no Ceará foram o  $PCR$  (Índice de Condição do Pavimento), o  $IRI$  (Índice de Irregularidade Longitudinal) e o  $Do_{FWD}$  (Deflexão Máxima com FWD). Os dados dos parâmetros de desempenho, o cadastro das rodovias, as seções transversais, características dos materiais constituintes e dados sobre pesquisa de tráfego foram fornecidos pelo Órgão Rodoviário Estadual do Ceará (DERT/CE).

Também foi necessária uma análise comparativa de mapas georreferenciados do sistema rodoviário do Ceará (Apêndice VIII) e da distribuição climática do estado (ver Figura 38) para atribuir a classificação climática dos trechos rodoviários analisados e, conseqüentemente, o nível C.

O cálculo do Número Estrutural Corrigido ( $SNC$ ) seguiu a proposição da pesquisa PIRC (Queiroz, 1981; DNER-PRO 159/85; Paterson, 1987), apresentada no Capítulo 4 desta tese, mas com coeficientes estruturais das camadas calculados pelo método da AASHTO (Ullidtz, 1998), utilizando-se os módulos de resiliência retroanalisados das camadas do pavimento. O software utilizado para processar a retroanálise foi o EVERCALC 5.0<sup>5</sup>, utilizando a estrutura dividida em camada asfáltica, conjunto de camadas granulares e subleito para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica, e conjunto de camadas granulares e subleito para pavimentos revestidos em Tratamento Superficial.

---

<sup>5</sup> O EVERCALC *Pavement Backcalculation Program Version 5.20* é um software constituinte do pacote de softwares para análise mecânica de pavimentos, com domínio aberto (EVERSERIES), desenvolvido pelo *Materials Laboratory* do *Washington State Department of Transportation*. Este software é capaz de realizar retroanálises de até 5 camadas de pavimentos, utilizando dados de 10 sensores de FWD e sete avaliações na mesma posição, tornando possível analisar a não linearidade elástica das camadas granulares.

No cálculo do *SNC* foi estabelecido que o revestimento seria analisado para a sua situação inicial, ou seja, sem defeitos, logo na abertura ao tráfego (coeficiente estrutural para mistura asfáltica igual a 0,173 e para tratamento superficial igual a 0,04). O coeficiente estrutural da camada de base granular foi calculado, portanto, com os modelos da AASHTO e a correção do subleito, na qual o único método disponível faz utilização dos valores de Índice de Suporte Califórnia, foi feita pela consideração do *ISC* como 1/10 do valor do módulo de resiliência em MPa (proposta utilizada pela AASHTO, 1993).

Novamente salienta-se que este procedimento não é ideal, pois enquanto o Módulo de Resiliência é um parâmetro relacionado a deformabilidade elástica do material, o *ISC*, se tanto, é um parâmetro indicador de resistência. A relação entre *ISC* e módulo de resiliência, portanto, pode acarretar em erros consideráveis, sobretudo quando se desconhece o comportamento mecânico dos solos e por se tratarem de parâmetros distintos.

Nogami & Villibor (1995) constataram que solos lateríticos arenosos e argilosos analisados por eles foram os que mais se aproximaram da relação *ISC* como 1/10 do módulo de resiliência, enquanto o mesmo não se verificava para solos saprolíticos. Também afirmam que solos lateríticos constituem um exemplo de materiais com altos módulos de resiliência, principalmente devido à atuação da tensão vertical que se torna maior com a profundidade da camada (caso de subleitos encontrados em pavimentos do Ceará).

A partir dos resultados obtidos, foram atribuídos os códigos de *S* de acordo com os níveis estabelecidos para cada tipo de revestimento.

O  $N_{acum}$  foi calculado com fatores de carga da AASHTO. O DERT-CE disponibilizou pesquisas de tráfego dos anos de 1994, 1997, 2000 e 2004, constituindo um bom histórico. A partir dos resultados obtidos, foram atribuídos os códigos de *N* de acordo com os níveis estabelecidos para cada tipo de revestimento.

A necessidade de calcular o *SNC* a partir de resultados de módulos retroanalisados de bacias deflectométricas de FWD, foi o primeiro critério adotado para a seleção de trechos rodoviários a utilizar na elaboração de modelos de previsão de desempenho.

Os tratamentos da redundância e dos valores bastante discrepantes também foram considerados para evitar uma subestimação ou superestimação pelos modelos, atendendo também a restrição do  $R^2$  mínimo de 0,7.

Os dados utilizados para os modelos de  $PCR$ ,  $IRI$  e de  $Do_{FWD}$  encontram-se no Apêndice V (revestimento em Mistura Asfáltica) e no Apêndice VI (revestimento em Tratamento Superficial). O resumo destes dados encontra-se na Tabela 27.

Tabela 27: Resumo dos dados utilizados em modelos de previsão de desempenho no Ceará.

Análise	Banco de dados de $PCR$			Banco de dados de $IRI$			Banco de dados de $Do_{FWD}$		
	$PCR$	$SNC$	$N_{acum}$	$IRI$	$SNC$	$N_{acum}$	$Do_{FWD}$ (0,01mm)	$SNC$	$N_{acum}$
<b>Mistura Asfáltica</b>									
<b>Mínimo</b>	51	1,67	1,95E+04	1,85	1,45	1,14E+05	21	1,65	1,06E+04
<b>Média</b>	84	3,24	2,35E+06	3,11	3,39	2,19E+06	39	3,46	2,25E+06
<b>Mediana</b>	87	2,96	8,73E+05	3,01	3,16	6,54E+05	38	3,32	5,20E+05
<b>Máximo</b>	91	5,88	1,70E+07	4,05	5,32	1,10E+07	67	5,79	1,31E+07
<b>Tratamento Superficial</b>									
<b>Mínimo</b>	40	1,32	7,57E+04	3,30	2,07	4,04E+04	26	1,32	1,08E+05
<b>Média</b>	79	2,76	1,46E+06	4,26	2,71	1,15E+06	47	2,68	8,90E+05
<b>Mediana</b>	81	2,76	8,74E+05	3,96	2,65	5,40E+05	46	2,67	5,16E+05
<b>Máximo</b>	91	3,66	4,81E+06	6,44	3,66	7,43E+06	85	4,42	7,56E+06

A aplicação de regressão linear múltipla de  $PCR$  e por crescimento exponencial de  $IRI$  e de  $Do_{FWD}$  para revestimento em Mistura Asfáltica e em Tratamento Superficial, utilizando as variáveis codificadas  $C$ ,  $S$  e  $N$ , resultou nos dados apresentados da Tabela 28 a 33. Nestas tabelas são apresentados os Parâmetros dos Modelos com seus  $p$ -levels associados, o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e a Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP).

Os valores de  $R^2$  foram maiores que 0,7 e os valores de REMQP foram abaixo de 15% para todos os modelos elaborados com dados do Ceará.

Tabela 28: Parâmetros do Modelo de Previsão de *PCR* (Mistura Asfáltica).

<b>Estrutura do modelo: <math>PCR_{(MA)} = 71,3 - 4,1 \cdot C + 3,5 \cdot S - 14,6 \cdot N</math></b>				
<b><i>PCR</i></b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>a_4</math></b>
<b>Coefficientes</b>	71,2753	-4,1043	3,5228	-14,6116
<b>Erro Médio</b>	1,813135	1,414317	1,020677	1,593949
<b><math>t_{(15)}</math></b>	39,31053	-2,90198	3,45146	-9,16695

Tabela 31: Parâmetros do Modelo de Previsão de  $PCR$  (Tratamento Superficial).

<b>Estrutura do modelo: <math>PCR_{(TS)} = 73,9 - 7,6 \cdot C + 6,6 \cdot S - 9,6 \cdot N</math></b>				
<b><math>PCR</math></b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>a_4</math></b>
<b>Coefficientes</b>	73,94629	-7,57973	6,563092	-9,64504
<b>Erro Médio</b>	2,10748	2,79603	2,301697	1,99555
<b><math>t_{(21)}</math></b>	35,08759	-2,71090	2,851415	-4,83328
<b><math>p</math>-level</b>	$\cong 0$	0,01386	0,010211	0,00012
<b>REMQP = 11,27 %</b>			<b><math>R^2 = 0,70</math></b>	

Tabela 32: Parâmetros do Modelo de Previsão de  $IRI$  (Tratamento Superficial).

<b>Estrutura do modelo: <math>IRI_{(TS)} = e^{(1,5558+0,1377 \cdot C - 0,1042 \cdot S + 0,1384 \cdot N)}</math></b>				
<b><math>IRI</math> (m/km)</b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>a_4</math></b>
<b>Coefficientes</b>	1,55584	0,137669	-0,10419	0,138361
<b>Erro Médio</b>	0,02228	0,029010	0,02444	0,017029
<b><math>t_{(32)}</math></b>	69,82740	4,745556	-4,26352	8,125214
<b><math>p</math>-level</b>	$\cong 0$	0,000313	0,00079	0,000001
<b>REMQP = 5,07 %</b>			<b><math>R^2 = 0,94</math></b>	

Tabela 33: Parâmetros do Modelo de Previsão de  $Do_{FWD}$  (Tratamento Superficial).

<b>Estrutura do modelo: <math>Do_{FWD(TS)} = -1110 + e^{(7,0542+0,0040 \cdot C - 0,0127 \cdot S + 0,0069 \cdot N)}</math></b>					
<b><math>Do_{FWD}</math> (0,01mm)</b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>a_4</math></b>	<b><math>a_5</math></b>
<b>Coefficientes</b>	-1110,00	7,0542	0,003957	-0,0127	0,006893
<b>Erro Médio</b>	28,10	0,0243	0,001142	0,0012	0,001023
<b><math>t_{(59)}</math></b>	-39,50	290,7615	3,464992	-10,4112	6,739890
<b><math>p</math>-level</b>	$\cong 0$	$\cong 0$	0,001014	$\cong 0$	$\cong 0$
<b>REMQP = 14,09 %</b>			<b><math>R^2 = 0,74</math></b>		

Onde:

- $C$  é o nível relacionado à classificação climática da UNESCO baseada no valor do Índice de Aridez –  $I_A = P_r/ET_0$ , onde  $P_r$  é a precipitação média (mm) e  $ET_0$  é a evapotranspiração potencial (mm) (Tabela 26);
- $S$  é o nível relacionado ao número estrutural corrigido –  $SNC$  (ver Tabela 26). Alternativamente, pode ser calculado com o valor máximo e mínimo de  $SNC$  utilizado na modelagem de cada parâmetro de desempenho realizada (ver Tabela 27):

Para misturas asfálticas têm-se:

$$S_{PCR(MA)} = \frac{SNC - 3,77}{2,11} \quad ; \quad S_{IRI(MA)} = \frac{SNC - 3,39}{1,93} \quad ; \quad S_{DoFWD(MA)} = \frac{SNC - 3,72}{2,07}$$

Para tratamentos superficiais têm-se:

$$S_{PCR(TS)} = \frac{SNC - 2,49}{1,17} \quad ; \quad S_{IRI(TS)} = \frac{SNC - 2,87}{0,79} \quad ; \quad S_{DoFWD(TS)} = \frac{SNC - 2,87}{1,55}$$

- $N$  é o nível relacionado ao número acumulado de solicitações pelo eixo padrão de 8,2tf, calculado com fatores de carga da AASHTO –  $N_{acum}$  (ver Tabela 26). Alternativamente, pode ser calculado com o valor máximo e mínimo de  $N_{acum}$  utilizado na modelagem de cada parâmetro de desempenho realizada (ver Tabela 27):

Para misturas asfálticas têm-se:

$$N_{PCR(MA)} = \frac{N_{acum} - 8,51 \times 10^6}{8,49 \times 10^6} \quad ; \quad N_{IRI(MA)} = \frac{N_{acum} - 5,58 \times 10^6}{5,47 \times 10^6} \quad ; \quad N_{DoFWD(MA)} = \frac{N_{acum} - 6,54 \times 10^6}{6,53 \times 10^6}$$

Para tratamentos superficiais têm-se:

$$N_{PCR(TS)} = \frac{N_f - 2,44 \times 10^6}{2,37 \times 10^6} \quad ; \quad N_{IRI(TS)} = \frac{N_f - 3,74 \times 10^6}{3,70 \times 10^6} \quad ; \quad N_{DoFWD(TS)} = \frac{N_f - 3,83 \times 10^6}{3,73 \times 10^6}$$



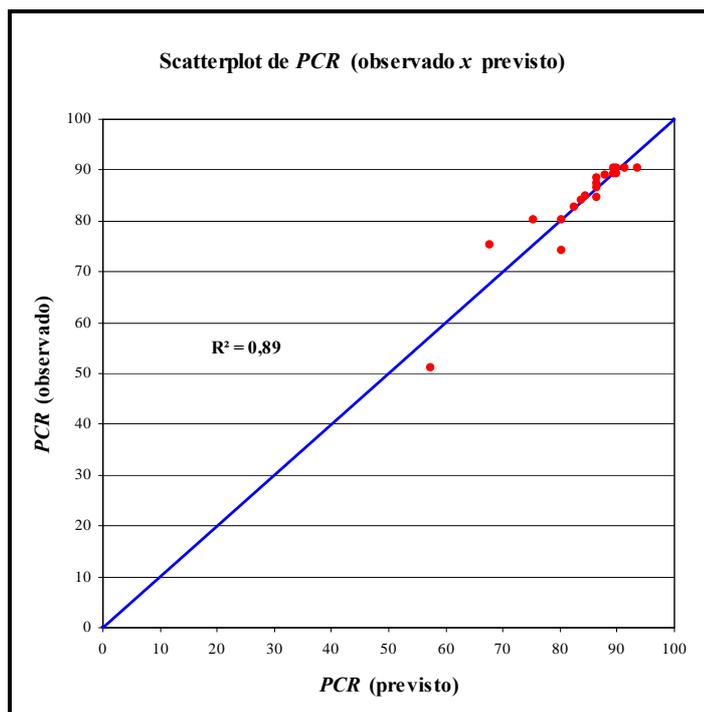


Figura 61: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de *PCR* para Mistura Asfáltica e observados em campo.

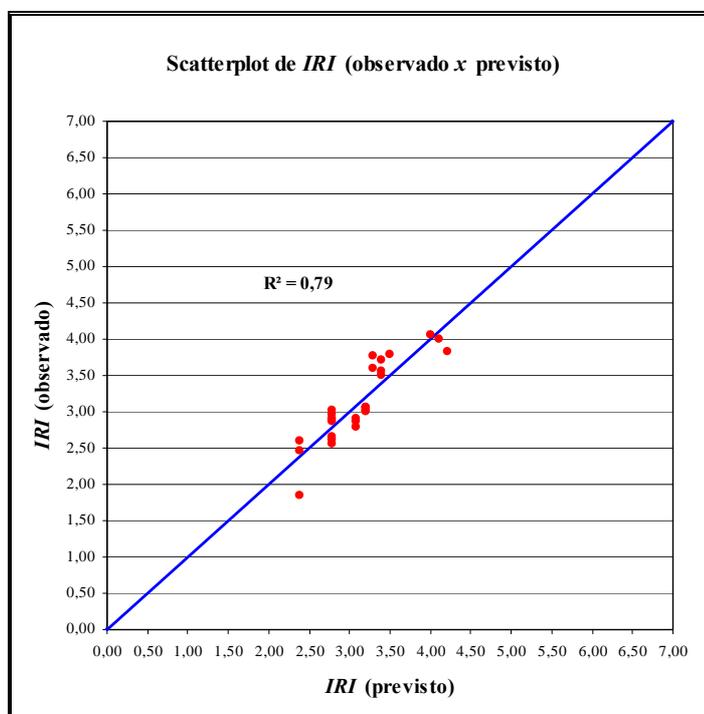


Figura 62: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de *IRI* para Mistura Asfáltica e observados em campo.

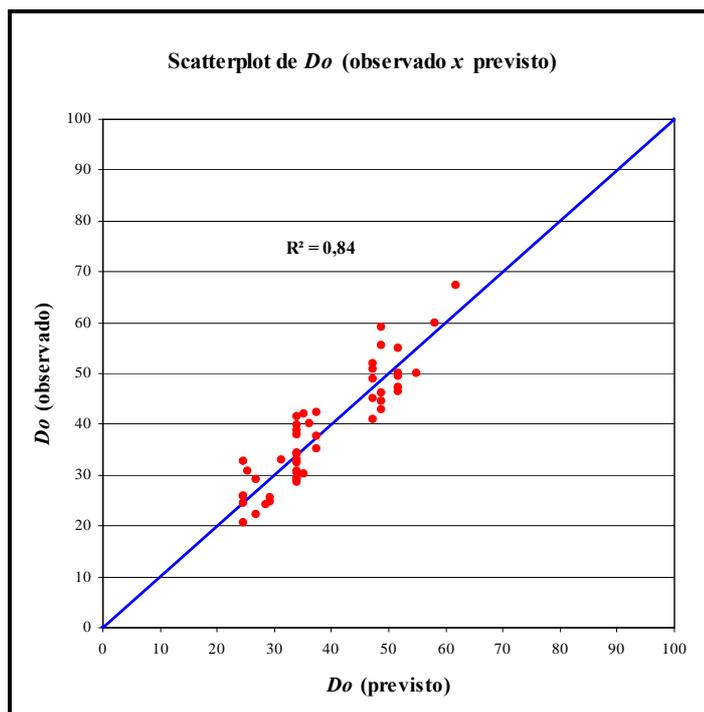


Figura 63: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de  $Do_{FWD}$  para Mistura Asfáltica e observados em campo.

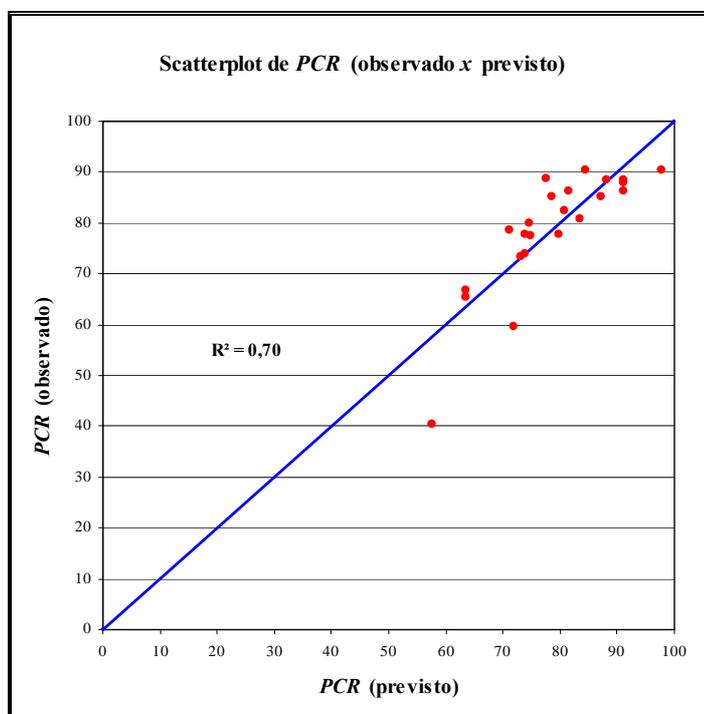


Figura 64: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de  $PCR$  para Tratamento Superficial e observados em campo.

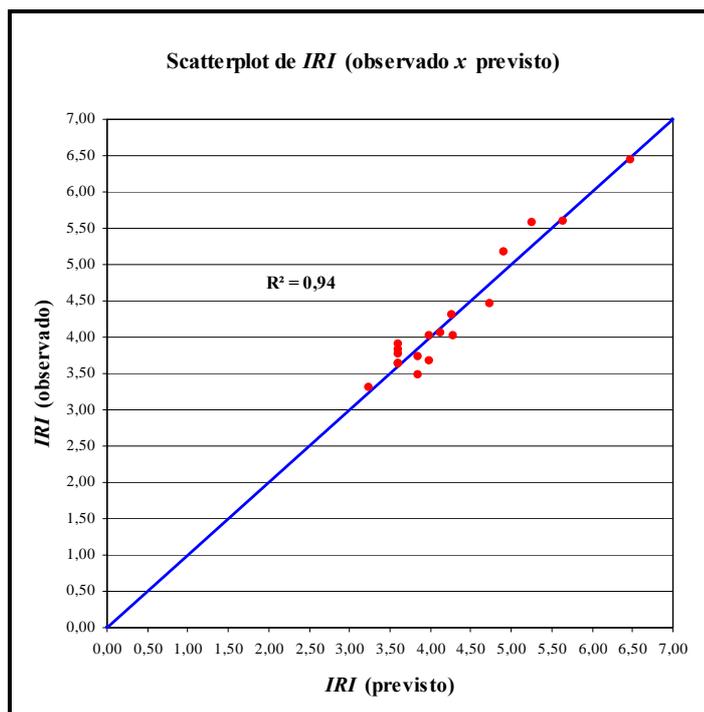


Figura 65: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de *IRI* para Tratamento Superficial e observados em campo.

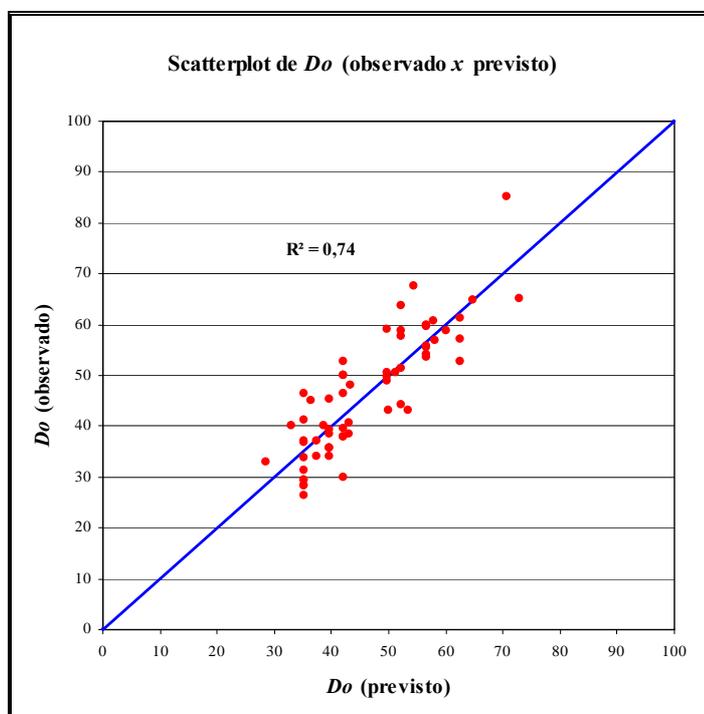


Figura 66: Scatterplot entre valores previstos pelo modelo de  $DO_{FWD}$  para Tratamento Superficial e observados em campo.

### 7.3.3 Considerações Finais Sobre os Modelos de Previsão de Desempenho Elaborados com Dados da Paraíba e do Ceará

As variáveis com níveis codificados inseridas aos modelos, representando níveis de parâmetros de clima, capacidade estrutural do pavimento e cargas acumuladas de tráfego, promoveram uma considerável consistência aos modelos de previsão de desempenho desenvolvidos, conforme análise apresentadas anteriormente.

A utilização do Índice de Aridez, do Número Estrutural Corrigido e do Número Acumulado de Repetições do Eixo Padrão em suas escalas originais não tornaria possível a avaliação da significância destas variáveis na estimativa dos parâmetros de desempenho propostos, ao passo que a variação destes em níveis codificados (proposta nesta tese) contribuiu para eliminar o efeito da escala, possibilitando quantificar melhor os efeitos complexos.

Na Tabela 34 é apresentado o resumo dos efeitos de cada variável codificada nos modelos de previsão de desempenho elaborados.

Tabela 34: Resumo do Efeito de Cada Variável Codificada nos Modelos de Previsão de Desempenho Elaborados com Dados da Paraíba e do Ceará.

<b>Modelo de Previsão de Desempenho</b>	<b><i>C</i></b>	<b><i>S</i></b>	<b><i>N</i></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>REMQP (%)</b>
Dados da Malha Rodoviária da Paraíba					
$IGG_{(MA)}$	↑	↓	↑	0,88	21,65
$DO_{VB (MA)}$	↑	↓	↑	0,91	7,55
$IGG_{(TS)}$	↑	↓	↑	0,76	20,90
$DO_{VB (TS)}$	↑	↓	↑	0,73	10,44
Dados da Malha Rodoviária do Ceará					
$PCR_{(MA)}$	↓	↑	↓	0,89	4,51
$IRI_{(MA)}$	↑	↓	↑	0,79	8,68
$DO_{FWD (MA)}$	↑	↓	↑	0,84	12,15
$PCR_{(TS)}$	↓	↑	↓	0,70	11,27
$IRI_{(TS)}$	↑	↓	↑	0,94	5,07
$DO_{FWD (TS)}$	↑	↓	↑	0,74	14,09
↓ afeta reduzindo			↑ afeta aumentando		

Conclui-se que quanto mais seco o clima, maior a degradação do pavimento. Como esperado, a maior capacidade estrutural e menor quantidade de cargas de tráfego contribuem para desacelerar o processo de degradação.

Um fator que deve ser considerado na utilização dos modelos propostos é a configuração estrutural dos pavimentos nos dois estados. Não existiam casos de camadas intermediárias rígidas. As estruturas eram constituídas basicamente por revestimento, base granular e subleito. Isto representa uma restrição na utilização dos modelos, pois o processo de cálculo do *SNC* é indiferente à configuração estrutural do pavimento, mesmo sendo um fator determinante na distribuição de tensões e deformações nas camadas.

Salienta-se que os modelos apresentados nesta tese têm grande potencial para aplicação em outros locais com características climáticas, de tráfego e de materiais para pavimentação semelhantes aos estados da Paraíba e do Ceará, sobretudo nos estados do Nordeste. Para tanto, é aconselhável a realização de um processo de validação, comparando valores previstos com reais, antes da aplicação na avaliação de soluções em gerência de pavimentos.

#### 7.4 PRIORIZAÇÃO EM NÍVEL DE REDE

A Priorização em Nível de Rede foi realizada aplicando-se o método de Análise Multicriterial PROMETHEE II. Os critérios utilizados na análise estão descritos no Capítulo 5, constituindo 5 categorias diferentes (Técnica, Econômica, Social, Ambiental e de Transporte).

Dentre os trechos rodoviários analisados nesta pesquisa (Ceará + Paraíba), foram escolhidos 40 para processar a análise. A escolha foi realizada aleatoriamente, onde 17 estão localizados na malha rodoviária do estado do Ceará e 23 na malha rodoviária do estado da Paraíba.

Foram utilizados os modelos de previsão de desempenho (*PCR*, *IGG*, *IRI*, *DO<sub>VB</sub>* e *DO<sub>FWD</sub>*), apresentados anteriormente para mistura asfáltica e tratamento superficial, para prever o desempenho dos trechos rodoviários (para 1996 e 2007, respectivamente para a Paraíba e Ceará – os anos propostos para análise são proporcionais às datas dos monitoramentos realizados nas malhas rodoviárias), com resultados apresentados na Tabela 35. Os valores de *PCR* foram aplicados à Árvore de Decisão da Figura 41, definindo-se o tipo de macro intervenção indicada e o Custo de Manutenção relacionado.

Tabela 35: Previsão de desempenho para os trechos analisados na priorização em nível de rede.

Código do Trecho	KMI	KMF	Revestimento	Data Intervenção	Data da Previsão	Conceito do Clima	C	SVC	N <sub>acum</sub> Previsão	D <sub>o FWD</sub> (0.01mm)	D <sub>o I<sub>B</sub></sub> (0.01mm)	IRI (m/km)	IGG	PCR
040ECE0030D	6+940	9+400	CBUQ	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	4.32	2,99E+07	46	209	7,07	212	40
040ECE0090D	19+045	22+914	CBUQ	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	3.71	2,29E+06	35	30	3,04	60	86
060ECE0170D	49+747	52+195	CBUQ	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	2,00	6,14E+06	49	50	3,98	253	77
065ECE0030D	5+661	9+225	CBUQ	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	3,01	4,50E+05	38	29	2,92	73	88
065ECE0050D	9+258	16+093	CBUQ	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	4,55	2,36E+06	31	27	2,88	52	87
085ECE0530	319+750	342+573	AAUQ	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	2,50	2,00E+06	44	36	3,36	129	82
261ECE0090	33+730	42+171	AAUQ	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO SECO	0	5,40	1,83E+06	28	26	2,81	50	85
341ECE0130	62+309	77+984	AAUF	29/11/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	2,46	9,19E+05	43	33	3,20	123	84
359ECE0010	0+000	22+612	AAUQ	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	4,39	4,62E+06	33	33	3,25	54	83
085ECE0090	21+159	29+496	TSD	31/12/1996	1/1/2007	ÚMIDO	-1	2,46	1,19E+06	41	43	3,96	66	86
085ECE0570	377+271	390+481	TSD	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	2,49	1,01E+06	43	45	4,20	68	84
168ECE0370	242+316	258+288	TSS	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,89	1,03E+06	42	47	4,27	70	82
187ECE0370	239+469	256+836	TSD	31/12/1996	1/1/2007	SEMI-ÁRIDO	0,5	2,27	2,14E+06	52	58	5,17	97	70
261ECE0030	12+539	18+028	TSD	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,79	1,71E+06	44	51	4,44	80	79
354ECE0210	158+061	181+522	TSD	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,15	4,24E+06	55	68	5,31	136	65
366ECE0190	162+346	188+871	TSD	31/12/1996	1/1/2007	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,98	1,17E+06	41	48	4,24	71	82
371ECE0330	225+496	240+913	TSD	31/12/1996	1/1/2007	SEMI-ÁRIDO	0,5	2,87	9,04E+05	44	50	4,57	73	79
PB-073/001	0+000	11+500	CBUQ	1/1/1985	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	3,64	6,36E+06	39	43	3,76	77	77
PB-073/003	11+500	21+800	CBUQ	1/1/1969	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	4,22	6,78E+06	36	41	3,70	62	77
PB-073/007	25+000	54+300	CBUQ	1/1/1969	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	4,11	6,15E+06	36	40	3,63	63	78
PB-073/011	57+200	68+100	CBUQ	1/1/1969	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	4,60	9,13E+06	35	46	3,97	59	74
PB-079/001	0+000	4+500	CBUQ	1/1/1970	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	3,83	5,12E+06	37	38	3,54	67	79
PB-325/005	18+300	34+700	CBUQ	1/1/1978	1/1/1996	SEMI-ÁRIDO	0,5	4,43	3,84E+06	35	35	3,42	60	78
PB-325/011	56+800	75+330	CBUQ	1/1/1978	1/1/1996	SUB-ÚMIDO SECO	0	4,16	2,82E+06	35	32	3,22	60	82
PB-004/005	15+100	28+100	TSD	1/1/1984	1/1/1996	ÚMIDO	-1	3,65	3,19E+06	34	50	3,65	86	85
PB-004/007	28+100	46+900	TSD	1/1/1984	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	2,25	3,02E+06	50	56	4,67	101	74
PB-018/001	0+000	3+500	TSD	1/1/1982	1/1/1996	ÚMIDO	-1	1,59	3,22E+06	54	55	4,79	104	73
PB-018/003	3+500	14+500	TSD	1/1/1982	1/1/1996	ÚMIDO	-1	2,57	1,94E+06	42	46	4,01	75	84
PB-018/005	14+500	16+300	TSD	1/1/1982	1/1/1996	ÚMIDO	-1	2,94	1,94E+06	38	45	3,82	73	86
PB-041/007	28+600	36+400	TSD	1/1/1974	1/1/1996	ÚMIDO	-1	3,63	3,79E+06	36	53	3,75	96	82
PB-065/001	0+000	8+900	TSD	1/1/1985	1/1/1996	ÚMIDO	-1	3,77	1,84E+06	30	43	3,41	66	91
PB-073/021	97+800	109+400	TSD	1/1/1977	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	4,09	4,65E+06	36	61	3,90	115	78
PB-079/003	6+700	14+750	TSD	1/1/1970	1/1/1996	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	3,46	3,62E+06	39	56	4,07	101	78
PB-087/007	16+900	37+600	TSD	1/1/1980	1/1/1996	ÚMIDO	-1	3,80	6,30E+05	28	38	3,25	53	96
PB-105/001	0+000	16+300	TSD	1/1/1970	1/1/1996	ÚMIDO	-1	4,35	2,90E+06	27	47	3,29	76	90
PB-393/003	18+500	25+400	TSD	1/1/1977	1/1/1996	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,83	5,53E+06	52	75	5,09	162	63
PBT-405/001	0+000	24+130	TSD	1/1/1975	1/1/1996	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,89	2,53E+06	45	55	4,51	93	76
PBT-408/001	1+867	3+733	TSD	1/1/1981	1/1/1996	SEMI-ÁRIDO	0,5	2,74	1,68E+06	47	55	4,78	85	75
PB-420/001	0+000	6+300	TSD	1/1/1986	1/1/1996	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,81	4,65E+06	50	69	4,94	138	67
PB-420/003	6+300	11+900	TSD	1/1/1986	1/1/1996	SUB-ÚMIDO SECO	0	2,80	4,54E+06	50	68	4,92	135	67

A utilização do *PCR* também para as análises de priorização nos trechos rodoviários do estado da Paraíba não teve o objetivo de extrapolar estes modelos para pavimentos deste estado. A intenção foi apenas de padronizar o parâmetro de análise para efeito comparativo de cálculo entre as duas malhas rodoviárias. Entende-se que o objetivo desta etapa da tese (análise multicriterial) foi apenas de avaliar a ferramenta PROMETHEE II como método de priorização e otimização em SGPs. A validação dos modelos de *PCR* para outras malhas rodoviárias deve ser escopo de uma pesquisa específica.

De acordo com os valores de *PCR*, ainda foi prevista a Vida Residual dos trechos rodoviários pela razão entre o  $N_{acum}$  restante (para o pavimento atingir *PCR* de 75) e o  $N_{anual}$ , sendo estabelecido como máximo 15 anos.

A Tabela 36 apresenta as características dos critérios utilizados em todos os trechos rodoviários analisados.

Foi constatado que as melhores condições sócio-econômicas encontram-se em trechos rodoviários fora de regiões de clima seco ou semi-árido.

O tráfego também é maior em trechos rodoviários localizados em faixa litorânea, fora de regiões de clima seco ou semi-árido.

Os resultados da Análise Multicriterial são discutidos na seqüência e as planilhas com detalhamento de cálculo estão no Apêndice IX. Estes resultados foram comparados com o método da priorização pela classificação direta do parâmetro *PCR* (menor *PCR*) e pelo método de classificação da relação Benefício/Custo (menor Benefício/Custo), ambos com cálculos apresentados no Apêndice IX.

Tabela 36: Planilha de Dados para Análise Multicriterial em Nível de Rede.

N°	Categoria	PCR atual	Vida Residual (anos)		Nano	CM-Tab 14 (R\$)		PIB agropecuário (R\$)		Potencial agrícola	PIB industrial (R\$)		Via de acesso turístico	População		IDH	PIB per capita (R\$)		Necessidade de Extração de Recursos Naturais	Proximidade de Unidades de Proteção	VDM	Frota Disponível nas Cidades	Extensão do Segmento (km)
			min	max		min	max	min	max		min	max		min	max		min	max					
	<b>Função Preferência q r s</b>	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
	<b>Min/Max Peso (%)</b>	30,00	10,00	10,00	10,00	10,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	5,00	2,50	2,50	5,00	5,00	5,00	5,00	2,50	2,50
	<b>Média</b>	78,72	11	4,18E+05	278.881,35	15.473.411,76	6	176.930.647,06	1,4	71.637	0,64	3.959,83	1,4	67,95	4733	5338	12,618						
	<b>Desvio Padrão</b>	11,82	6	7,68E+05	533.855,55	14.628.791,79	3	364.426.236,34	0,5	80.350	0,05	3.639,48	1,1	40,84	7816	5963	8,107						
	<b>Mínimo</b>	39,56	0	5,01E+04	29.376,00	1.627.000,00	1	4.773.000,00	1,0	14.775	0,56	1.145,00	1,0	0,00	144	682	2,448						
	<b>Máximo</b>	87,99	15	3,33E+06	1.876.880,00	55.950.000,00	10	1.485.515.000,00	2,0	313.584	0,74	15.269,00	5,0	154,21	30749	20565	26,525						
	<b>Segmentos</b>																						
1	040ECE0030D	39,56	0	3,33E+06	1.476.000,00	4.260.000,00	7	425.631.000,00	2	39.697	0,684	15.269,00	5	39,68	30749	4500	2,460						
2	040ECE0030D	85,99	15	2,55E+05	46.428,00	36.907.000,00	7	155.798.000,00	2	60.469	0,67	5.732,00	1	12,21	11884	4682	3,869						
3	060ECE0170D	76,53	6	6,84E+05	29.376,00	8.036.000,00	7	39.447.000,00	1	41.595	0,640937	3.009,71	1	55,54	5632	2812	2,448						
4	065ECE0030D	87,99	15	5,01E+04	42.768,00	1.627.000,00	7	1.485.515.000,00	1	196.422	0,736	10.591,00	1	39,49	12382	17535	3,564						
5	065ECE0050D	87,25	15	2,63E+05	82.020,00	13.939.000,00	7	241.735.000,00	1	100.279	0,691	3.922,00	1	40,73	8127	6598	6,835						
6	085ECE0530	82,41	15	2,23E+05	136.938,00	55.950.000,00	7	76.391.000,00	2	112.355	0,593191	2.180,48	1	38,70	1397	5791	22,823						
7	261ECE0090	85,49	15	2,03E+05	50.646,00	9.797.000,00	1	17.937.000,00	2	17.819	0,631	3.494,00	1	71,62	700	1417	8,441						
8	341ECE0130	84,22	15	1,02E+05	94.050,00	1.960.000,00	5	4.773.000,00	1	14.775	0,622	1.868,00	1	96,47	262	870	15,675						
9	359ECE0010	83,12	14	5,14E+05	135.672,00	7.370.000,00	7	7.520.000,00	1	22.882	0,594	1.145,00	1	57,81	1884	1749	22,612						
10	085ECE0090	86,44	9	1,32E+05	50.022,00	20.105.000,00	7	371.714.000,00	2	313.584	0,721	3.339,00	1	131,33	2948	20565	8,337						
11	085ECE0570	83,55	12	1,12E+05	79.260,00	17.955.000,00	7	11.007.000,00	2	28.002	0,564347	2.688,78	1	0,00	463	682	13,210						
12	168ECE0370	81,91	15	1,15E+05	95.832,00	6.710.000,00	5	5.256.000,00	1	16.789	0,569	2.339,00	1	79,86	158	862	15,972						
13	187ECE0370	70,10	0	2,38E+05	260.505,00	20.944.000,00	10	29.224.000,00	1	81.416	0,643619	1.823,82	2	47,62	755	7412	17,367						
14	261ECE0030	78,59	6	1,90E+05	32.934,00	9.797.000,00	1	17.937.000,00	2	17.819	0,631	3.494,00	1	85,29	662	1417	5,489						
15	354ECE0210	64,67	0	4,72E+05	1.876.880,00	34.219.000,00	8	96.373.000,00	1	11.967,9	0,652755	2.726,26	3	154,21	2085	11332	23,461						
16	366ECE0190	81,85	14	1,30E+05	159.150,00	6.710.000,00	5	5.256.000,00	1	16.789	0,569	2.339,00	1	100,39	144	862	26,525						
17	371ECE0330	78,50	15	1,01E+05	92.502,00	6.762.000,00	1	6.307.000,00	1	6.307	0,000000												

Continuação da Tabela 36

Categoria	Técnica			Econômica			Social			Ambiental			Transporte			
	PCR atual	Vida Residual (anos)	Nano	CM - Tab 14 (R\$)	PIB agropecuário (R\$)	Potencial agrícola	PIB Industrial (R\$)	Via de acesso turístico	População	IDH	PIB per capita (R\$)	Necessidade de Extração de Recursos Naturais	Proximidade de Unidades de Proteção	VDM	Frota Disponível nas Cidades	Extensão do Segmento (km)
Min/Max	min	max	min	max	max	max	max	max	min	min	min	max	max	max	max	
Peso (%)	10,00	10,00	10,00	10,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	5,00	5,00	5,00	2,50	2,50	
Função Preferência	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	
q																
r																
s																
<b>Média</b>	78,73	7	2,75E+05	98.433,04	20.304.869,57	4,3	53.931.926,09	1,3	38249	0,597	4.209,96	1,2	49,64	2309	3177	11.638
<b>Desvio Padrão</b>	7,86	6	1,43E+05	118.854,74	28.381.408,81	1,8	107.503.702,37	0,5	33473	0,036	3.356,76	0,7	20,24	1488	3328	7,166
<b>Mínimo</b>	63,25	0	4,64E+04	-	2.074.000,00	1,0	1.547.000,00	1,0	6261	0,548	1.942,00	0,0	4,05	469	319	1,800
<b>Máximo</b>	96,21	15	6,50E+05	552.000,00	129.576.000,00	7,0	511.177.000,00	2,0	146822	0,668	12.812,00	3,0	80,33	5843	11961	29.300
<b>Segmentos</b>																
18	PB-073/001	76,82	7	6,50E+05	69.000,00	27.657.000,00	5	16.294.000,00	1	53562	0,555882	2.520,06	1	60,29	3026	4185
19	PB-073/003	77,07	15	3,27E+05	61.800,00	29.798.000,00	5	20.340.000,00	1	67854	0,657216	2.466,82	1	40,38	5843	10.300
20	PB-073/007	77,97	15	2,97E+05	175.800,00	13.658.000,00	5	42.862.000,00	1	73724	0,631292	2.777,03	1	51,25	3590	29.300
21	PB-073/011	73,67	7	4,41E+05	163.500,00	7.250.000,00	5	40.461.000,00	1	63182	0,651473	2.821,49	2	56,80	5204	10.900
22	PB-079/001	79,27	15	2,55E+05	27.000,00	3.408.000,00	5	1.899.000,00	1	6979	0,552	2.208,00	1	78,61	1704	4.500
23	PB-325/005	78,37	15	2,56E+05	98.400,00	5.085.000,00	5	3.410.000,00	1	14570	0,596971	2.220,73	1	30,43	1261	16.400
24	PB-325/011	81,72	15	1,88E+05	111.180,00	3.758.000,00	1	13.905.000,00	1	27691	0,668	2.371,00	1	41,23	866	4042
25	PB-004/005	84,95	4	3,02E+05	78.000,00	129.576.000,00	7	511.177.000,00	1	146822	0,647452	6.748,97	1	36,34	4018	13.000
26	PB-004/007	74,02	0	2,86E+05	282.000,00	55.221.000,00	7	19.823.000,00	1	62358	0,553815	2.947,70	2	39,99	3557	18.800
27	PB-018/001	73,31	0	2,66E+05	52.500,00	10.210.000,00	3	125.575.000,00	2	20864	0,613	10.415,00	2	51,61	1648	3.500
28	PB-018/003	83,99	4	1,60E+05	66.000,00	10.210.000,00	3	125.575.000,00	2	20864	0,613	10.415,00	1	53,93	1458	11.000
29	PB-018/005	86,07	8	1,60E+05	10.800,00	10.210.000,00	3	125.575.000,00	2	20864	0,613	10.415,00	1	56,25	1458	1.800
30	PB-041/007	82,37	3	2,15E+05	46.800,00	52.003.000,00	7	56.605.000,00	2	63736	0,588849	3.600,92	1	10,53	4839	7.800
31	PB-065/001	91,14	13	1,89E+05	-	8.689.000,00	5	49.295.000,00	2	6261	0,573	12.812,00	0	4,05	1027	8.900
32	PB-073/021	77,67	1	2,97E+05	69.600,00	2.228.000,00	2	1.547.000,00	1	8635	0,548	1.942,00	1	49,16	1423	11.600
33	PB-079/003	78,36	2	1,80E+05	48.300,00	16.915.000,00	5	11.315.000,00	1	35439	0,597775	2.397,52	1	78,61	1923	8.050
34	PB-087/007	96,10	15	4,64E+04	-	40.349.000,00	5	8.001.000,00	1	32385	0,598925	3.097,32	0	70,43	469	20.700
35	PB-105/001	90,10	15	1,44E+05	-	13.094.000,00	5	7.760.000,00	1	27446	0,583685	2.458,23	0	71,09	2042	16.300
36	PB-393/003	63,25	0	3,59E+05	582.000,00	6.739.000,00	5	4.172.000,00	2	17838	0,595	2.251,00	3	29,96	1253	6.900
37	PB1-405/001	75,83	4	1,48E+05	144.780,00	13.013.000,00	5	42.309.000,00	1	75097	0,663622	2.953,23	1	32,68	1643	24.130
38	PB1-408/001	74,67	9	1,31E+05	28.000,00	3.783.000,00	5	9.170.000,00	2	17129	0,565	2.292,00	2	80,33	1942	1.867
39	PB-420/001	66,72	0	5,18E+05	94.500,00	2.074.000,00	1	1.631.000,00	1	8218	0,577	2.349,00	2	55,58	1763	6.300
40	PB-420/003	67,14	0	5,08E+05	84.000,00	2.074.000,00	1	1.631.000,00	1	8218	0,577	2.349,00	2	62,16	1153	5.600

#### 7.4.1 Priorização em Nível de Rede para a Malha Rodoviária da Paraíba

A Tabela 37 apresenta o comparativo entre resultados da análise multicriterial pelo método PROMETHEE II, da Classificação do *PCR* e da análise Benefício/Custo.

A hierarquização do *PCR* foi feita de forma crescente, ou seja, quanto menor o *PCR*, maior seria a necessidade de intervenção.

Para a análise Benefício/Custo, quanto maior esta relação, maior é a prioridade de intervenção do trecho rodoviário. O método de cálculo da razão Benefício/Custo seguiu o seguinte procedimento:

$$\text{Benefício/Custo} = CM(\text{R}\$) / [(PCI_0 - PCI_{\text{atual}}) \cdot VDM] \quad (63)$$

Onde:

- *CM* é o custo de manutenção do pavimento associado ao valor do *PCR<sub>atual</sub>* do trecho rodoviário (ver Tabela 36);
- *PCR<sub>atual</sub>* é *PCR* calculado com o modelo de previsão de desempenho para o ano de análise;
- *PCR<sub>0</sub>* é o *PCR* calculado com o modelo de previsão de desempenho para a situação logo após a aplicação intervenção sugerida na Árvore de Decisão da Figura 43; e
- *VDM* é o Volume Diário Médio de veículos que circula no trecho rodoviário.

Para o caso do trecho rodoviário PB-041/007, a relação Benefício/Custo foi calculada da seguinte forma (os demais resultados encontram-se no Apêndice IX):

$$VDM = 4839 \ ; \ PCI_0 = 97,8 \ ; \ PCI_{\text{atual}} = 82,4 \ ; \ CM = \text{R}\$ 46.800,00$$

$$\text{Benefício/Custo} = [(PCI_0 - PCI_{\text{atual}}) \cdot VDM] / CM(\text{R}\$)$$

∴

$$\text{Benefício/Custo} = [(97,8 - 82,4) \cdot 4839] / 46.800,00 = 1,5953$$

Tabela 37: Comparativo de métodos de priorização em nível de rede na Paraíba.

Nº	PROMETHEE II	Classificação do PCR	Benefício/Custo
1	PB-073/001 <sup>(1)</sup>	PB-393/003 <sup>(1)</sup>	PB-041/007(*)
2	PB-004/007 <sup>(2)</sup>	PB-420/001 <sup>(II)</sup>	PB-073/003(**)
3	PB-018/001 <sup>(3)</sup>	PB-420/003 <sup>(III)</sup>	PB-018/005(***)
4	PB-420/001 <sup>(II)</sup>	PB-018/001 <sup>(3)</sup>	PB-004/005
5	PB-073/011	PB-073/011	PB-079/003
6	PB-420/003 <sup>(III)</sup>	PB-004/007 <sup>(2)</sup>	PB-079/001
7	PB-073/003(**)	PBT-408/001	PB-073/011
8	PB-393/003 <sup>(1)</sup>	PBT-405/001	PB-073/001 <sup>(1)</sup>
9	PB-079/003	PB-073/001 <sup>(1)</sup>	PBT-408/001
10	PBT-408/001	PB-073/003(**)	PB-018/001 <sup>(3)</sup>
11	PB-041/007(*)	PB-073/021	PB-073/021
12	PBT-405/001	PB-073/007	PB-420/001 <sup>(II)</sup>
13	PB-073/021	PB-079/003	PB-420/003 <sup>(III)</sup>
14	PB-073/007	PB-325/005	PB-073/007
15	PB-004/005	PB-079/001	PB-018/003
16	PB-079/001	PB-325/011	PB-004/007 <sup>(2)</sup>
17	PB-018/003	PB-041/007(*)	PBT-405/001
18	PB-325/005	PB-018/003	PB-325/005
19	PB-018/005(***)	PB-004/005	PB-393/003 <sup>(1)</sup>
20	PB-105/001	PB-018/005(***)	PB-325/011
21	PB-325/011	PB-105/001	PB-065/001
22	PB-065/001	PB-065/001	PB-087/007
23	PB-087/007	PB-087/007	PB-105/001

Observa-se nas hierarquizações apresentadas na Tabela 37 que os métodos analisados não mantêm correspondência entre si. As priorizações foram bem distintas, principalmente quando observam-se os três primeiros trechos rodoviários na hierarquização de cada método.

No método de Classificação do PCR o trecho rodoviário prioritário foi o PB-393/003. Contudo, devido à sua menor representação econômica e de tráfego, o método PROMETHEE II o classificou como 8º em prioridade, e no método Benefício/Custo ele ficou apenas em 19º.

O trecho rodoviário PB-041/007 foi o prioritário no método Benefício/Custo, enquanto que no PROMETHEE II ele foi o 13º e na Classificação do PCR ele foi o 11º.

O Método PROMETHEE II colocou o trecho PB-073/001 como prioritário na hierarquização, devido ao *PCR* já estar próximo a 75 (limite para intervenções), além de ter um Custo de Manutenção relativamente baixo comparando aos demais trechos rodoviários analisados. Além disso, as características econômicas da região servida exigem boas condições da rodovia, além de atender uma população considerável (53.562 pessoas), mas com baixo IDH (0,556). Ainda, a necessidade de extração de recursos minerais para a realização da intervenção é baixa (1). Este trecho rodoviário também possui um tráfego diário considerado intenso segundo classificação do DNIT (VDM igual a 3.026).

O cenário proposto para aplicação do método PROMETHEE II conduziu a um resultado aproximado ao desejado pelo Órgão Rodoviário, devido aos critérios técnicos reunirem 60% dos pesos na decisão. Os interesses diversos (representando os diversos setores da sociedade) se distribuíram nos demais 40% dos pesos.

O cenário estabelecido para o método multicriterial do PROMETHEE II atuou também como ferramenta para promover desenvolvimento. Exemplo disto foi a escolha do trecho PB-004/007 como 2º na priorização, trecho este localizado em região com índices sociais insatisfatórios (IDH igual a 0,554), enquanto que no método Benefício/Custo este trecho teve a 16ª colocação.

Toda esta estrutura lógica para análise de diferentes critérios na priorização só tornou-se possível com a formalização por método multicriterial.

#### 7.4.2 Priorização em Nível de Rede para a Malha Rodoviária do Ceará

A Tabela 38 apresenta o comparativo entre resultados da análise multicriterial pelo método PROMETHEE II, da Classificação do *PCR* e da análise Benefício/Custo no estado do Ceará.

Excetuando-se a boa correspondência entre os três primeiros trechos rodoviários na hierarquização de cada método analisado, os demais resultados não foram semelhantes entre si.

A consideração de multicritérios realizada pelo método PROMETHEE II, conforme aconteceu com os trechos rodoviários da Paraíba, também forneceu uma ótica diferente para a tomada de decisão, considerando, além de critérios técnico-financeiros, critérios econômicos, sociais, ambientais e de transporte.

Tabela 38: Comparativo de métodos de priorização em nível de rede no Ceará.

Nº	PROMETHEE II	Classificação do PCR	Benefício/Custo
1	354ECE0210 <sup>(1<sup>II</sup>)</sup>	040ECE0030D <sup>(2<sup>1,**</sup>)</sup>	060ECE0170D <sup>(3<sup>**</sup>)</sup>
2	040ECE0030D <sup>(2<sup>1,**</sup>)</sup>	354ECE0210 <sup>(1<sup>II</sup>)</sup>	040ECE0030D <sup>(2<sup>1,**</sup>)</sup>
3	060ECE0170D <sup>(3<sup>**</sup>)</sup>	187ECE0370 <sup>(III)</sup>	040ECE0090D <sup>(***)</sup>
4	187ECE0370 <sup>(III)</sup>	060ECE0170D <sup>(3<sup>**</sup>)</sup>	065ECE0050D
5	261ECE0030	371ECE0330	085ECE0090
6	359ECE0010	261ECE0030	065ECE0030D
7	085ECE0090	366ECE0190	261ECE0030
8	085ECE0530	168ECE0370	359ECE0010
9	040ECE0090D <sup>(***)</sup>	085ECE0530	261ECE0090
10	371ECE0330	359ECE0010	085ECE0530
11	065ECE0050D	085ECE0570	187ECE0370 <sup>(III)</sup>
12	366ECE0190	341ECE0130	085ECE0570
13	085ECE0570	261ECE0090	354ECE0210 <sup>(1<sup>II</sup>)</sup>
14	261ECE0090	040ECE0090D <sup>(***)</sup>	371ECE0330
15	168ECE0370	085ECE0090	168ECE0370
16	065ECE0030D	065ECE0050D	341ECE0130
17	341ECE0130	065ECE0030D	366ECE0190

Um fator interessante foi a priorização, pelo método PROMETHEE II, ao trecho rodoviário 354ECE0210. A intervenção neste trecho rodoviário não proporciona um bom Benefício/Custo (conforme evidenciado pela 13<sup>a</sup> colocação neste método), porém o baixo valor atual do PCR e as demais características técnicas, as características agrícolas da região, a população alta e o PIB *per capita* baixo, além das características de transporte, colocaram este trecho como prioritário pelo método PROMETHEE II.

O Fluxo de Importância Líquido de preferência ( $\phi$ ) do método PROMETHEE II, calculado pela diferença entre os fluxos de importância positivo e negativo (ver Capítulo 5), realizou uma boa distinção entre os trechos rodoviários no processo de hierarquização. Isto tornou possível a utilização deste método na priorização de intervenção em Sistema de Gerência de Pavimentos.

## 7.5 OTIMIZAÇÃO EM NÍVEL DE PROJETO

A Otimização em Nível de Projeto foi realizada aplicando-se o método de Análise Multicriterial PROMETHEE II. Os critérios utilizados na análise estão descritos no Capítulo 6, constituindo 2 categorias diferentes (Financeira e Técnica).

Os dois primeiros trechos rodoviários na priorização em nível de rede do Ceará e da Paraíba foram analisados também em nível de projeto, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do PROMETHEE II como método de otimização de intervenções em pavimentos.

Foram previstos o *IRI* e o *PCR*, através dos modelos de previsão de desempenho elaborados nesta tese, para o ano da análise (2007 para o Ceará e 1996 para a Paraíba). Com estes dados foi aplicada a Árvore de Decisão da Figura 41 para definir o elenco de intervenções aplicáveis ao pavimento.

Para cada estratégia elencada para análise, foram recalculados os valores de *S* e *N* para processar a análise de desempenho do *PCR* nos 10 anos de análise (ressalta-se que o valor de *PCR* foi utilizado em detrimento ao *IGG*, apenas pelo fato de consistir em um parâmetro mundialmente utilizado – isto não teve objetivo de validação do modelo).

Para o final do período de análise (10 anos), foram previstos por modelos de desempenho o *IRI*, a  $DO_{FWD}$  e o *PCR*, e calculado o *CCV* (Custo do Ciclo de Vida) para cada estratégia analisada. Estes dados foram utilizados na análise multicriterial pelo método PROMETHEE II para otimização. Os custos de manutenção foram calculados utilizando a Tabela 14 e tabelas do sistema SICRO II<sup>6</sup> do DNIT.

### 7.5.1 Otimização em Nível de Projeto para Alguns Trechos da Malha Rodoviária da Paraíba

A Tabela 39 apresenta os valores de *IRI* e *PCR* no ano de 1996, e as estratégias de manutenção do pavimento capazes de manter o *PCR* do trecho rodoviário acima de 75 no período de análise (10 anos). Ressalta-se que quando o *PCR* atingiu valor menor que 75 dentro do período de análise, foi projetada a aplicação de lama asfáltica ao pavimento, sendo

---

<sup>6</sup> Tabelas de composições e custos para pavimentação, disponível na *web* em [www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br)

esta capaz de restituir o  $PCR$  a condição inicial ( $N_{acum} = 0$ ). Entende-se que o  $IRI$  e o  $Do_{FWD}$  não são alterados pela aplicação de lama asfáltica ao pavimento.

Tabela 39: Elenco de estratégias de manutenção em nível de projeto (estado da Paraíba).

<b>PB-073/001: <math>IRI_o = 3,76</math> m/km e <math>PCR_o = 77</math></b>										
<b>Ano de Análise</b>										
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
ND	C1									
(LA)	C2									
(TSD)	C2									
(TST)	C2									
(RE-3cm)	C2									
(RE-5cm)	C2									
<b>PB-004/007: <math>IRI_o = 4,67</math> m/km e <math>PCR_o = 74</math></b>										
<b>Ano de Análise</b>										
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
ND	C1									
(LA)	C2	LA								
(TSD)	C2	LA								
(TST)	C2	LA								
(RE-3cm)	C2									
(RE-5cm)	C2									

C1 = conserva pesada

C2 = conserva leve

(RE-Xcm) = concreto asfáltica na espessura X

LA = lama asfáltica

ND = nada a fazer

TSD = tratamento superficial duplo

TST = tratamento superficial triplo

O detalhamento de cálculo dos valores de  $SNC$  para o ano inicial de análise das estratégias de manutenção é apresentado na Tabela 40. Para o caso do trecho PB-073/001, revestido em mistura asfáltica, foi considerada a queda de serventia da mistura pela redução do seu módulo de elasticidade, sendo mais acentuada para o caso da estratégia nada a fazer. Nesta mesma tabela também apresentam-se as datas de intervenção do pavimento, o  $N_{anual}$ , o  $N_{acum}$  e os parâmetros de desempenho ( $IRI$ ,  $Do_{FWD}$  e  $PCR$ ) previstos para o final do período de análise (2006).

Tabela 40: Detalhamento dos cálculos para previsão de desempenho na análise em nível de projeto (trechos rodoviários da Paraíba).

**PB-073/001:**

Estratégia de Manutenção	Estrutura Existente										SNC <sup>(1)</sup>	Previsão de Desempenho para deflexão e irregularidade			Previsão de Desempenho para PCR <sup>(2)</sup>							
	Revestimento		Base			Sub-Base Granular				N <sub>anual</sub>		N <sub>acum</sub>	Do FWD	IRI	Idade da Capa	N <sub>acum</sub>	PCR					
	Material	H <sub>REV</sub> (cm)	E <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	CBR (%)	a <sub>2</sub>	H <sub>BASE</sub> (cm)									CBR (%)	a <sub>3</sub>	CBR <sub>SL</sub> (%)		
																					Material	H <sub>REV</sub> (cm)
ND	-0.5	CBUQ	5.0	1000	0,098	SNAT	20.0	93	0,054	20.0	42	0,045	6	3,27	5,23E+05	21	1,35E+07	45	4,91	21	1,35E+07	64
(LA)	-0.5	CBUQ	5.0	2000	0,145	SNAT	20.0	93	0,054	20.0	42	0,045	6	3,54	6,50E+05	10	7,12E+06	40	3,90	10	7,12E+06	75
(TSD)	-0.5	CBUQ	5.0	2000	0,145	SNAT	20.0	93	0,054	20.0	42	0,045	6	3,60	6,50E+05	10	7,12E+06	39	3,89	10	7,12E+06	75
(TST)	-0.5	CBUQ	5.0	2000	0,145	SNAT	20.0	93	0,054	20.0	42	0,045	6	3,62	6,50E+05	10	7,12E+06	39	3,88	10	7,12E+06	75
(RE-3cm)	-0.5	CBUQ	5.0	2000	0,145	SNAT	20.0	93	0,054	20.0	42	0,045	6	4,13	6,50E+05	10	7,12E+06	36	3,78	10	7,12E+06	76
(RE-5cm)	-0.5	CBUQ	5.0	2000	0,145	SNAT	20.0	93	0,054	20.0	42	0,045	6	4,54	6,50E+05	10	7,12E+06	34	3,69	10	7,12E+06	77

**PB-004/007:**

Estratégia de Manutenção	Estrutura Existente										SNC <sup>(1)</sup>	Previsão de Desempenho para deflexão e irregularidade			Previsão de Desempenho para PCR <sup>(2)</sup>							
	Revestimento		Base			Sub-Base Granular				N <sub>anual</sub>		N <sub>acum</sub>	Do FWD	IRI	Idade da Capa	N <sub>acum</sub>	PCR					
	Material	H <sub>REV</sub> (cm)	E <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	CBR (%)	a <sub>2</sub>	H <sub>BASE</sub> (cm)									CBR (%)	a <sub>3</sub>	CBR <sub>SL</sub> (%)		
																					Material	H <sub>REV</sub> (cm)
ND	-0.5	TSD	2.5	-	0,040	SNAT	20.0	58	0,044	20.0	40	0,045	4	2,26	2,26E+05	22	6,16E+06	56	5,25	22	6,16E+06	61
(LA)	-0.5	TSD	2.5	-	0,040	SNAT	20.0	58	0,044	20.0	40	0,045	4	2,30	2,86E+05	10	3,13E+06	49	4,66	0	0,00E+00	87
(TSD)	-0.5	TSD	2.5	-	0,040	SNAT	20.0	58	0,044	20.0	40	0,045	4	2,36	2,86E+05	10	3,13E+06	49	4,63	0	0,00E+00	87
(TST)	-0.5	TSD	2.5	-	0,040	SNAT	20.0	58	0,044	20.0	40	0,045	4	2,38	2,86E+05	10	3,13E+06	49	4,62	0	0,00E+00	87
(RE-3cm)	-0.5	TSD	2.5	-	0,040	SNAT	20.0	58	0,044	20.0	40	0,045	4	2,88	2,86E+05	10	3,13E+06	42	3,44	10	3,13E+06	81
(RE-5cm)	-0.5	TSD	2.5	-	0,040	SNAT	20.0	58	0,044	20.0	40	0,045	4	3,30	2,86E+05	10	3,13E+06	39	3,36	10	3,13E+06	82

<sup>(1)</sup> SNC calculado considerando a queda de serventia da mistura asfáltica e considerando a estrutura adicionada. Para a estrutura adicionada em Concreto Asfáltico, o Módulo de Resiliência foi considerado superando os 3000 MPa limite (Ullidtz, 1998), pois entende-se que as misturas asfálticas atuais têm desempenho superior.

<sup>(2)</sup> Para o cálculo do PCR, o pavimento sempre é rejuvenecido com a aplicação de lama asfáltica, portanto a idade da capa é calculada considerando o ano de aplicação de LA de acordo com a Tabela 39.

A contabilização dos custos do ciclo de vida para os trechos rodoviários PB-073/001 e PB-004/007 são apresentados nos gráficos da Figura 67.

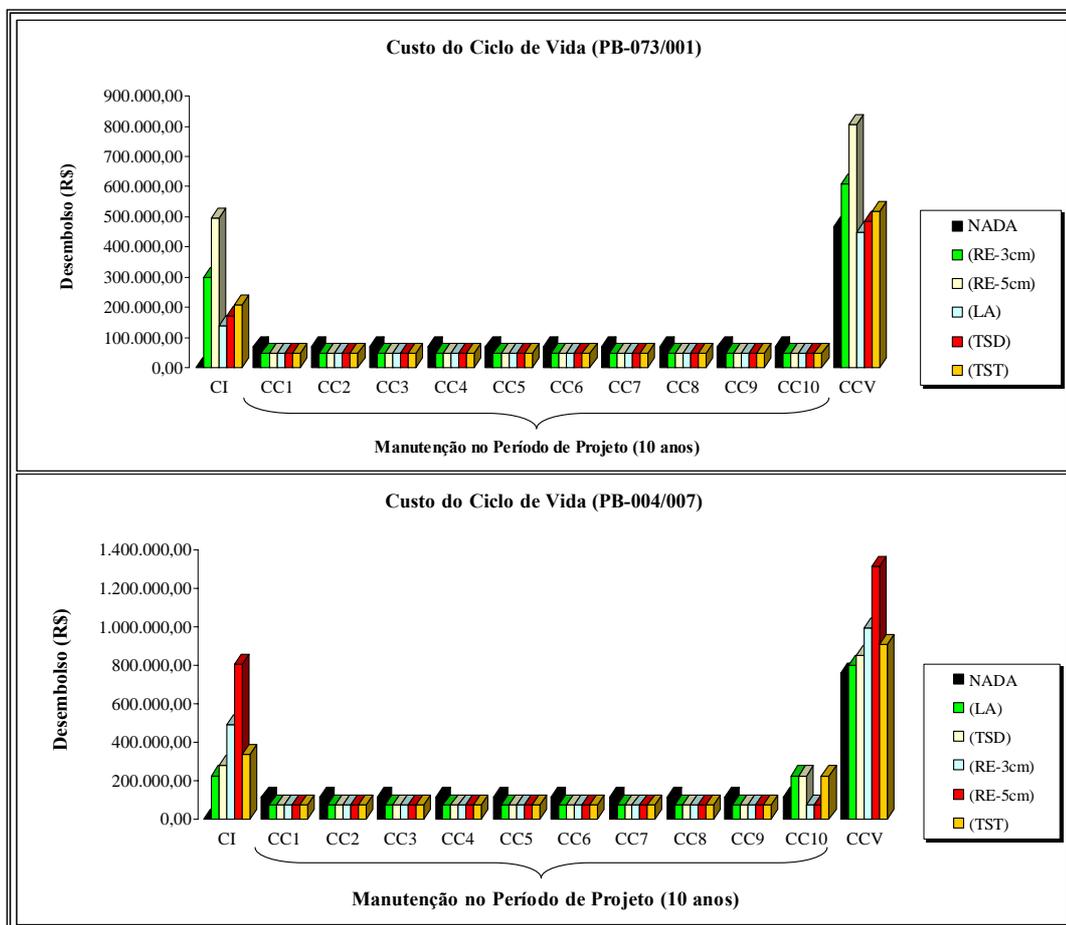


Figura 67: Gráfico do *CCV* (período de análise de 10 anos) para estratégias elencadas em trechos rodoviários da Paraíba.

Os dados para análise multicriterial, com a ferramenta PROMETHEE II, na análise em nível de projeto, incluindo as funções preferência, os parâmetros da função, e o *CCV*, o *IRI*, o *Do<sub>FWD</sub>* e o *PCR* previstos para o final do período de análise (2006), estão apresentados nas Tabelas 41 e 42, respectivamente, para os trechos rodoviários PB-073/001 e PB-004/007 da Paraíba.

Tabela 41: Previsões realizadas para o trecho PB-073/001 e funções preferência.

<b>Itens</b>	<b>CCV</b>	<b>IRI</b>	<b>PCR</b>	<b>Do<sub>FWD</sub></b>
Min/Max	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Minimizar
Peso	50	16,67	16,67	16,66
Função Preferência	V-Shape	V-Shape	V-Shape	V-Shape
<i>r</i> (parâmetro da função)	5000.000,00	0,40	5	5
Performance Média	555.324,69	4,01	74	39
Desvio Padrão	135.152,70	0,45	4,9	3,8
Unidade	R\$	m/km	-	0,01 mm
ND	466.372,64	4,91	64	45
(LA)	448.915,10	3,90	75	40
(TSD)	483.415,10	3,89	75	39
(TST)	517.915,10	3,88	75	39
(RE-3cm)	609.915,10	3,78	76	36
(RE-5cm)	805.415,10	3,69	77	34

Tabela 42: Previsões realizadas para o trecho PB-004/007 e funções preferência.

<b>Itens</b>	<b>CCV</b>	<b>IRI</b>	<b>PCR</b>	<b>Do<sub>FWD</sub></b>
Min/Max	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Minimizar
Peso	50	16,67	16,67	16,66
Função Preferência	V-Shape	V-Shape	V-Shape	V-Shape
<i>r</i> (parâmetro da função)	5000.000,00	0,40	5	5
Performance Média	939.727,30	4,33	81	47
Desvio Padrão	202.581,90	0,76	9,9	6,1
Unidade	R\$	m/km	-	0,01 mm
ND	762.417,90	5,25	61	56
(LA)	797.662,90	4,66	87	49
(TSD)	854.062,90	4,63	87	49
(TST)	910.462,90	4,62	87	49
(RE-3cm)	997.078,60	3,44	81	42
(RE-5cm)	1.316.679,00	3,36	82	39

As hierarquizações resultantes para as estratégias analisadas nos dois trechos rodoviários estão apresentadas na Figura 68. Nesta mesma figura são apresentados os resultados do Fluxo de Importância Líquido de preferência ( $\phi$ ), que define a hierarquização do processo.

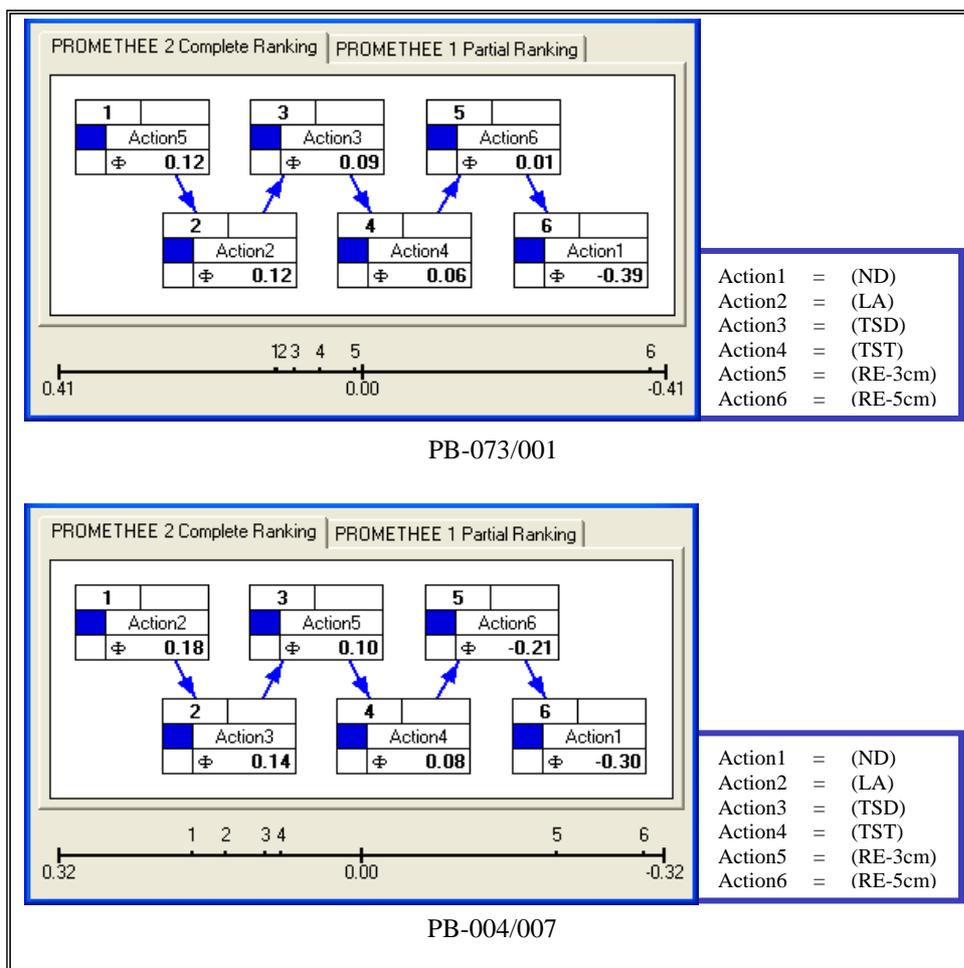


Figura 68: Hierarquização para os trechos rodoviários da Paraíba (nível de projeto).

No trecho PB-073/001 a estratégia “Revestimento Asfáltico de 3cm (RE-3cm)” se mostrou mais eficiente que as demais. Para o trecho PB-004/007 foi a estratégia “Lama Asfáltica (LA)”. De fato, o segundo melhor desempenho estrutural e funcional da estratégia RE-3cm para o trecho PB-073/001, a um *CCV* menor que a estratégia RE-5cm, foi o responsável pela sua primeira colocação na otimização. Para o trecho PB-004/007, o segundo *CCV* mais baixo do “LA”, mas com desempenho funcional e estrutural bem melhor que a estratégia ND, foi decisivo na otimização.

## 7.5.2 Otimização em Nível de Projeto para Alguns Trechos da Malha Rodoviária do Ceará

A Tabela 43 apresenta os valores de *IRI* e *PCR* no ano de 2007, e as estratégias de manutenção do pavimento capazes de manter o *PCR* dos trechos rodoviários 354ECE0210 e 040ECE0030D acima de 75 no período de análise (10 anos).

Tabela 43: Elenco de estratégias de manutenção em nível de projeto (estado do Ceará).

<b>354ECE0210: <math>IRI_o = 5,31</math> m/km e <math>PCR_o = 65</math></b>										
<b>Ano de Análise</b>										
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
ND	C1									
(RP)	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	LA	C2	C2
(TSD)	C2	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	C2	LA
(TST)	C2	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	C2	LA
(RE-3cm)	C2									
(RE-5cm)	C2									
<b>040ECE0030D: <math>IRI_o = 7,07</math> m/km e <math>PCR_o = 40</math></b>										
<b>Ano de Análise</b>										
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
ND	C1									
(RRT)-igual	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	LA	C2	C2
(MH+BG+RE)	ND	C2	C2	C2	LA	ND	C2	C2	C2	LA
(REC+RE)	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	LA	C2	C2
(CI+RE)	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	LA	C2	C2
(Geo+RE)(RP)	C2	C2	C2	LA	C2	C2	C2	LA	C2	C2

C1 = conserva pesada

C2 = conserva leve

(RE-Xcm) = concreto asfáltica na espessura X

LA = lama asfáltica

ND = nada a fazer

TSD = tratamento superficial duplo

TST = tratamento superficial triplo

(RRT)-igual = reconstrução total com estrutura

idêntica a existente

(MH+BG+RE) = estrutura de macadame hidráulico + brita graduada + revestimento em concreto asfáltico acima do pavimento existente

(REC+RE) = reciclagem do revestimento existente + revestimento em concreto asfáltico

(CI+RE) = estrutura de camada granular intermediária + revestimento em concreto asfáltico acima do pavimento existente

(Geo+RE)(RP) = remendos profundos em camada asfáltica existente + colocação de geotêxtil + revestimento em concreto asfáltico

Conforme também foi feito para os trechos rodoviários da Paraíba, quando o *PCR* atingiu valor menor que 75 dentro do período de análise, foi projetada a aplicação de lama asfáltica ao pavimento, sendo esta capaz de restituir o *PCR* a condição inicial ( $N_{acum} = 0$ ). Os valores de *IRI* e  $DO_{FWD}$  não são alterados pela aplicação de lama asfáltica ao pavimento, portanto o  $N_{acum}$  é referente ao período de 10 anos.

Os cálculos dos valores de *SNC* para o ano inicial de análise das estratégias de manutenção são apresentados na Tabela 44. Para o caso do trecho 040ECE0030D, revestido em mistura asfáltica, foi considerada a queda de serventia da mistura pela redução do seu módulo de resiliência, sendo mais acentuada para o caso da estratégia nada a fazer. Nesta mesma tabela também apresentam-se as datas de intervenção do pavimento, o  $N_{anual}$ , o  $N_{acum}$  e os parâmetros de desempenho (*IRI*,  $DO_{FWD}$  e *PCR*) previstos para o final do período de análise (2017).

A contabilização dos custos do ciclo de vida para os trechos rodoviários 354ECE0210 e 040ECE0030D são apresentados nos gráficos da Figura 69.

Os dados para análise multicriterial, com a ferramenta PROMETHEE II, na análise em nível de projeto, incluindo as funções preferência, os parâmetros da função, e o *CCV*, o *IRI*, o  $DO_{FWD}$  e o *PCR* previstos para o final do período de análise (2017), estão apresentados nas Tabelas 45 e 46, respectivamente, para os trechos rodoviários 354ECE0210 e 040ECE0030D do Ceará.

As hierarquizações resultates para as estratégias analisadas nos dois trechos rodoviários estão apresentadas na Figura 70.

A estratégia “Tratamento Superficial Duplo (TSD)” foi a opção otimizada na Análise Multicriterial para o trecho rodoviário 354ECE0210. Esta estratégia não reuniu preferência total sobre qualquer dos critérios, porém foi a terceira de menor custo, quarta em deflexão e irregularidade e segunda em *PCR*. Estas características medianas conferiram o maior Fluxo de Importância Líquido de Preferência ( $\phi$ ) para o cenário estabelecido.

Para o trecho rodoviário 040ECE0030D, a estratégia de manutenção que melhor atendeu ao cenário estabelecido foi a aplicação de “Macadame Hidráulico + Base de Brita Graduada + Revestimento em Concreto Asfáltico (MH+BG+RE)”. Esta estratégia apresentou o terceiro maior custo do ciclo de vida entre as analisadas, porém é a que confere melhor desempenho funcional e estrutural ao pavimento.

Tabela 44: Detalhamento dos cálculos para previsão de desempenho na análise em nível de projeto (trechos rodoviários do Ceará).

**354ECE0210:**

Estratégia de Manutenção	Estrutura Existente										Estrutura Adicionada										SNC <sup>(1)</sup>	N <sub>anul</sub>	Previsão de Desempenho para deflexão e irregularidade				Previsão de Desempenho para PCR <sup>(2)</sup>			
	Revestimento					Base					E <sub>su</sub> (Mpa)	Material	H (cm)	E (Mpa)	a <sub>3</sub>	Material	H (cm)	E (Mpa)	a <sub>4</sub>	Material			H (cm)	E (Mpa)	IRI	Do <sub>F110</sub>	Idade da Capa	N <sub>ocum</sub>	PCR	
	Material	H <sub>REV</sub> (cm)	E <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>		Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	E <sub>BASE</sub> (Mpa)	a <sub>2</sub>																					Material
NADA	0.0	TSD	1.0	-	0.040	SEG	25.0	148	0.040	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	9.41E+06	67	6.45	20	9.41E+06	44	
(RP)	0.0	TSD	1.0	-	0.040	SEG	25.0	148	0.040	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	7.54E+06	63	6.01	2	9.54E+05	78	
(TSD)	0.0	TSD	1.0	-	0.040	SEG	25.0	148	0.040	85	TSD	2.5	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5.17E+06	57	5.43	0	0.00E+00	82	
(TST)	0.0	TSD	1.0	-	0.040	SEG	25.0	148	0.040	85	TST	3	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5.17E+06	56	5.41	0	0.00E+00	83	
(RE-3cm)	0.0	TSD	1.0	-	0.040	SEG	25.0	148	0.040	85	CA	3.0	4000	0.193	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5.17E+06	45	3.88	10	5.17E+06	75	
(RE-5cm)	0.0	TSD	1.0	-	0.040	SEG	25.0	148	0.040	85	CA	5.0	5000	0.208	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5.17E+06	42	3.78	10	5.17E+06	76	

**040ECE0030D:**

Material    E<sub>REV</sub> (Mpa)    a<sub>1</sub>    Material    H<sub>BASE</sub> (cm)    E<sub>BASE</sub> (Mpa)

BASE

<sup>(1)</sup> SNC calculado considerando a queda de serventia da mistura asfáltica e considerando a estrutura adicionada. Para a estrutura adicionada em Concreto Asfáltico, o Módulo de Resiliência foi considerado superando os 3000 MPa limite (Ullidtz, 1998), pois entende-se que as misturas asfálticas atuais têm desempenho superior.

<sup>(2)</sup> Para o cálculo do PCR, o pavimento sempre é rejuvenecido com a aplicação de lama asfáltica, portanto a idade da capa é calculada considerando o ano de aplicação de LA de acordo com a Tabela 43.

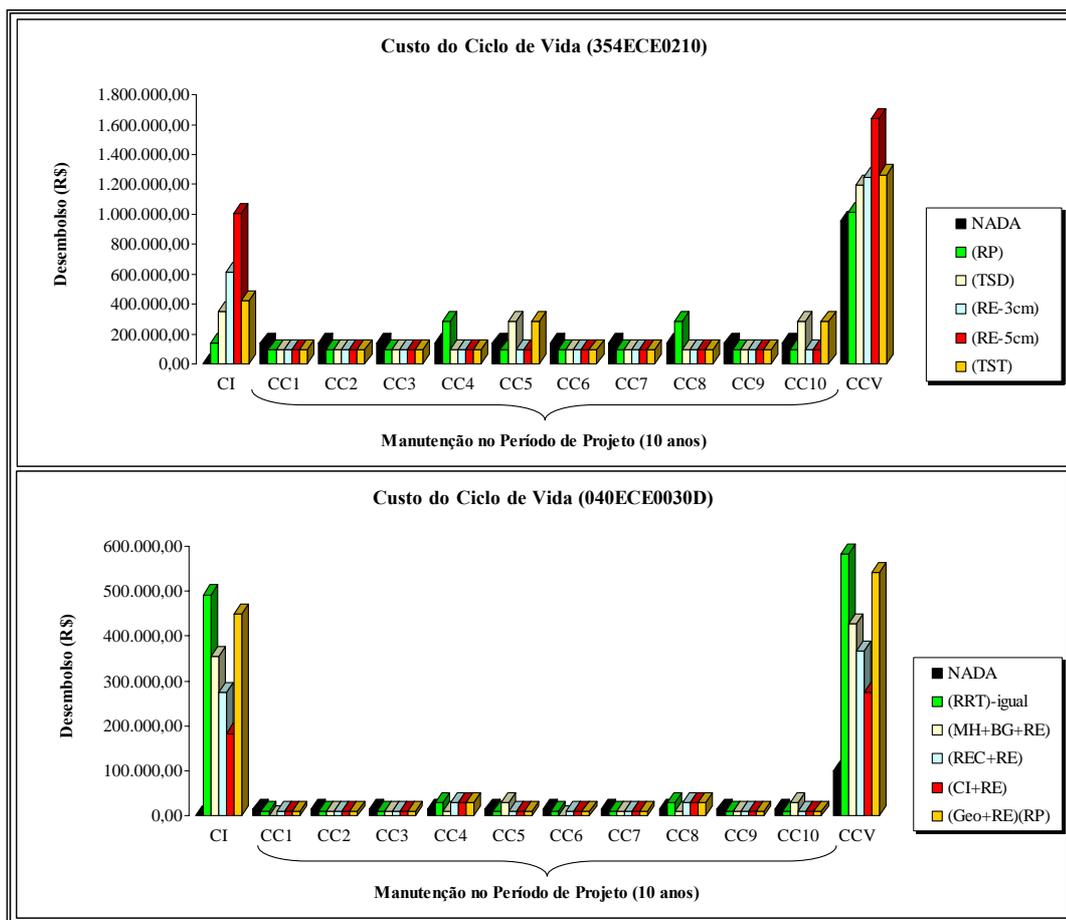


Figura 69: Gráfico do *CCV* (período de análise de 10 anos) para estratégias elencadas em trechos rodoviários do Ceará.

As distinções nas otimizações realizadas pelo método PROMETHEE II nas análises da Paraíba e do Ceará (escolheram estratégias que reuniam condições medianas de custo e desempenho) constituem um grande benefício da utilização do método multicriterial. Todas essas informações são de difícil avaliação por métodos tradicionais. A determinação de cenários diferentes, com a variação dos pesos preferenciais dos critérios, contemplaria uma gama de novos resultados, de acordo com o interesse do tomador de decisão.

Tabela 45: Previsões realizadas para o trecho 354ECE0210 e funções preferência.

<b>Itens</b>	<b>CCV</b>	<b>IRI</b>	<b>PCR</b>	<b>Do<sub>FWD</sub></b>
Min/Max	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Minimizar
Peso	50	16,67	16,67	16,66
Função Preferência	V-Shape	V-Shape	V-Shape	V-Shape
<i>r</i> (parâmetro da função)	5000.000,00	0,40	5	5
Performance Média	1.218.267,87	5,16	73	55
Desvio Padrão	243.915,06	1,10	14,7	9,5
Unidade	R\$	m/km	-	0,01 mm
ND	951.440,75	6,45	44	67
(RP)	1.012.386,22	6,01	78	63
(TSD)	1.194.000,29	5,43	82	57
(TST)	1.264.383,29	5,41	83	56
(RE-3cm)	1.244.279,83	3,88	75	45
(RE-5cm)	1.643.116,83	3,78	76	42

Tabela 46: Previsões realizadas para o trecho 040ECE0030D e funções preferência.

<b>Itens</b>	<b>CCV</b>	<b>IRI</b>	<b>PCR</b>	<b>Do<sub>FWD</sub></b>
Min/Max	Minimizar	Minimizar	Maximizar	Minimizar
Peso	50	16,67	16,67	16,66
Função Preferência	V-Shape	V-Shape	V-Shape	V-Shape
<i>r</i> (parâmetro da função)	5000.000,00	0,40	5	5
Performance Média	382.354,09	7,38	71	43
Desvio Padrão	178.621,32	1,78	35,4	13,9
Unidade	R\$	m/km	-	0,01 mm
ND	99.763,19	10,98	0	69
(RRT)-igual	583.393,62	6,88	82	45
(MH+BG+RE)	427.816,87	6,23	96	28
(REC+RE)	366.913,62	6,70	84	39
(CI+RE)	274.663,62	6,64	84	37
(Geo+RE)(RP)	541.573,62	6,83	82	43

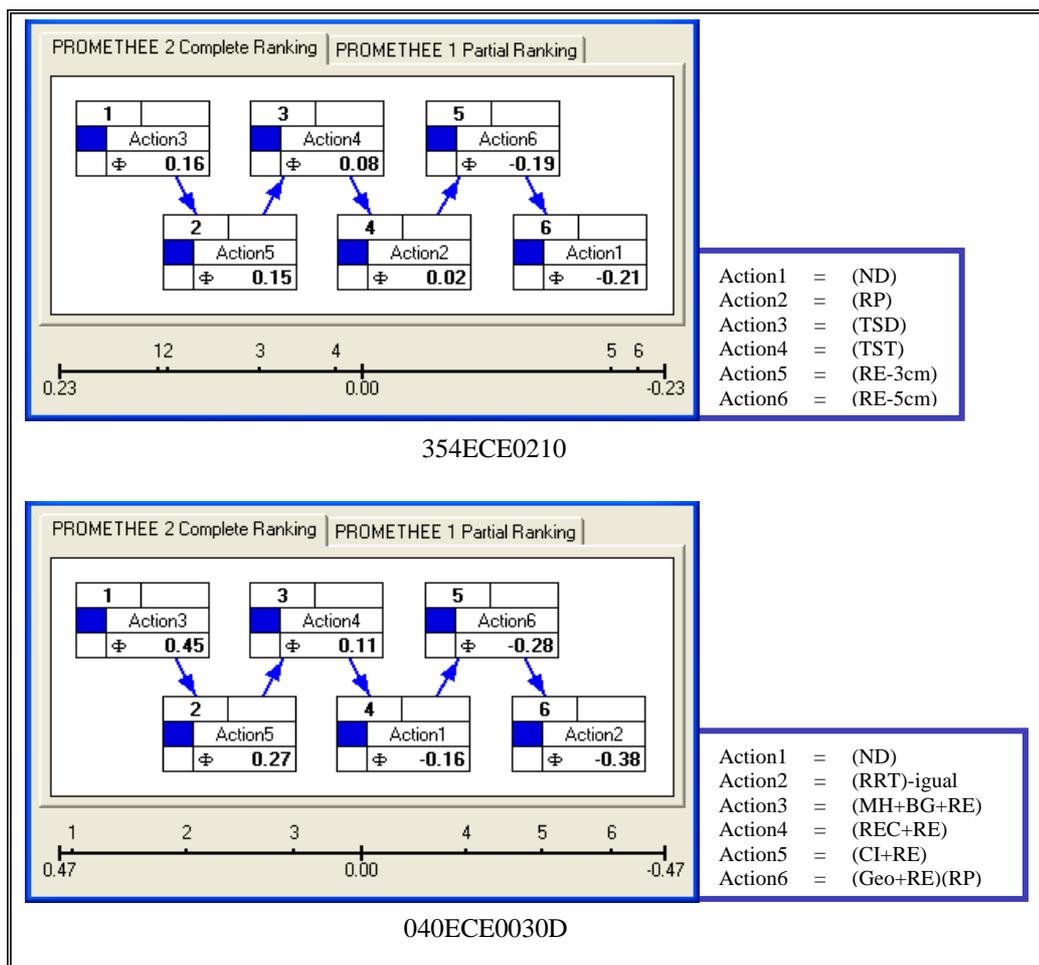


Figura 70: Hierarquização para os trechos rodoviários do Ceará (nível de projeto).

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta tese foi elaborada a estruturação técnica dos componentes de Sistema de Gerência de Pavimentos para a infra-estrutura rodoviária de estados do Nordeste. Foram utilizados dados cadastrais de rodovias estaduais da Paraíba e do Ceará e bancos de dados de monitoramentos realizados pelos Órgãos Rodoviários DER-PB e DERT-CE.

A partir destes dados foi possível realizar um diagnóstico das duas malhas rodoviárias estaduais, referente ao ano da realização dos monitoramentos, e avaliar os principais mecanismos de degradação de seus pavimentos.

Ferramentas da Geoestatística, como variograma e krigagem, foram aplicadas no dimensionamento de Unidades de Amostragem distribuídas pela malha rodoviária desses estados. Estas ferramentas proporcionaram descrever como os parâmetros de desempenho relacionados aos defeitos superficiais de pavimentos (*IGG* para a Paraíba e *PCR* para o Ceará) variavam espacialmente a partir de modelos ajustados aos variogramas de cada trecho rodoviário analisado. Estes modelos estabeleceram o chamado “alcance máximo” para o parâmetro de desempenho, o qual está diretamente relacionado à extensão de segmentos com mesmas características de degradação do pavimento. Amostragens com este espaçamento são capazes de fornecer o mesmo perfil médio de desempenho para o trecho rodoviário.

As Unidades de Amostragem foram dimensionadas com o principal objetivo de fornecer um mecanismo de otimização das campanhas de monitoramento das malhas rodoviárias para DER-PB e DERT-CE.

Em uma outra etapa da pesquisa foram elaborados modelos de previsão de desempenho para *PCR*, *IRI* e *DO<sub>FW</sub>D* no Ceará e para *IGG* e *DO<sub>VB</sub>* na Paraíba, tanto para revestimento em mistura asfáltica, quanto em tratamento superficial. Foram selecionadas variáveis independentes referentes à classificação climática, à capacidade estrutural e ao número de solicitações de cargas de tráfego.

A classificação climática foi representada pelo Índice de Aridez utilizado pela UNESCO, sendo introduzida nos modelos por variável codificada (*C*) em níveis variando de -1 a +1 de acordo com a categoria climática da localização do trecho rodoviário.

A capacidade estrutural dos pavimentos foi representada pelo número estrutural corrigido (*SNC*), introduzido nos modelos por variável codificada (*S*) classificada em níveis baixo, médio e alto.

O Número de Repetições do Eixo Padrão de 8,2t, calculado com fatores de carga da AASHTO, representou as solicitações de tráfego e idade do pavimento, sendo avaliado nos modelos por variável codificada (*N*) classificada em níveis baixo, médio e alto.

Os modelos de *PCR* foram elaborados por regressão linear múltipla e os modelos de *IGG*, *IRI*, *DO<sub>FWD</sub>* e *DO<sub>VB</sub>*

## 8.2 CONCLUSÕES

A estruturação técnica do Sistema de Gerência de Pavimentos foi estabelecida, avaliada e simulada. Foram dimensionadas Unidades de Amostragem, estabelecidos Modelos de Previsão de Desempenho para pavimentos asfálticos, Árvores de Decisão para nível de rede e projeto e estruturados cenários para priorização em nível de rede e otimização em nível de projeto, ambos por análise multicriterial.

Essas metodologias estabelecidas para as malhas rodoviárias do Ceará e Paraíba ainda não foram aplicadas pelos seus Órgãos Rodoviários, mas foram simuladas com a utilização de dados disponibilizados por estes.

Quanto à Estruturação de Banco de Dados:

- Foram estabelecidos bancos de dados para todos os trechos rodoviários do Ceará e para a amostra fornecida pelo DER/PB. Estes bancos de dados contêm cadastros das rodovias, características das camadas do pavimento e dados médios de *SNC*, *N<sub>acum</sub>*, idade da capa e dos monitoramentos realizados.
- Pelo fato destes bancos de dados conterem dados médios dos trechos rodoviários, são apropriados apenas para uso em Sistema de Gerência de Pavimentos, já que, para projetos de pavimentos, os dados pontuais são importantes.

Quanto ao Diagnóstico das Malhas Rodoviárias:

- Os trechos rodoviários analisados no estado da Paraíba já tinham idade da capa bastante avançada. Na data dos levantamentos, os revestimentos em Mistura Asfáltica estavam em média com 19,5 anos de uso e em Tratamento Superficial com 12 anos. O *IGG* médio da amostra estudada foi de 113, e o conceito de serventia da malha rodoviária era ruim. Apesar da idade avançada dos pavimentos, o número de solicitações acumuladas de tráfego não era muito alto, portanto este nível de degradação não estava totalmente relacionado às cargas de tráfego. O trincamento e desgaste do revestimento derivado do envelhecimento do ligante asfáltico, causado por exposição às altas temperaturas durante o dia e redução na temperatura do ar em até 20°C à noite, é possivelmente um fator importante na deterioração destes pavimentos.

- A malha rodoviária do Ceará sofreu uma grande intervenção no ano de 1996, portanto a idade dos revestimentos era homogênea na grande maioria dos trechos analisados. No monitoramento do *PCR*, a idade média era de 9 anos, onde a ação do envelhecimento do ligante já estava acontecendo. O desgaste na superfície dos pavimentos ainda não era tão intenso quanto os trincamentos. A ação de cargas de tráfego, principalmente na região metropolitana de Fortaleza, também foi um fator importante na degradação de pavimentos. Contudo, o conceito médio da malha foi bom, com *PCR* igual a 83.
- O *IRI* inicial dos pavimentos do Ceará era bastante alto, sendo indicador de falhas construtivas, principalmente quanto aos critérios de acabamento superficial de mistura asfáltica ou regularização da base para tratamentos superficiais. O acréscimo de irregularidade é causado pelas patologias do pavimento, principalmente remendos.

Quanto ao Dimensionamento de Unidades de Amostragem para Otimização de Campanhas de Monitoramento:

- Na aplicação das ferramentas da Geoestatística no dimensionamento de UAs para o *IGG* na Paraíba, foi constatado que o monitoramento de apenas 4,1% da extensão analisada seria capaz de fornecer os mesmos valores médios de *IGG* que as campanhas de monitoramento tradicionais, representando uma redução de custos com monitoramento de 82,4%. Por outro lado, os erros médios absolutos mostraram-se bastante elevados, provavelmente derivados do próprio método de cálculo do *IGG*. Portanto, a aplicação desta ferramenta ao *IGG* na Paraíba mostrou-se eficiente para utilização em gerência de pavimentos, onde interessa apenas a condição média dos trechos rodoviários, mas com limitações para o caso de Projetos rodoviários, onde a análise pontual é importante;
- Esta metodologia aplicada ao *PCR* no Ceará foi capaz de reduzir a necessidade de monitoramentos para 6,8% da extensão da malha, com uma redução de custos com monitoramento de 75%. A média dos valores estimados pelo modelo de variograma e dos valores observados foram praticamente as mesmas, e os erros médios absolutos também foram bastante baixos, confirmando a boa aplicabilidade desta ferramenta tanto para análises em gerência de pavimentos quanto para projetos rodoviários.

- A variabilidade espacial da degradação dos pavimentos foi confirmada no estabelecimento de variogramas. Os parâmetros de desempenho são fortemente influenciados pelos materiais de construção disponíveis, pelas ações do tráfego e clima, os quais variam de acordo com a sua localização.

Quanto aos Modelos de Previsão de Desempenho para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica e em Tratamentos Superficial:

- Em todos os modelos, o clima (variável  $C$ ), a capacidade estrutural (variável  $S$ ) e as cargas acumuladas de tráfego (variável  $N$ ) são determinantes na previsão de desempenho.
- Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos foram todos superiores a 0,7, com maior valor correspondente ao modelo de previsão do  $IRI$  para Tratamento Superficial (0,94).
- Os valores da Raiz do Erro Médio Quadrático Percentual (REMQP) dos modelos de  $IGG$  foram as mais elevadas (maiores que 20%), sendo portanto os que fornecem maior variabilidade.
- Não foi possível avaliar diretamente o efeito da idade da capa desde a última intervenção até o monitoramento realizado nos parâmetros de desempenho. Isto foi devido aos revestimentos terem a mesma idade para o caso Ceará e por não ter representabilidade o estabelecimento de níveis à idade dos pavimentos quando em todos eles esta já encontra-se muito avançada, como é o caso da Paraíba.
- Os modelos de previsão de desempenho elaborados devem ser aplicados exclusivamente em regiões com mesmas características ambientais para os quais foram elaborados, pois os mecanismos de degradação dos pavimentos definem a sua aplicabilidade. Portanto eles são recomendados ao Ceará e a Paraíba, podendo ter sua aplicação estendida aos demais estados do Nordeste Brasileiro após processo de validação.

Quanto à Análise Multicriterial pelo método PROMETHEE II em priorização e na otimização estratégias de manutenção de pavimentos:

- O cenário estabelecido para aplicação do PROMETHEE II na priorização em nível de rede forneceu resultados distintos à análise benefício/custo. As distinções observadas entre os dois métodos devem-se principalmente às considerações de critérios econômicos, sociais e ambientais relacionados aos trechos rodoviários, os quais representavam 40% dos pesos na tomada de decisão.
- A utilização desta ferramenta tornou possível a análise de vários critérios na tomada de decisão. Esta análise feita pelo tomador de decisão sem utilização de ferramentas de análise multicriterial é praticamente inexequível.
- Cenários diferentes ao apresentado nesta tese podem ser facilmente avaliados com aplicação do método PROMETHEE II, dependendo da definição de critérios e seus pesos na análise.

### 8.3 SUGESTÕES

Na Aplicação da Geoestatística:

- Avaliar as ferramentas da Geoestatística na otimização de campanhas de monitoramento de irregularidade, deflexão, resistência à derrapagem e tráfego.
- Aplicar a Geoestatística no mapeamento de características pedológicas e mecânicas de solos para pavimentação.

No Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Desempenho:

- Validar os modelos de previsão de desempenho elaborados nesta tese para as malhas rodoviárias de outros estados do Nordeste, comparando os resultados das inferências com valores medidos em campo e com outros modelos existentes, estabelecendo limitações de uso.
- Elaborar modelos de previsão de desempenho que avaliem diretamente a influência da idade do pavimento na degradação de pavimentos, na irregularidade e na deflexão.
- Avaliar a influência sazonal das características climáticas na previsão de deflexão.

- Comparar o comportamento de parâmetros de desempenho ao longo do tempo para pavimentos restaurados e não restaurados do Nordeste, procurando estabelecer os mecanismos de deterioração de cada um, e se a distinção entre modelos para pavimentos restaurados e não restaurados é considerável.

Na Aplicação do Método PROMETHEE II para priorização e otimização em gerência de pavimentos:

- Aplicar este método em caso real, comparando a aplicação de cenários diferentes na tomada de decisão na otimização de intervenções em pavimentos.
- Realizar análise comparativa do Método PROMETHEE II com os métodos Enumeração Total e Valor Incremental Benefício/Custo na otimização de alternativas de manutenção de pavimentos asfálticos.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, 1993.
- AASHTO. AASHTO guidelines for pavement management systems. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, 1990.
- AASHTO. Pavement management guide. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, 2001.
- AASHTO-a. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures: PART 3. design analysis: CHAPTER 5. identification of feasible rehabilitation strategies. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, p. 25, 2004.
- AASHTO-b. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures: APPENDIX B. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, p. 9, 2004.
- AASHTO-c. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures: APPENDIX C. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, p. 72, 2004.
- ALBUQUERQUE, F. S.; NÚÑEZ, W. P.; MACEDO, J. A. G. DE. Aplicação da geoestatística na otimização do processo de amostragem. In: Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes 2005, XIX ANPET. p. 1434 – 1443. 2005. V. II. Recife – PE, 2005.
- ALBUQUERQUE, F. S.; NÚÑEZ, W. P.; MACEDO, J. A. G. DE; CAVALCANTE, F. P. Geoestatística no monitoramento de pavimentos asfálticos. In: 37ª Reunião Anual de Pavimentação; 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 37ª RAPv / 11º ENACOR. 2006. Goiânia – GO. Anais... Associação Brasileira de Pavimentação, 2006. CD.
- ALMEIDA, E. A. B. DE. Contribuição para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho para as rodovias do estado da Paraíba. 224 p. Dissertação (Mestrado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba – Campus II, Campina Grande, 1999.
- ANTT. Números sobre transporte terrestre ANTT, atualização de 05 de Julho de 2006. Agência Nacional de Transportes Terrestres, Assessoria de Comunicação Social. Brasília – DF, 2006.
- D6433. Standard Test Method for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. American Society for Testing and Materials – ASTM, Vol. 04.03, 1999.
- AZAMBUJA, D. M. Estudo de recapeamentos asfálticos de pavimentos através de ensaios acelerados. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2004.
- BARELLA, R. M.; MASSARA FILHO, S.; BALBO, J. T. Irregularidade longitudinal de pavimentos: sensibilidade de perfis, comparação de equipamentos e correlação entre QI e IRI. In: Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes 2005, XIX ANPET. p. 1471 – 1482. 2005. V. II. Recife – PE, 2005.

BASÍLIO, R. Análise do comportamento de pavimentos de rodovias estaduais de Goiás – estudo de caso. 2002. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível na Web em: <http://teses.eps.ufsc.br>. Consultado em Julho de 2006.

BENEVIDES, S. A. S. E. Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará. 2006. 381 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível na Web em: <http://www.det.ufc.br/petran/teses/teseSergioBenevides2006.pdf>. Consultado em Agosto de 2006.

BRANS, J.P.; MARESCHAL, B; VINCKE, P. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. In: Operational Research, IFORS 84, Brans, J.P. ed. p. 477 – 490, North Holland, Amsterdam 1984.

BRANS, J.P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. In: European Journal of Operational Research, 24, p. 228-238, 1986.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Governo Federal, Brasil, 2005. Disponível na Web em: <http://www.dpi.inpe.br>. Consultado em Junho de 2005.

CAMBRIDGE SYSTEMATICS. Inc., Transportation Asset Management Guide, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 20-24(11), 2002.

CAMPOS, V. F. TQC – controle da qualidade total (no estilo japonês). Belo Horizonte – MG. Fundação Christiano Ottoni. Escola de Engenharia da UFMG. 1992. Rio de Janeiro – RJ. Bloch Editora. 6ª Ed, 1995.

CARDOSO, A. P.; DUARTE, I. M.; CASAN, Y.; MILFORT, A. C. ROUTE 2000\_RS: o sistema de gerência da malha rodoviária do estado do Rio Grande do Sul. In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, 33ªRAPv, 5, Anais... Associação Brasileira de Pavimentação, Florianópolis – SC, 2000.

CARDOSO, S. H. Gerência de pavimentos em vias urbanas. In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação, 28ªRAPv, 5, Anais... Associação Brasileira de Pavimentação, Natal – RN, 1994.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. Boletim estatístico CNT 2005. Confederação Nacional do Transporte – CNT, Brasília – DF, 2005. Disponível na Web em: <http://www.cnt.org.br/>. Consultado em Julho de 2006.

COSTA, J.F.C.L. Notas de aula da disciplina de Geoestatística. Departamento de Engenharia de Minas, Prof. Dr. do DEMIN, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível na Web em: <http://www.ufrgs.br/ppgem>. Consultado em Julho de 2004.

Decision LAB. Decision LAB 200 – Executive Edition. Software for Windows, Visual Decision Inc, 1998.

DELFINER P., DELHOMME J.P. Optimum interpolation by kriging. In: J.D.Davis and M.J.McCullagh (eds), Display and Analysis of Spatial Data, New York, John Wiley and Sons, pp 96-114, 1975.

Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará (DERT-CE). Web Site. Informações sobre rodovias do estado do Ceará. Disponível na Web em: <http://www.dert.ce.gov.br>. Consultado em Maio de 2006.

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Paraíba (DER-PB). Web Site. Informações sobre rodovias do estado da Paraíba. Disponível na Web em: <http://www.der.pb.gov.br>. Consultado em Maio de 2006.

DfT. Department for Transport – Road maintenance and condition. Transportation statistics bulletin: national road maintenance condition survey: 2003. A National Statistics publication produced by Transport Statistics: DfT. Department for Transport (DfT), London, UK, 2003. Disponível na Web em: <http://www.dft.gov.uk>. Consultado em Agosto de 2006.

DigitalGoogle. Google Earth – Version: Beta 0.410. Software for Windows, Google Company, 2006.

DNER-ES 173/86. Método de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1986.

DNER-ES 308/97. Pavimentação – tratamento superficial simples. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

DNER-ES 309/97. Pavimentação – tratamento superficial duplo. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

DNER-ES 310/97. Pavimentação – tratamento superficial triplo. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

DNER-ES 314/97. Pavimentação – lama asfáltica. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

DNER-ES 317/97. Pavimentação – pré-misturados a frio. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

DNER-ME 024/94. Pavimento – determinação das deflexões pela Viga Benkelman. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1994.

DNER-ME 061/94. Pavimento – delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1994.

DNER-PRO 10/79. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – procedimento “A”. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1979.

DNER-PRO 11/79. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – procedimento “B”. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1979.

- DNER-PRO 159/85. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1985.
- DNER-PRO 175/94. Aferição de viga Benkelman. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1994.
- DNER-PRO 182/94. Medição da irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1994.
- DNER-PRO 269/94. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1994.
- DNER-TER 001/78. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – terminologia. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1978.
- DNIT 005/2003 – TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2003.
- DNIT 006/2003-PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2003.
- DNIT 008/2003 – PRO. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2003.
- DNIT 031/2004 – ES. Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2004.
- DNIT 032/2005 – ES. Pavimentos flexíveis – areia asfalto a quente – Especificação de Serviço. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2005.
- DUARTE, J. C.; SILVA, P. D. E; FABRÍCIO, J. M. Correlação entre deflexões características em pavimentos flexíveis medidos com viga Benkelman e FWD – Failing weight deflectometer. In: 30ª Reunião Anual de Pavimentação, 30ªRAPv, Anais... Associação Brasileira de Pavimentação, v 2, Salvador – BA, 1996.
- Dynatest Engenharia LTDA. Web Site. Figuras ilustrativas de equipamentos de monitoramento de rodovias. Disponível na Web em: <http://www.dynatest.com.br>. Consultado em Maio de 2006.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2ª edição, 306 p., Brasília, 1999.
- FABRÍCIO, J.M et al. Emprego de deflectógrafo digital (viga Benkelman eletrônica) na monitoração do pavimento da rodovia concessionada – BR-290/RS: Osório – Porto Alegre –

Guaíba. In: 32ª Reunião Anual de Pavimentação. V. 2 pp. 987-995, Brasília – DF, Brasil, 2000.

GEORGE, K. P. MDOT pavement management system: prediction models and feedback system. University of Mississippi, Department of Civil Engineering, in corporation with the Mississippi Department of Transportation and the U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Mississippi, USA, 2000. Disponível na Web em: <http://www.mdot.state.ms.us>. Consultado em Maio de 2006.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 495 p, USA, 1992.

GONÇALVES, F. J. P. O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos. Prof. da Universidade de Passo Fundo (Notas de Aula), Passo Fundo, Brasil. Disponível na Web em: <http://www.upf.tche.br>. Consultado em Julho de 2006.

GONÇALVES, F. J. P. Utilização de expert systems na manutenção de pavimentos. 1997. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.

HAAS, R. C. G., HUDSON W. R., ZANIEWSKI J. P. Modern pavement management. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 1994.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAN, R.L.; BLACK, W. O. Análise Multivariada de Dados. Traduzido por Adonai Schlup Sant'ana e Anselmo Chaves Neto – 5ª ed. – Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAJEK, J.; HEIN D.; OLIDIS C. Decision making for maintenance and rehabilitation of municipal pavements. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, 2004, Québec City, Québec. Anais... Transportation Association of Canada. Disponível na Web em: <http://www.tac-atc.ca>. Consultado em Maio de 2006.

HDM-4-a. Volume 4 – Analytical framework & model descriptions: Part C – road deterioration models. International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM), The World Bank, Washington, USA, 2000.

HDM-4-b. Volume 4 – Analytical framework & model descriptions: Part C – economic analysis. International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM), The World Bank, Washington, USA, 2000.

HEUKELOM, W; KLOMP, A. J. G. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. Proceedings. In: I International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Ann Arbor, University of Michigan, USA, 1962.

HUIJBREGTS, C. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In Display and Analysis of Spatial Data, editado por J. Davis and M. McCullagh, Wiley, Londres, UK, 1975.

IAC 4302/2001. Requisitos de resistência à derrapagem para pistas de pouso e decolagem. Instrução de Aviação Civil – Normativa, República Federativa do Brasil, Comando da Aeronáutica, Departamento de Aviação Civil, Subdepartamento de Infra-Estrutura, Brasil, 2001.

- IBP. As emulsões asfálticas e suas aplicações rodoviárias. Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP, Rio de Janeiro, 1983.
- IPR-667/22. Método de projeto de pavimentos flexíveis. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1981.
- IPR-697/100. Manual de pavimentação. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro – RJ, 1996.
- IPR-710. Manual de conservação rodoviária. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2005.
- IPR-720. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. MT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília – DF, 2006.
- ISAAKS, E., SRIVASTAVA, R. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press Inc, New York, USA, 1989.
- JOHNSTON, M. G. Estudo de obtenção de número estrutural em pavimentos flexíveis. 2001. 187 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível na Web em: <http://sabix.ufrgs.br>. Consultado em Julho de 2006.
- Journel, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Stanford Center for Reservoir Forecasting Applied Earth Sciences Department, California, 1988.
- KIKUKAWA, S; ANZAKI, Y. Present situation and prospects of pavement maintenance management system in Japan. Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Vol. 1, pp. 1403 - 1414, Toronto, 1987.
- KOHLER, ERWIN R., NICHOLAS J. SANTERO, JOHN T. HARVEY. Pilot Project for Fixed Segmentation of the Pavement Network. UCPRC–RR-2005/11 – Part of PPRC Strategic Plan Item 3.2.4, Prepared for California Department of Transportation, Division of Research and Innovation, Office of Roadway Research, UC Pavement Research Center University of California, Davis and Berkeley – USA, 2006.
- KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. In: Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African, 52 (6): 119-139, 1951.
- KUTZ, M; SPRING, G. S. Handbook of transportation engineering: part I: networks and systems: chapter 5. applications of GIS in transportation. McGraw-Hill Professional, Digital Engineering Library, McGraw-Hill, USA, 2004. Disponível na Web em: <http://www.digitalengineeringlibrary.com>. Consultado em Junho de 2006.
- LAPPONI, J. C. Estatística usando Excel. Elsevier Editora LTDA. ISBN: 85-35215-74-3, ed. 4ª, São Paulo, 2005.
- LARSEN, J. Tratamento superficial na conservação e construção de rodovias. ADEBA, Rio de Janeiro, 1985.
- LERCH, R. L. Previsão de irregularidade pós-recapê em rodovias do RS: ajuste do modelo HDM-4. 2003. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação

em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível na Web em: <http://sabix.ufrgs.br>. Consultado em Novembro de 2007.

Liddle, W. J. Application of AASHO Road Test results to the design of flexible structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 1., 1962, Ann Arbor. Proceedings... , p.42-51.

LOPES, M<sup>a</sup> R. C. M. Uso das metodologias PROMETHEE e F-PROMETHEE na avaliação de clientes. 2005. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Programação Matemática, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível na Web em: <http://www.cpgmne.ufpr.br>. Consultado em Agosto de 2006.

LYTTON, R. L. Concepts of pavement performance prediction and modeling. *In*: Second North American Conference on Managing Pavements. p.2.1-2.19, v.2, 1987.

MARCON, A.F. Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina. 1996. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.

MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, Paris. 211p, 1971.

MIDDELTON, N. and THOMAS, D.S.G. World Atlas of Desertification. United Nations Environment Program, Edward Arnold, London, 69 pp, 1992.

MISRA, A.; ROOHANIRAD A.; SOMBOONYANON P. Guidelines for a roadway management system (RMS) for local governments. Midwest Transportation Consortium (MTC) and Iowa State University, 2<sup>a</sup> ed, 68 p, 2003. Disponível na Web em: <http://www.ctre.iastate.edu>. Consultado em Maio de 2006.

NASCIMENTO, D. M. Análise comparativa de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis. 2005. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível na Web em: <http://www.teses.usp.br>. Consultado em Maio de 2006.

NBR ISO 8402. Gestão da qualidade e garantia da qualidade – Terminologia. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

NBR ISO 9000. Sistemas de gestão da qualidade – fundamentos e vocabulário. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/CB-25 – Comitê Brasileiro da Qualidade, CE-25:002.18 – Comissão de Estudo de Sistema da Qualidade, Rio de Janeiro – RJ, 2000.

NBR ISO 9004. Sistemas de gestão da qualidade – diretrizes para melhorias de desempenho. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT/CB-25 – Comitê Brasileiro da Qualidade, CE-25:002.18 – Comissão de Estudo de Sistema da Qualidade. Rio de Janeiro – RJ, 2000.

NHI. Analysis of PMS data for engineering applications. Federal Highway Administration, National Highway Institute Course, 410 p, NHI Course n° 131105, 2002. Disponível na Web em: <http://www.nhi.fhwa.dot.gov>. Consultado em Maio de 2006.

- NHI. Pavement management systems. Federal Highway Administration, National Highway Institute Course, 422 p, NHI Course n° 131035, 1998. Disponível na Web em: <http://www.nhi.fhwa.dot.gov>. Consultado em Janeiro de 2006.
- NÓBREGA, E. S. Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro – RJ. 365f, 2003.
- NOWATZKI, C. H. Fundamentos de Geologia Arqueológica. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Geologia Arqueológica – NEPGEA, Edição eletrônica, 2005. Disponível na Web em: [http://br.geocities.com/geo\\_arqueologia/biblio.html](http://br.geocities.com/geo_arqueologia/biblio.html). Consultado em Outubro de 2007.
- NUÑEZ, M. M., SHAHIN, M. Y. Pavement condition data analysis and modeling. Transportation Research Record 1070, Transportation Research Board, p. 125-132, Washington-DC, USA, 1986.
- ODOT. Pavement Condition Rating System. Ohio Department of Transportation, Office of Pavement Engineering, Ohio, USA, 2004.
- OLIVER, M.A., WEBSTER, R. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press, USA, 316p, 1990.
- PANTELIAS, A. Asset management data collection for supporting decision processes. 2005. 138 p. Master of Science in Civil and Environmental Engineering - The Via Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA. Disponível na Web em: <http://scholar.lib.vt.edu>. Consultado em Maio de 2006.
- PATERSON, W. D. O.; MAREE, J. H. The South African mechanistic design method (SA-MDM). South Africa, 1994.
- PATERSON, W. D.O. Road deterioration and maintenance effects. World Bank Publications, Washington-DC, USA, 1987. Disponível na Web em: <http://www.worldbank.org>. Consultado em Maio de 2006.
- PEDROSA, A. B dos S. O. Calibração de modelos de previsão de desempenho da AASHTO com base na pesquisa FHWA-LTPP. 2002. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, Brasil.
- PEREIRA, D. R. AL-CHUEYR M. Contribuição ao estudo dos fatores de equivalência de cargas. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia). EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. Pavimentação rodoviária, conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Editora Copiarte, Rio de Janeiro – RJ, 259 p., 2002.
- PONCINO, H. Adherencia neumático-pavimento. Conceptos generales. Estado Del conocimiento. Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto, n.94, Buenos Aires, Argentina, 2001.
- PORATH, R. Sistema de gerência de segurança para o trânsito rodoviário: o modelo SGS/TR. 2002. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível na Web em: <http://teses.eps.ufsc.br>. Consultado em Maio de 2006.

PORTO, R. La L. (Organizador). Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 1997.

QUEIROZ, C. A. V. Performance prediction models for pavement management in Brazil. 1981. 317 p. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Texas, Austin-Texas, USA.

RIMS. Location referencing system guide for road controlling authorities. Road Information Management Systems (RIMS) Group, RIMS Documents, New Zealand, 2002. Disponível na Web em: <http://www.rims.org.nz>. Consultado em Janeiro de 2006.

RIMS. Special study task 6403 – national PCI investigation. Road Information Management Systems (RIMS) Group, RIMS Documents, New Zealand, 2004. Disponível na Web em: <http://www.rims.org.nz>. Consultado em Janeiro de 2006.

Roadware Group Inc. Web Site. Figuras ilustrativas de equipamentos de monitoramento de rodovias. Disponível na Web em: <http://www.roadware.com/>. Consultado em Maio de 2006.

RÓDENAS, M<sup>a</sup> del C. E.; BARBERIS, G. F. B. Estudio comparativo de métodos de ayuda a la decisión multicriterio en la valoración y selección de alternativas de inversión. In: X JORNADAS DE ECONOMIA Y MATEMATICAS, Sesión 4, 2002, Madrid. Anais... Madrid: Asociación Española de Profesores Universitarios de Matemáticas para la Economía y la Empresa - ASEPUMA, 2002. Disponível na Web em: <http://www.uv.es>. Consultado em Agosto de 2006.

RODRIGUES, R. M. Gerência de pavimentos – parte II. Apostila da Disciplina de Gerência de Pavimentos. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São Carlos – SP, 2003.

SAYERS, M. W., GILLESPIE, T. D., QUEIROZ, C. A. V. The International Road Roughness Experiment-establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. World Bank Technical paper number 45. Washington, DC, 1986.

SHAHIN, M. Y. Micro PAVER 5.3 User Manual. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory, ERDC-CERL, USA, 2006. Disponível na Web em: <http://www.cecer.army.mil/paver/Documents/53Manual/5.3UserManual.pdf>. Consultado em Agosto de 2007.

SHAHIN, M. Y. Pavement management for airports, roads and parking lots. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1994.

SOUZA, R.de. Metodologia para desenvolvimento e implantação de sistemas de gestão da qualidade em empresas construtoras de pequeno e médio porte. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da – EPUSP, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

SPIEGEL, M. R. Estatística, Schaum McGraw-Hill, 3<sup>a</sup> Edição, 1994.

THE DEWBERRY COMPANIES. Land development handbook: part VIII: technical appendices: chapter 37: geospatial data. McGraw-Hill Professional, Digital Engineering Library, McGraw-Hill, USA, 2002. Disponível na Web em: <http://www.digitalengineeringlibrary.com>. Consultado em Junho de 2006.

TRRL. The MERLIN low-cost road roughness measuring machine. Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, Research Report 301, UK, 1991. Disponível na Web em: <http://www.trl.co.uk>. Consultado em Setembro de 2006.

ULLIDTZ, Per. Modelling Flexible Pavement Response and Performance, Polyteknisk Forlag, 1998.

VAN TIL, C. J., B. F. MCCULLOUGH, B. A. VALLERGA, and R. G. HICKS. NCHRP Report. 128: Evaluation of AASHO Interim Guides for Design of Pavement Structures, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1972.

VISCONTI, T. S. O sistema gerencial de pavimentos do DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Divisão de Apoio Tecnológico, Brasil, 84 p, 2000. Disponível na Web em: <http://www.fec.unicamp.br/~zuffo/>. Consultado em Agosto de 2006.

WATANATADA, T., HARRAL, C. G.; PATERSON, W. D. O.; DHARESHWAR, A. M.; BHANDARI, A.; TSUNOKAWA, K. The highway design and maintenance standards model – Volume 1: Description of the HDM-III Model. World Bank Publications, Washington D.C. USA, 1987. Disponível na Web em: <http://www.worldbank.org>. Consultado em Maio de 2006.

WSDOT. The WSDOT Pavement Management System – A 1993 Update, Final Report. WARD 274.1, Washington State Department of Transportation, September 1993.

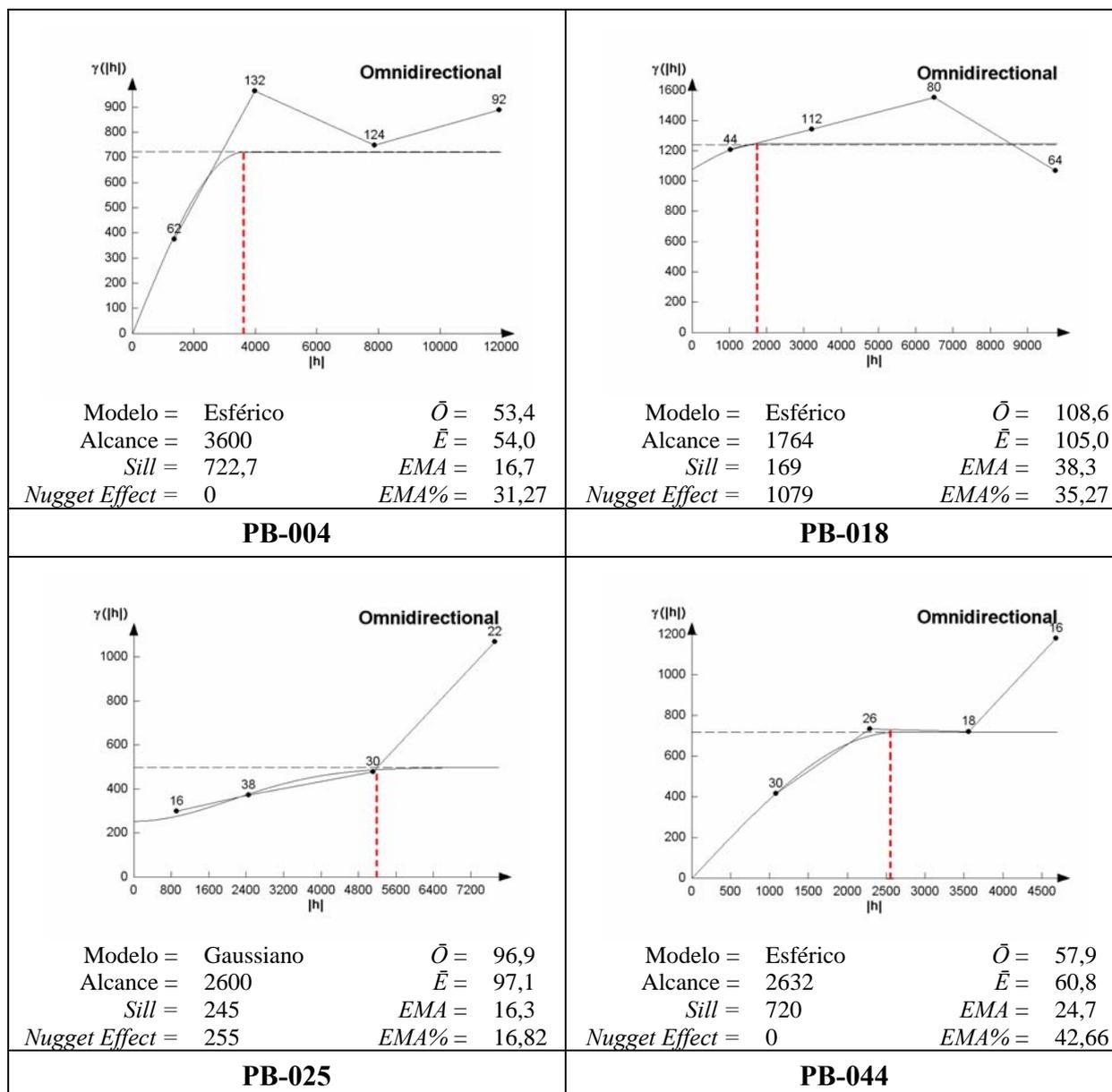
YSHIBA, J. K. Modelo de Desempenho de pavimentos: estudo de rodovias do estado do Paraná. 2003. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – SP.

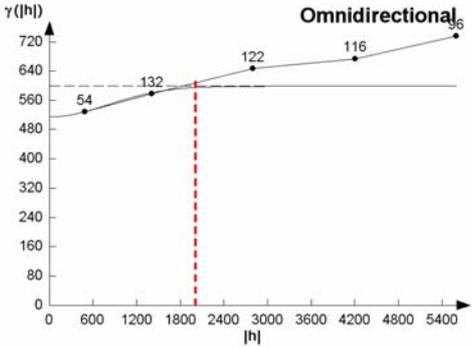
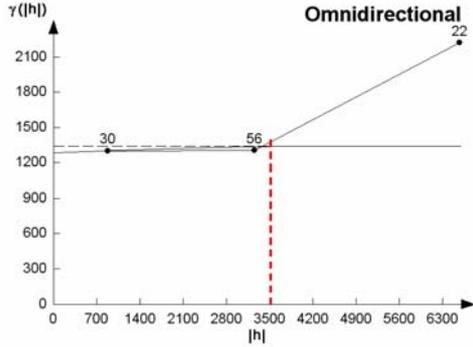
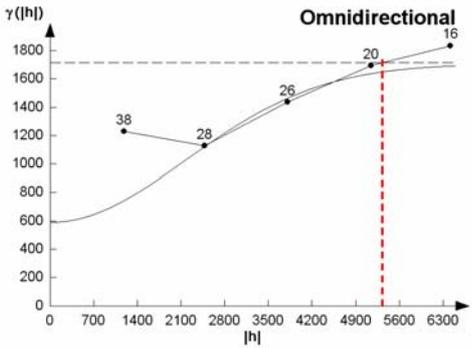
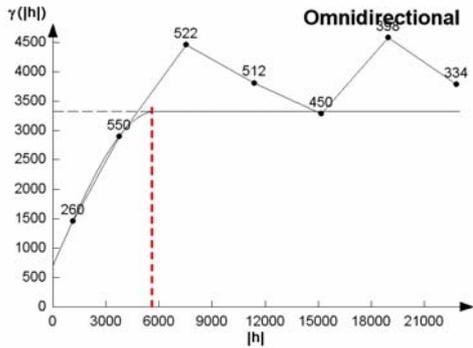
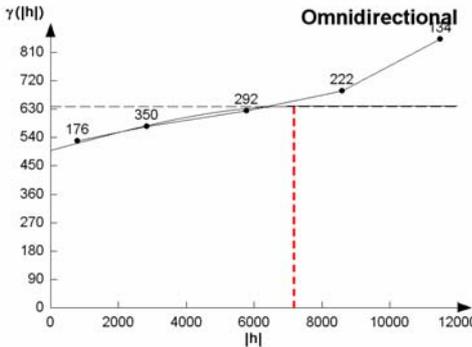
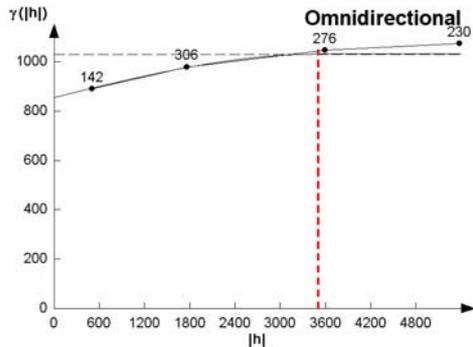
ZHENG LI. A probabilistic and adaptive approach to modeling performance of pavement infrastructure. 2005. 156 p. Doctoral dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, USA. Disponível na Web em: <http://hdl.handle.net/2152/402>. Consultado em Maio de 2006.

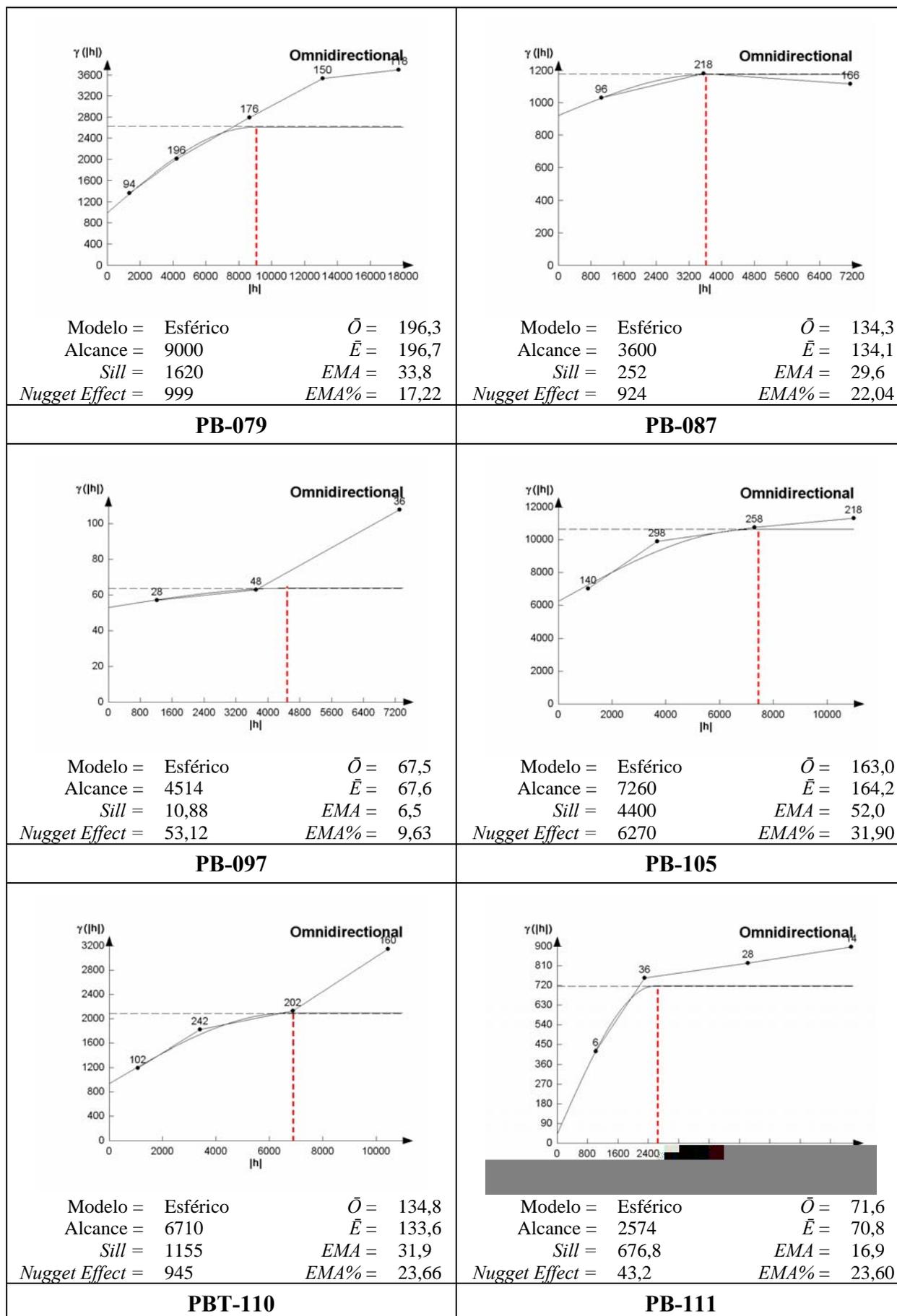
ZUFFO, A. C. Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos. 1998. 286 p. Tese (Doutorado na Escola de Engenharia de São Carlos) - Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível na Web em: <http://teses.eps.ufsc.br>. Consultado em Maio de 2006.

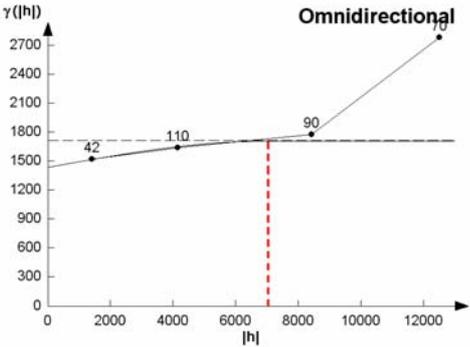
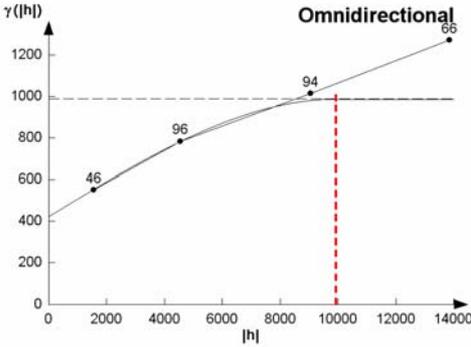
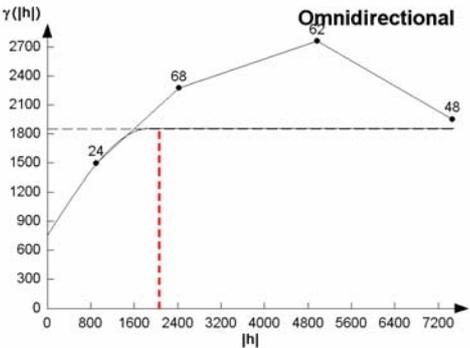
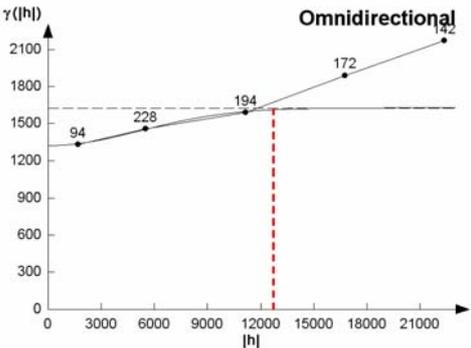
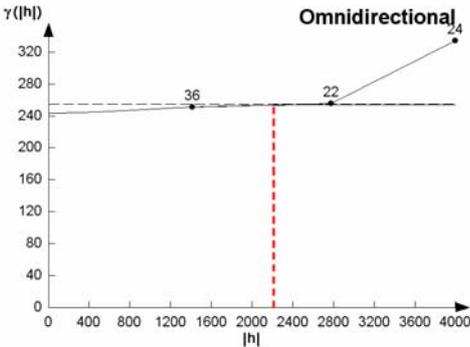
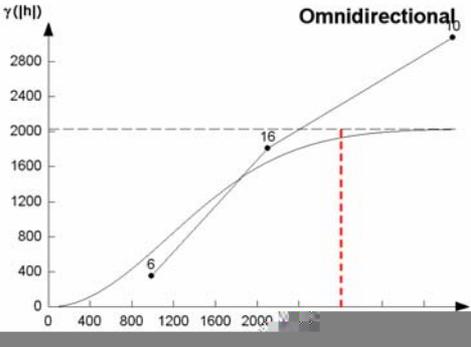
## APÊNDICE I

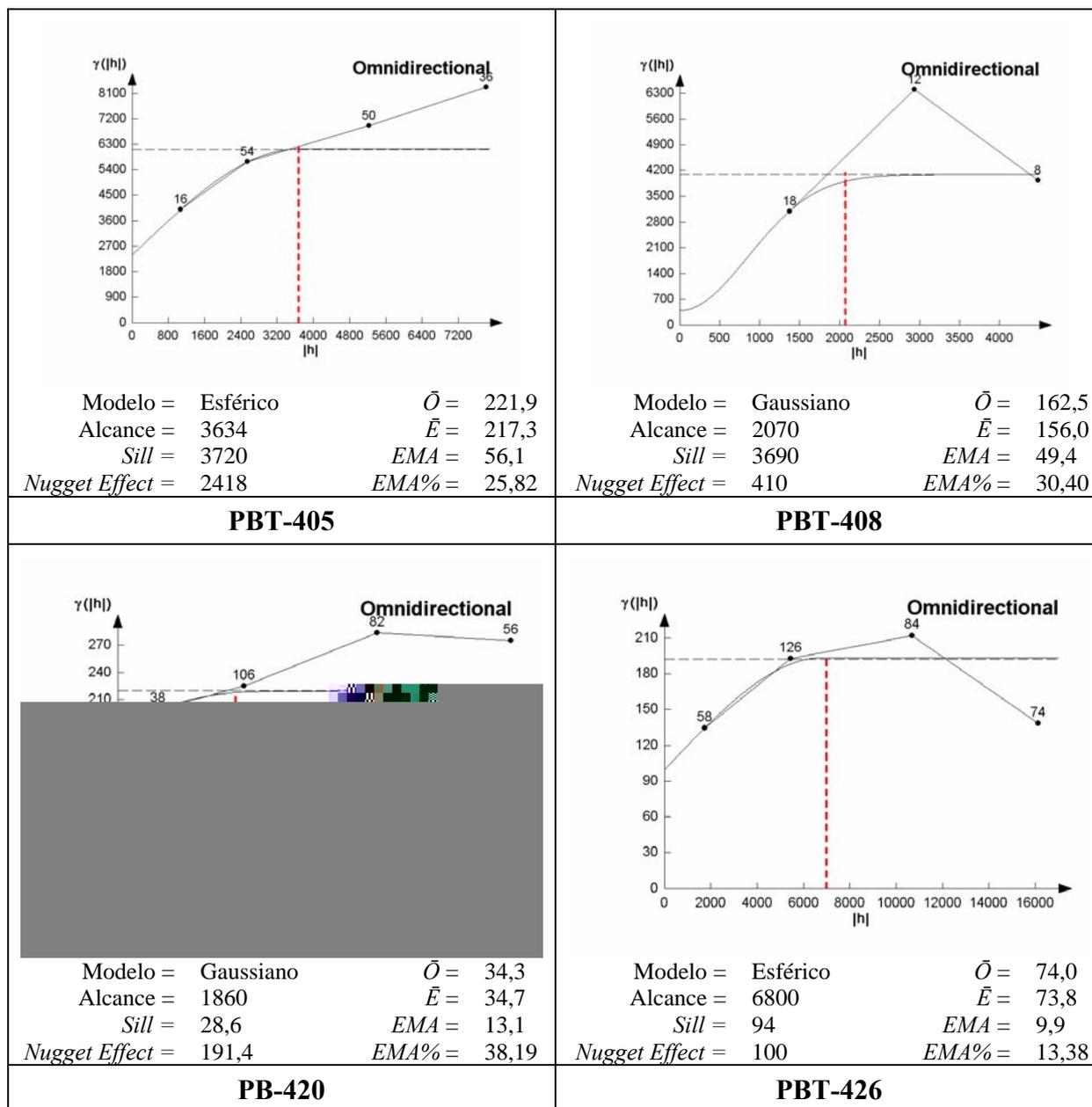
### (Variogramas dos Trechos Rodoviários analisados no Estado da Paraíba)



 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 89,5</math>  Alcance = 1960 <math>\bar{E} = 89,4</math>  Sill = 84 <math>EMA = 18,1</math>  Nugget Effect = 516 <math>EMA\% = 20,22</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 88,0</math>  Alcance = 4158 <math>\bar{E} = 90,1</math>  Sill = 56 <math>EMA = 17,4</math>  Nugget Effect = 1288 <math>EMA\% = 19,77</math></p>
<b>PB-054</b>	<b>PB-065</b>
 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 119,7</math>  Alcance = 5330 <math>\bar{E} = 121,7</math>  Sill = 1116 <math>EMA = 33,3</math>  Nugget Effect = 594 <math>EMA\% = 27,82</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 87,1</math>  Alcance = 5750 <math>\bar{E} = 87,0</math>  Sill = 2618 <math>EMA = 23,1</math>  Nugget Effect = 714 <math>EMA\% = 26,52</math></p>
<b>PB-073/001</b>	<b>PB-073/003 a PB-073/017</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 86,6</math>  Alcance = 7200 <math>\bar{E} = 85,5</math>  Sill = 140,8 <math>EMA = 19,0</math>  Nugget Effect = 499,2 <math>EMA\% = 21,94</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 90,0</math>  Alcance = 3510 <math>\bar{E} = 88,9</math>  Sill = 176 <math>EMA = 27,8</math>  Nugget Effect = 858 <math>EMA\% = 30,89</math></p>
<b>PB-073/019</b>	<b>PB-073/021 e PB-073/023</b>

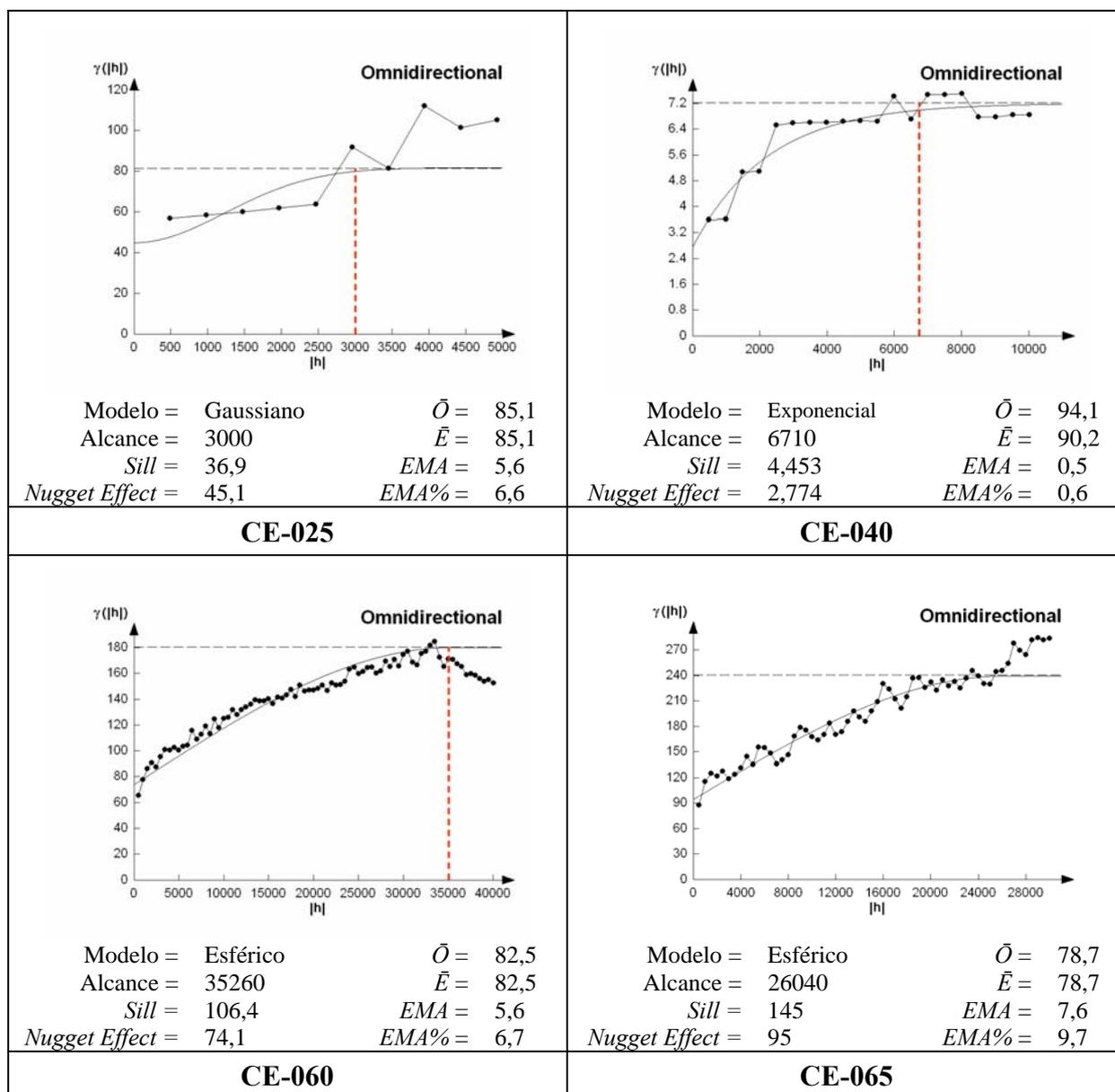


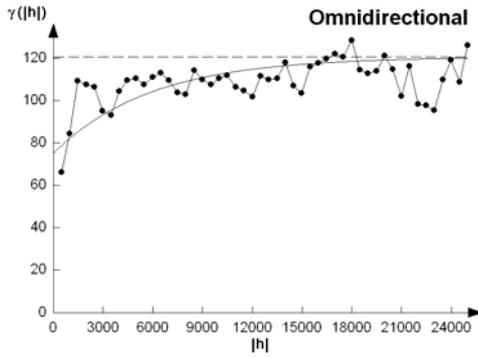
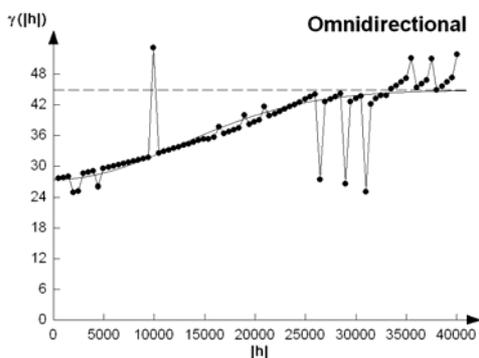
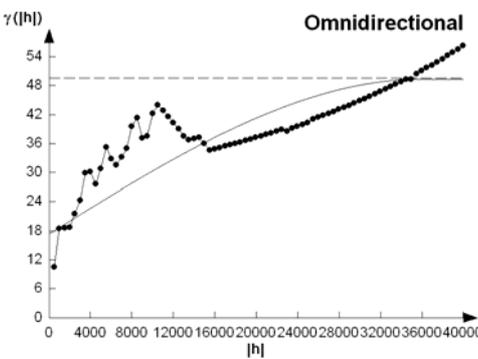
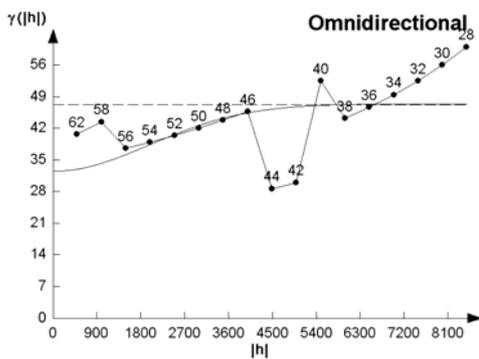
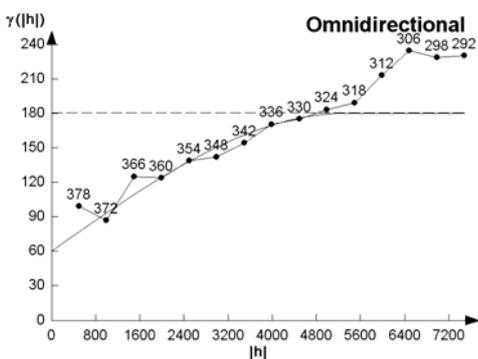
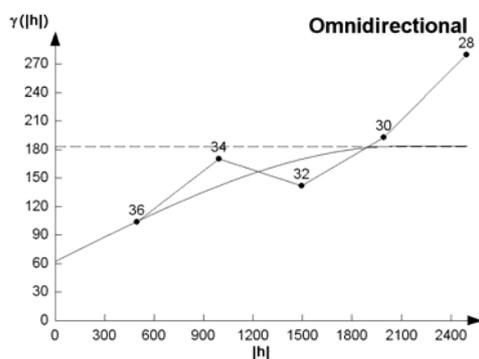
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 125,1</math>  Alcance = 6890 <math>\bar{E} = 125,0</math>  Sill = 270 <math>EMA = 29,5</math>  Nugget Effect = 1440 <math>EMA\% = 23,58</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 106,0</math>  Alcance = 9940 <math>\bar{E} = 104,7</math>  Sill = 564,3 <math>EMA = 21,0</math>  Nugget Effect = 425,7 <math>EMA\% = 19,81</math></p>
<b>PB-148</b>	<b>PB-238</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 131,5</math>  Alcance = 1875 <math>\bar{E} = 131,6</math>  Sill = 1102 <math>EMA = 32,6</math>  Nugget Effect = 760 <math>EMA\% = 24,79</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 186,8</math>  Alcance = 12650 <math>\bar{E} = 187,3</math>  Sill = 306 <math>EMA = 29,0</math>  Nugget Effect = 1326 <math>EMA\% = 15,52</math></p>
<b>PB-325/001 e PB-325/003</b>	<b>PB-325/005 e PB-325/011</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 19,1</math>  Alcance = 2200 <math>\bar{E} = 19,8</math>  Sill = 10,4 <math>EMA = 14,5</math>  Nugget Effect = 244,4 <math>EMA\% = 75,92</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 187,6</math>  Alcance = 2808 <math>\bar{E} = 185,1</math>  Sill = 2037 <math>EMA = 25,9</math>  Nugget Effect = 0 <math>EMA\% = 13,81</math></p>
<b>PB-366</b>	<b>PB-393</b>

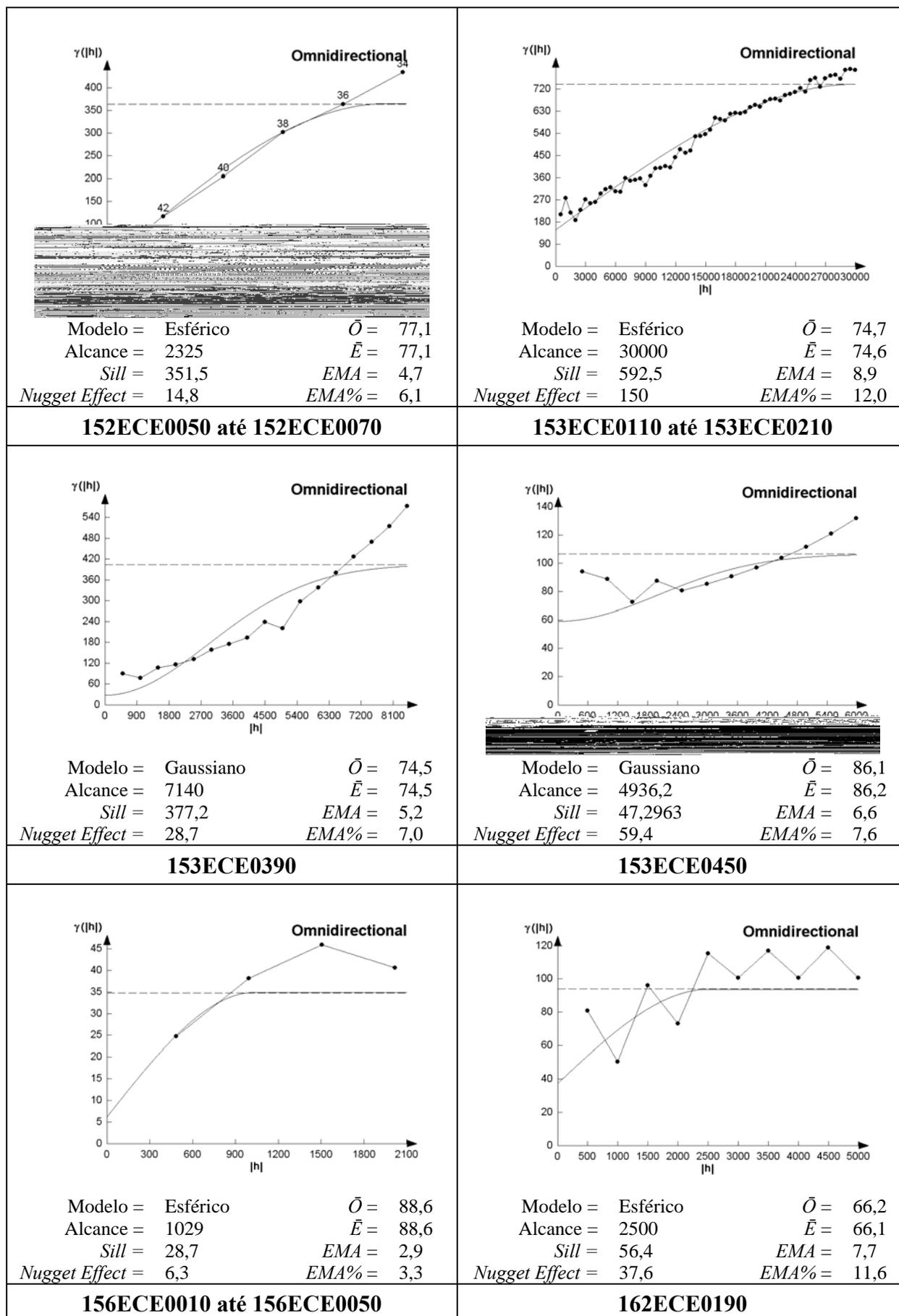


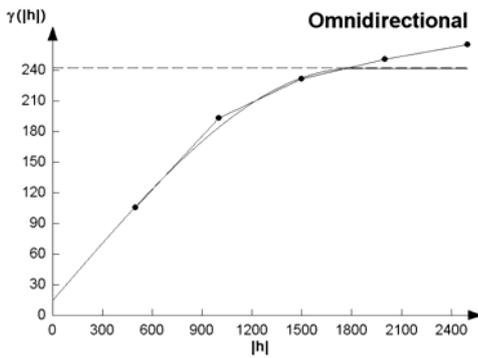
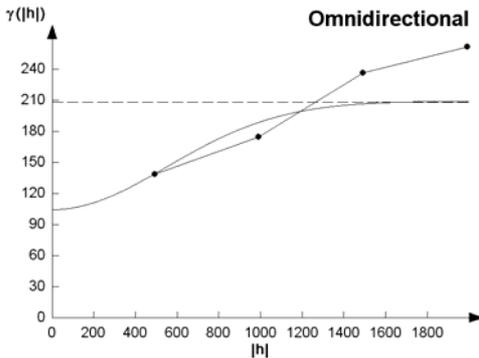
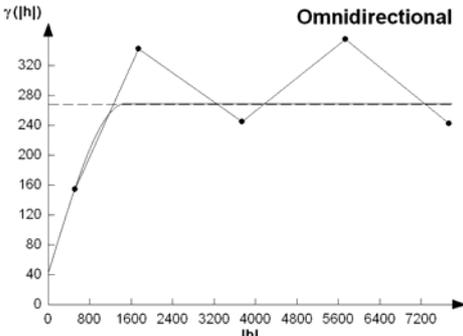
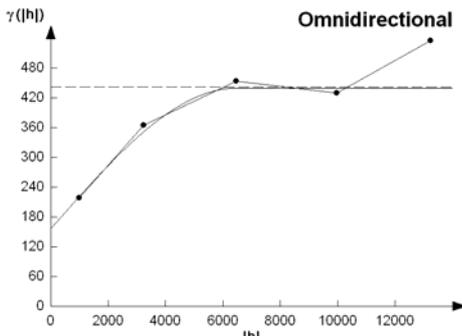
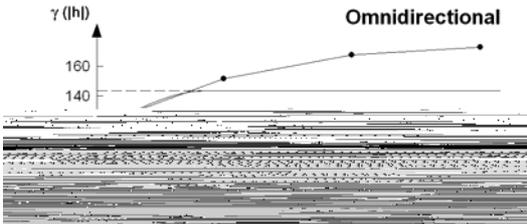
## APÊNDICE II

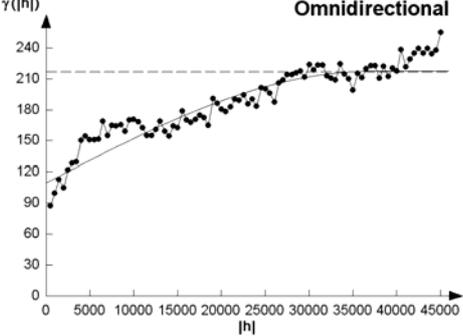
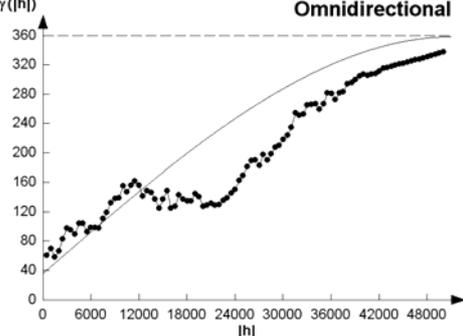
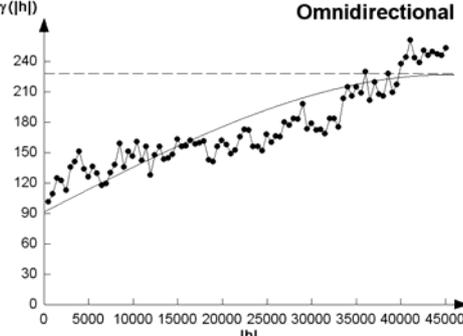
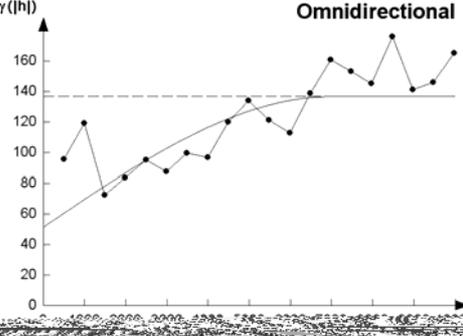
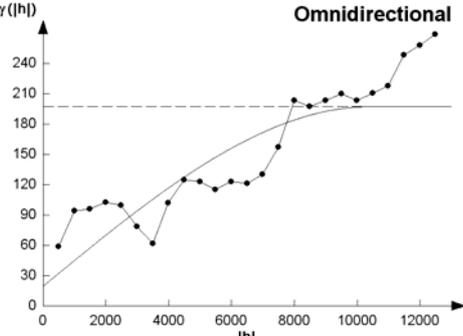
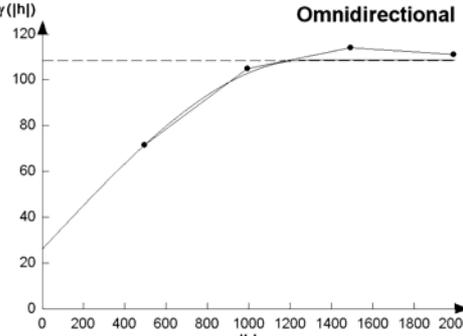
### (Variogramas dos Trechos Rodoviários do Estado do Ceará)

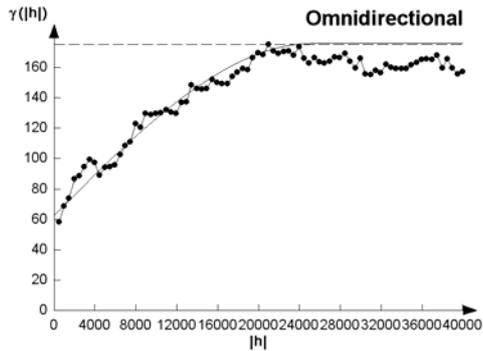
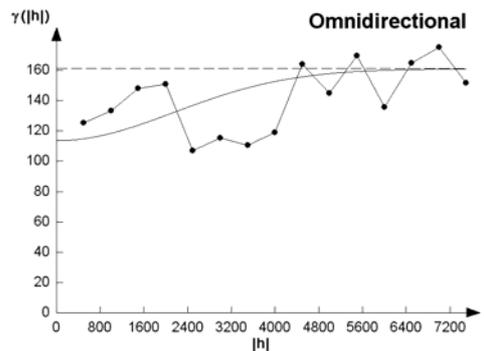
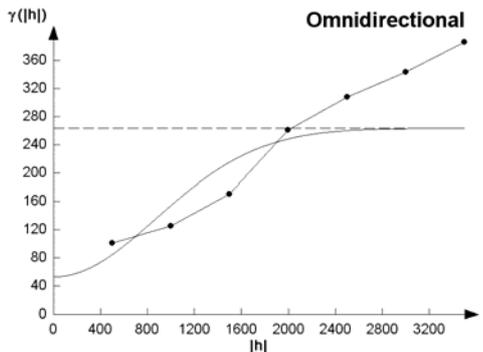
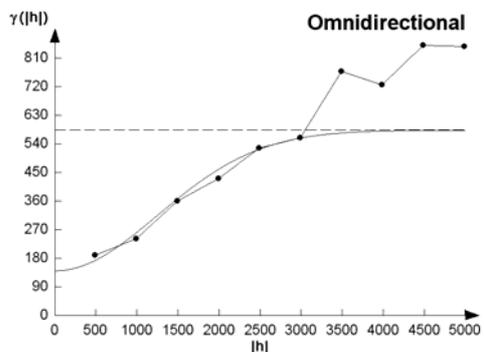
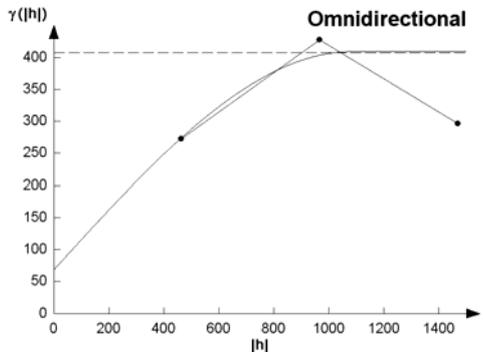
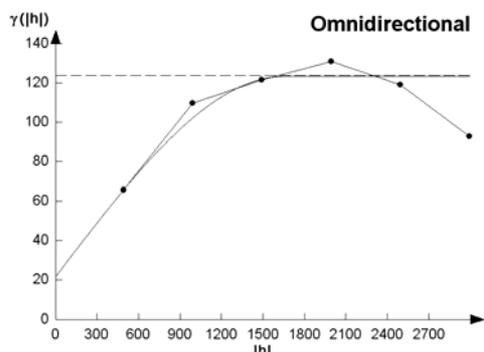


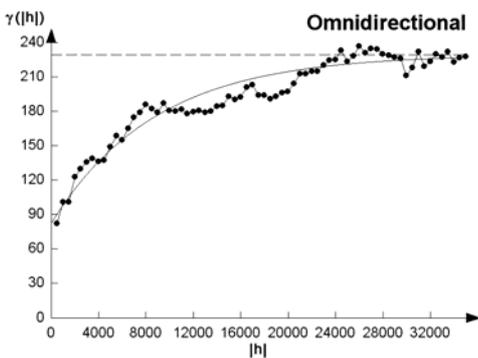
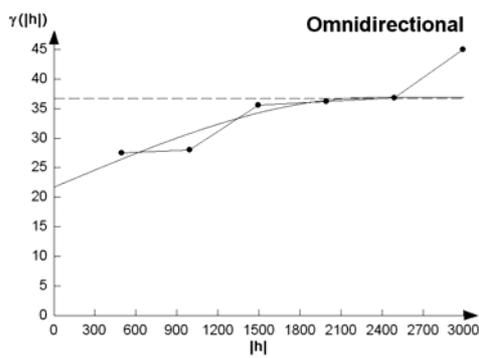
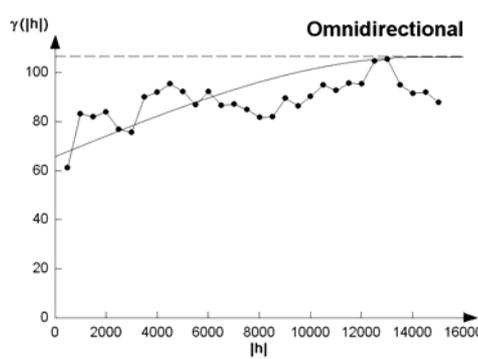
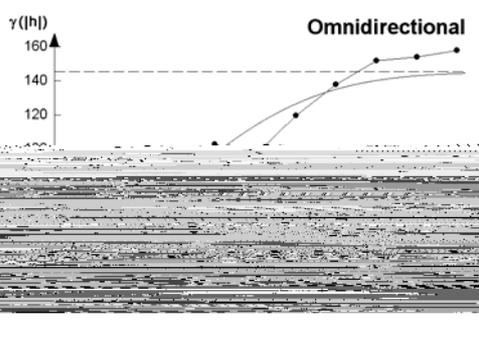
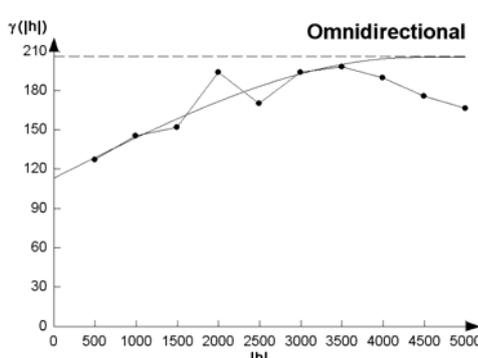
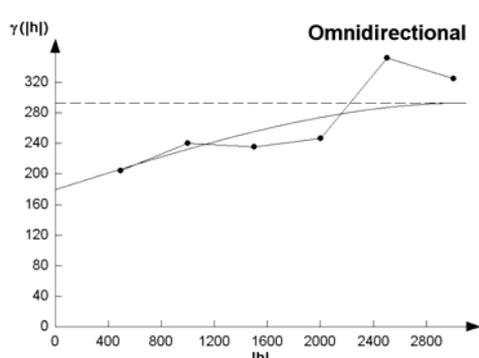
 <p>Modelo = Exponencial <math>\bar{O} = 87,3</math>  Alcance = 17500 <math>\bar{E} = 87,3</math>  Sill = 45,5 <math>EMA = 4,8</math>  Nugget Effect = 75,4 <math>EMA\% = 5,5</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 89,5</math>  Alcance = 30750 <math>\bar{E} = 89,6</math>  Sill = 17,55 <math>EMA = 1,8</math>  Nugget Effect = 27,45 <math>EMA\% = 2,0</math></p>
<b>085ECE0010D até 085ECE0280</b>	<b>085ECE0350 até 085ECE0430</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 88,0</math>  Alcance = 36000 <math>\bar{E} = 88,0</math>  Sill = 32 <math>EMA = 1,4</math>  Nugget Effect = 17,5 <math>EMA\% = 1,6</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 87,8</math>  Alcance = 4845 <math>\bar{E} = 87,8</math>  Sill = 14,88 <math>EMA = 4,0</math>  Nugget Effect = 32,64 <math>EMA\% = 4,6</math></p>
<b>085ECE0510 até 085ECE0590</b>	<b>138ECE0010 até 138ECE0020</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 82,5</math>  Alcance = 5325 <math>\bar{E} = 82,5</math>  Sill = 119,7 <math>EMA = 6,8</math>  Nugget Effect = 60,8 <math>EMA\% = 8,3</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 77,6</math>  Alcance = 2100 <math>\bar{E} = 77,6</math>  Sill = 121,6 <math>EMA = 9,0</math>  Nugget Effect = 62,7 <math>EMA\% = 11,7</math></p>
<b>138ECE0210 até 138ECE0330</b>	<b>CE - 151</b>

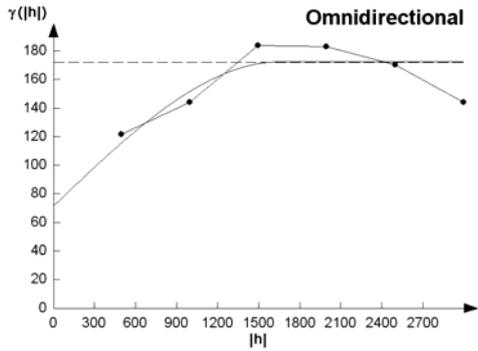
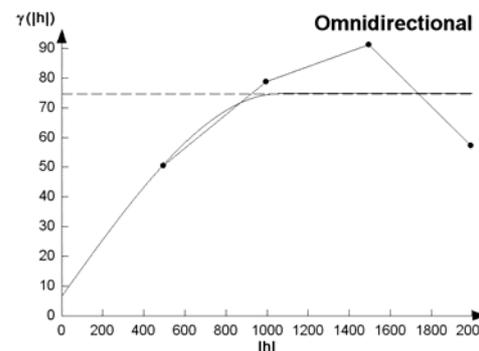
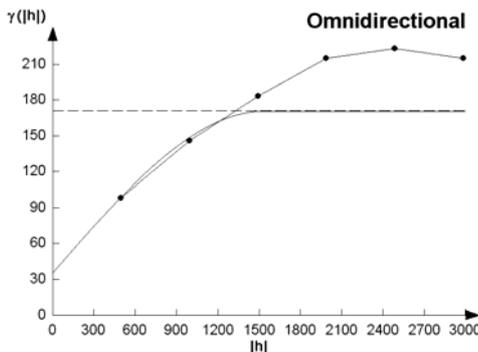
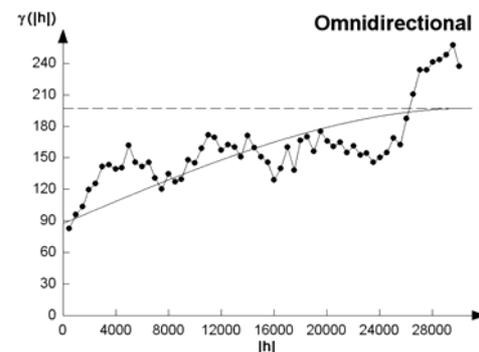
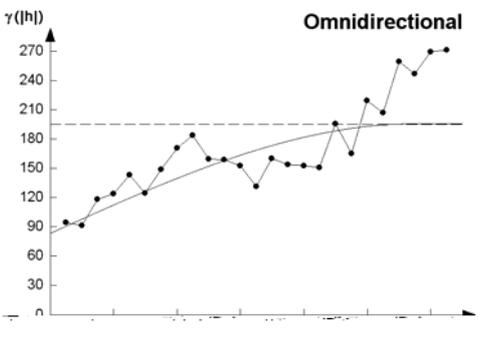
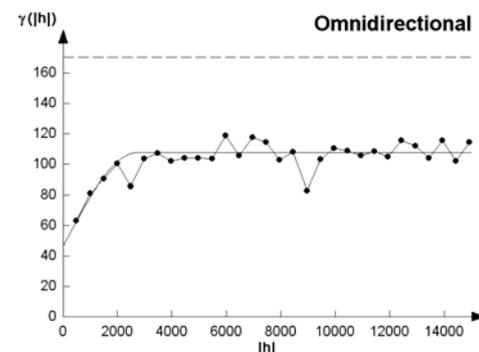


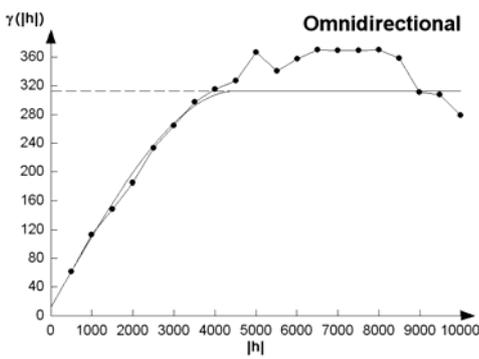
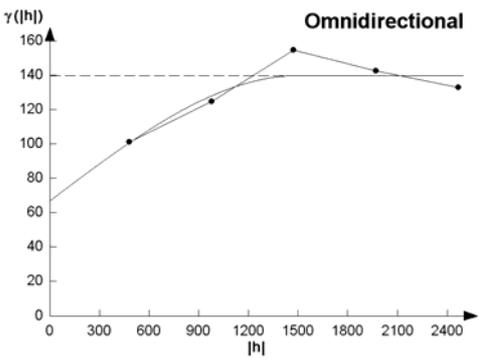
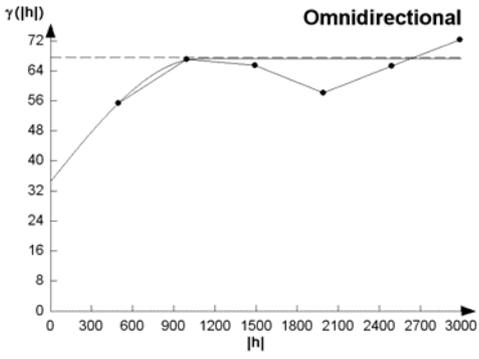
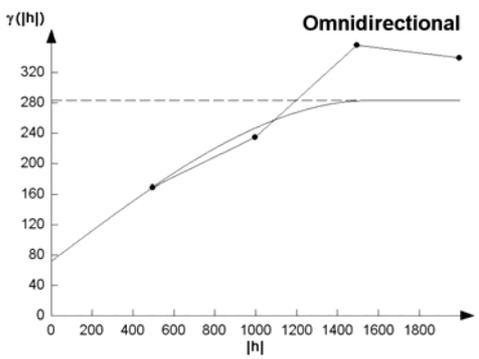
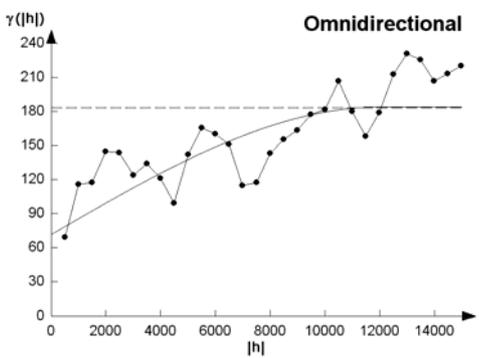
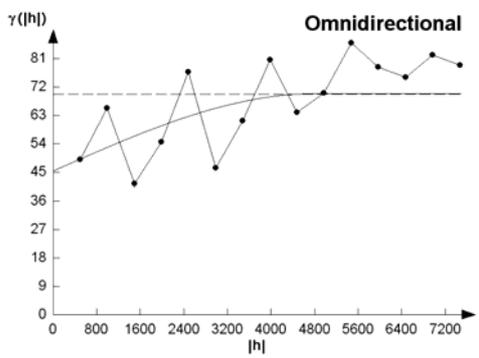
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 75,8</math>  Alcance = 1800 <math>\bar{E} = 75,8</math>  Sill = 227,5 <math>EMA = 8,2</math>  Nugget Effect = 15 <math>EMA\% = 10,8</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 72,2</math>  Alcance = 1343,6 <math>\bar{E} = 72,1</math>  Sill = 105 <math>EMA = 10,9</math>  Nugget Effect = 105 <math>EMA\% = 15,1</math></p>
<b>166ECE0150</b>	<b>166ECE0350</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 56,3</math>  Alcance = 7565 <math>\bar{E} = 55,9</math>  Sill = 100,8 <math>EMA = 6,2</math>  Nugget Effect = 51,2 <math>EMA\% = 11,0</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 74,0</math>  Alcance = 1482 <math>\bar{E} = 73,8</math>  Sill = 226,8 <math>EMA = 10,8</math>  Nugget Effect = 43,2 <math>EMA\% = 14,6</math></p>
<b>168ECE0250 até 168ECE0270</b>	<b>168ECE0370</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 74,3</math>  Alcance = 6440 <math>\bar{E} = 74,2</math>  Sill = 283,5 <math>EMA = 11,7</math>  Nugget Effect = 157,5 <math>EMA\% = 15,8</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 67,9</math>  Alcance = 2970 <math>\bar{E} = 67,8</math>  Sill = 27 <math>EMA = 8,1</math>  Nugget Effect = 117 <math>EMA\% = 11,9</math></p>
<b>168ECE0430</b>	<b>176ECE0070</b>

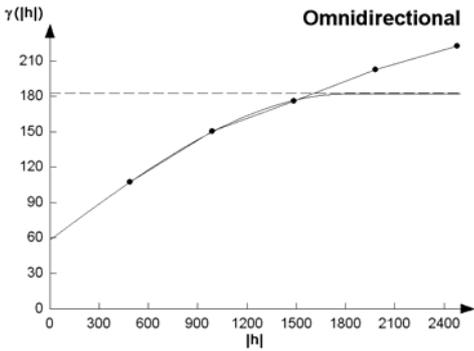
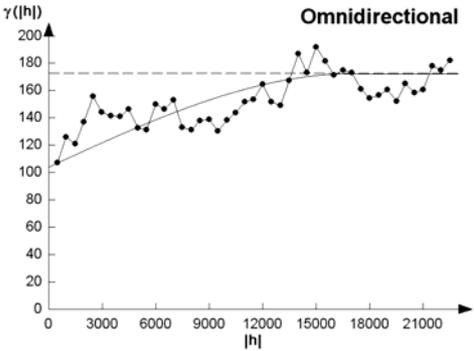
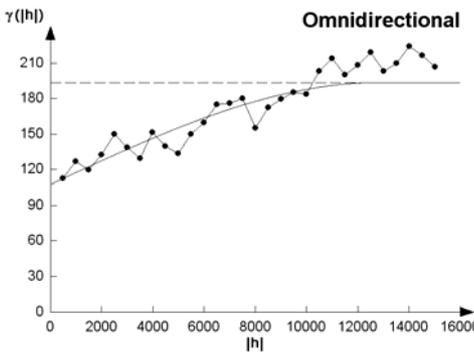
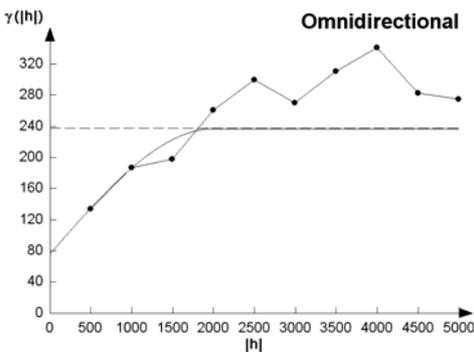
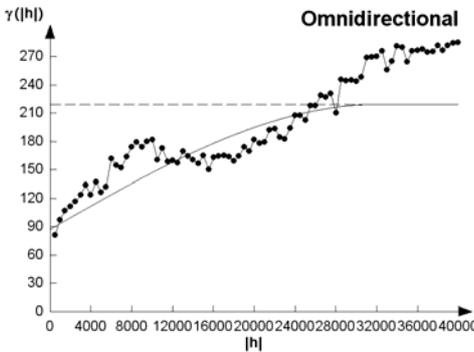
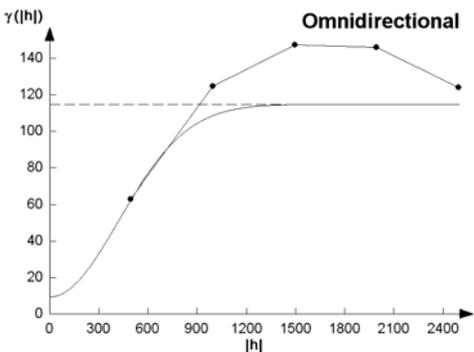
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 79,1</math>  Alcance = 36800 <math>\bar{E} = 79,2</math>  Sill = 107,8 <math>EMA = 7,5</math>  Nugget Effect = 110 <math>EMA\% = 9,5</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 80,6</math>  Alcance = 51000 <math>\bar{E} = 80,6</math>  Sill = 321,9 <math>EMA = 3,7</math>  Nugget Effect = 37 <math>EMA\% = 4,6</math></p>
<b>176ECE0110 até 176ECE0250</b>	<b>176ECE0330 até 176ECE0430</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 79,3</math>  Alcance = 45080 <math>\bar{E} = 79,3</math>  Sill = 135,7 <math>EMA = 8,0</math>  Nugget Effect = 92 <math>EMA\% = 10,1</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 81,3</math>  Alcance = 7000 <math>\bar{E} = 81,2</math>  Sill = 85,4 <math>EMA = 8,2</math>  Nugget Effect = 51,8 <math>EMA\% = 10,1</math></p>
<b>CE - 178</b>	<b>179ECE0050 até 179ECE0070</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 58,5</math>  Alcance = 10400 <math>\bar{E} = 58,4</math>  Sill = 178 <math>EMA = 4,4</math>  Nugget Effect = 20 <math>EMA\% = 7,5</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 84,6</math>  Alcance = 1280 <math>\bar{E} = 84,7</math>  Sill = 26,4 <math>EMA = 6,4</math>  Nugget Effect = 82,5 <math>EMA\% = 7,6</math></p>
<b>179ECE0230</b>	<b>CE - 183</b>

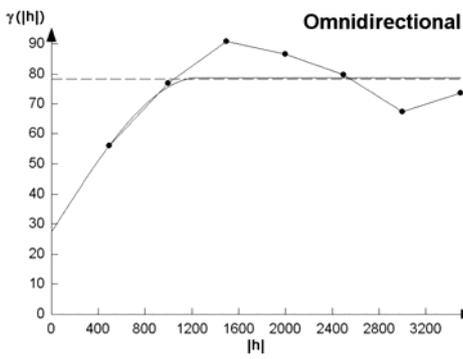
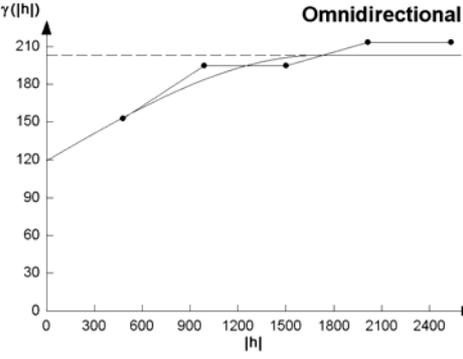
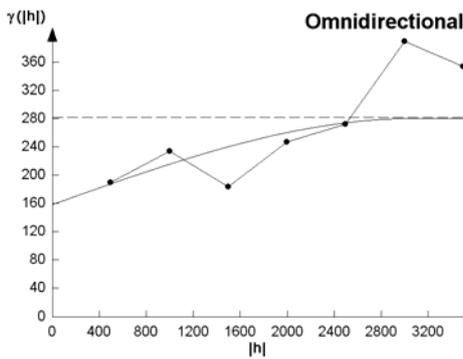
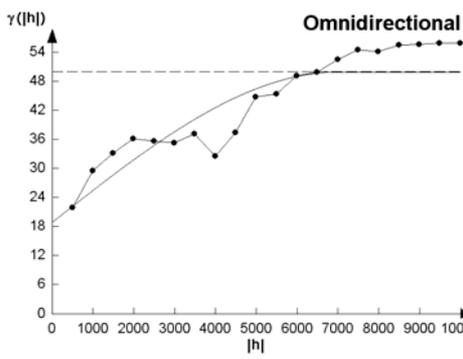
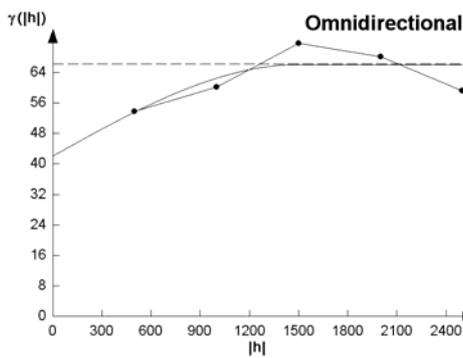
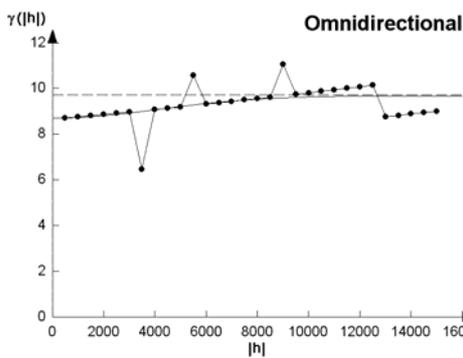
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 83,1</math>  Alcance = 25200 <math>\bar{E} = 83,1</math>  Sill = 113,4 <math>EMA = 4,7</math>  Nugget Effect = 63 <math>EMA\% = 5,7</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 82,3</math>  Alcance = 5250 <math>\bar{E} = 82,3</math>  Sill = 47,6 <math>EMA = 8,2</math>  Nugget Effect = 113,9 <math>EMA\% = 9,9</math></p>
<b>187ECE0210 até 187ECE0530</b>	<b>CE - 189</b>
 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 78,3</math>  Alcance = 2135 <math>\bar{E} = 78,2</math>  Sill = 210,6 <math>EMA = 7,4</math>  Nugget Effect = 54 <math>EMA\% = 9,5</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 40,5</math>  Alcance = 3050 <math>\bar{E} = 40,2</math>  Sill = 442,5 <math>EMA = 13,0</math>  Nugget Effect = 141,6 <math>EMA\% = 32,2</math></p>
<b>CE - 216</b>	<b>CE - 243</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 75,9</math>  Alcance = 1080 <math>\bar{E} = 74,9</math>  Sill = 340,3 <math>EMA = 12,2</math>  Nugget Effect = 69,7 <math>EMA\% = 16,1</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 86,0</math>  Alcance = 1650 <math>\bar{E} = 85,8</math>  Sill = 101,4 <math>EMA = 5,3</math>  Nugget Effect = 22,1 <math>EMA\% = 6,1</math></p>
<b>CE - 251</b>	<b>253ECE0490 até 253ECE0510</b>

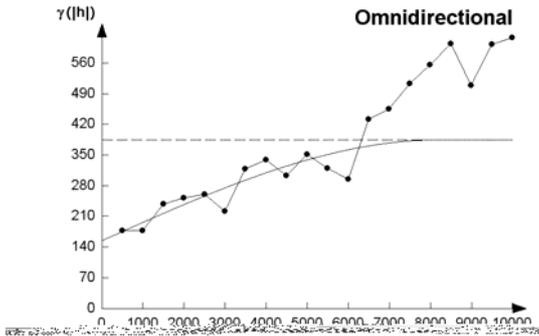
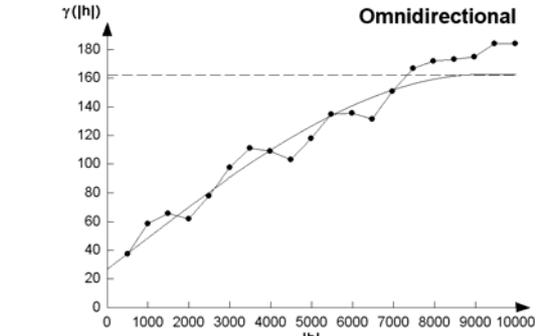
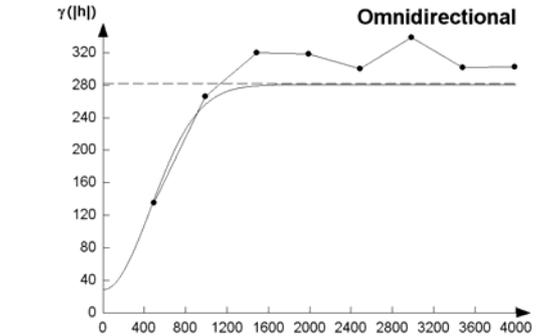
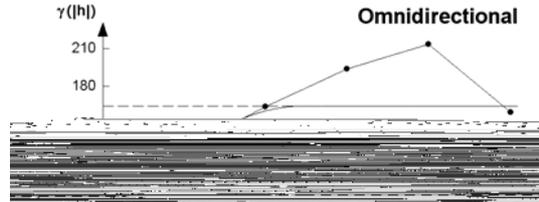
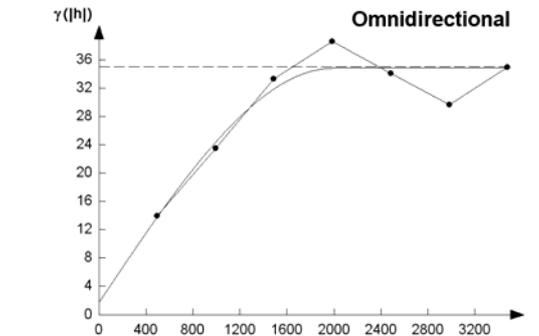
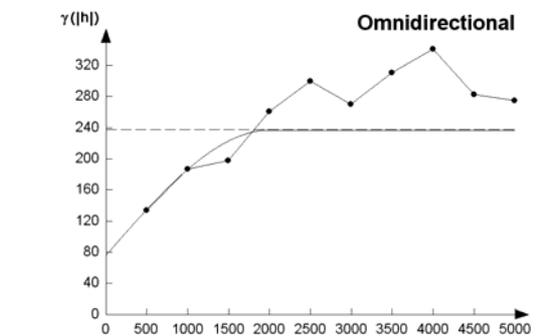
 <p>Modelo = Exponencial      <math>\bar{O} = 78,7</math>  Alcance = 26250              <math>\bar{E} = 78,7</math>  Sill = 147,2                  <math>EMA = 7,8</math>  Nugget Effect = 82,8        <math>EMA\% = 9,9</math></p>	 <p>Modelo = Esférico              <math>\bar{O} = 88,5</math>  Alcance = 2340                <math>\bar{E} = 88,5</math>  Sill = 15,17                  <math>EMA = 2,8</math>  Nugget Effect = 21,83        <math>EMA\% = 3,1</math></p>
<b>257ECE0170 até 257ECE0290</b>	<b>CE - 263</b>
 <p>Modelo = Esférico              <math>\bar{O} = 86,3</math>  Alcance = 14400              <math>\bar{E} = 86,3</math>  Sill = 40,7                    <math>EMA = 4,8</math>  Nugget Effect = 66            <math>EMA\% = 5,5</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano            <math>\bar{O} = 78,3</math>  Alcance = 4000                <math>\bar{E} = 78,2</math>  Sill = 100,5                  <math>EMA = 6,9</math>  Nugget Effect = 45            <math>EMA\% = 8,8</math></p>
<b>265ECE0110 até 265ECE0210</b>	<b>265ECE0370 até 265ECE0390</b>
 <p>Modelo = Esférico              <math>\bar{O} = 74,8</math>  Alcance = 4400                <math>\bar{E} = 74,7</math>  Sill = 92,4                    <math>EMA = 10,7</math>  Nugget Effect = 113,4        <math>EMA\% = 14,3</math></p>	 <p>Modelo = Esférico              <math>\bar{O} = 62,1</math>  Alcance = 3100                <math>\bar{E} = 61,9</math>  Sill = 114                    <math>EMA = 12,2</math>  Nugget Effect = 180         <math>EMA\% = 19,7</math></p>
<b>CE - 266</b>	<b>CE - 275</b>

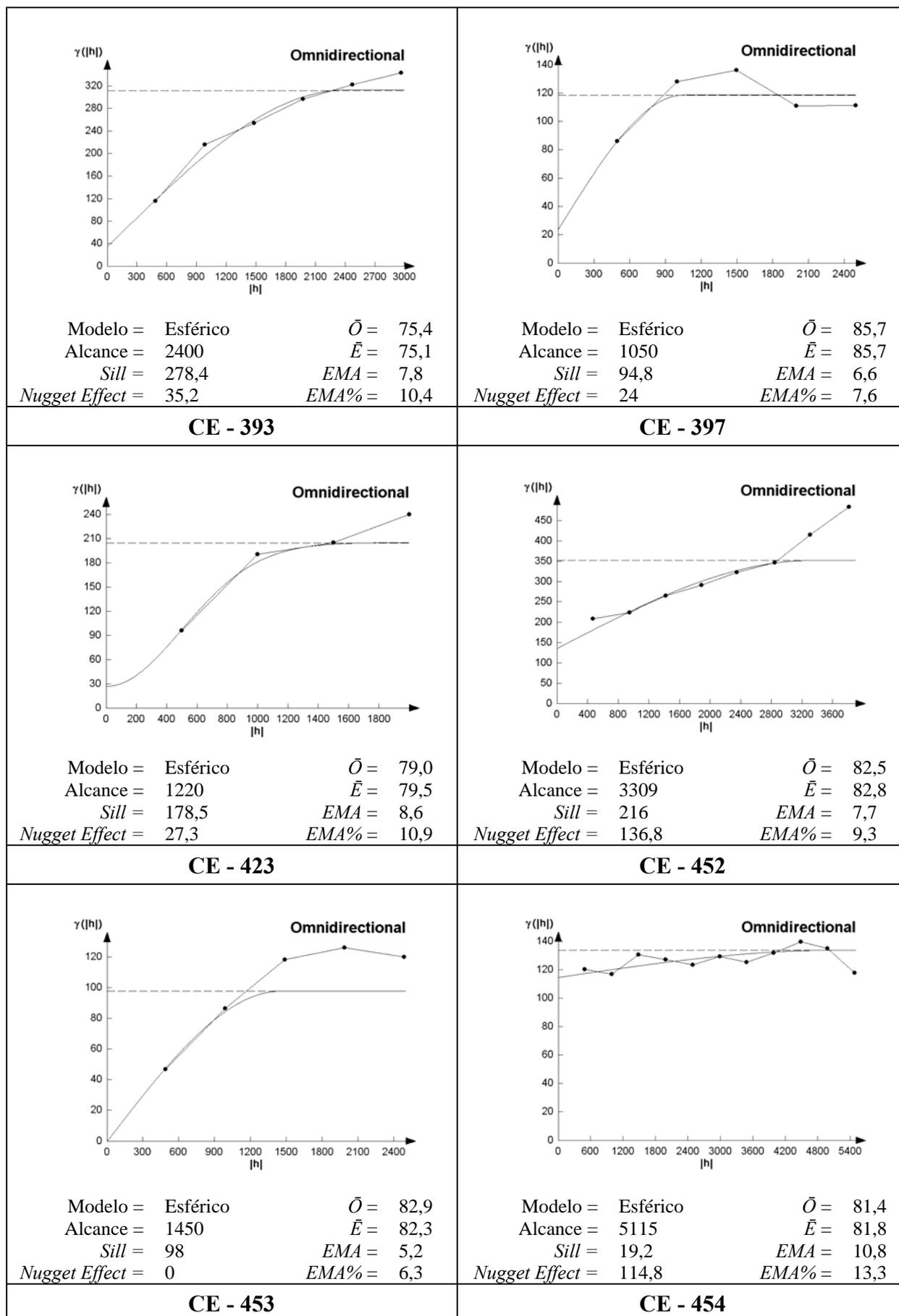
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 69,1</math>  Alcance = 1650 <math>\bar{E} = 69,0</math>  Sill = 100,8 <math>EMA = 9,3</math>  Nugget Effect = 72 <math>EMA\% = 13,5</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 85,8</math>  Alcance = 1060 <math>\bar{E} = 85,4</math>  Sill = 68,25 <math>EMA = 5,3</math>  Nugget Effect = 6,75 <math>EMA\% = 6,1</math></p>
<b>277ECE0010</b>	<b>282ECE0070</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 82,9</math>  Alcance = 1530 <math>\bar{E} = 82,6</math>  Sill = 135 <math>EMA = 7,2</math>  Nugget Effect = 36 <math>EMA\% = 8,7</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 76,7</math>  Alcance = 31000 <math>\bar{E} = 76,7</math>  Sill = 110 <math>EMA = 7,8</math>  Nugget Effect = 88 <math>EMA\% = 10,1</math></p>
<b>282ECE0110 até 282ECE0130</b>	<b>CE - 284</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 79,9</math>  Alcance = 11440 <math>\bar{E} = 79,8</math>  Sill = 112 <math>EMA = 7,8</math>  Nugget Effect = 84 <math>EMA\% = 9,7</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 83,2</math>  Alcance = 2700 <math>\bar{E} = 83,2</math>  Sill = 61,2 <math>EMA = 4,9</math>  Nugget Effect = 46,8 <math>EMA\% = 5,9</math></p>
<b>CE - 288</b>	<b>CE - 292</b>

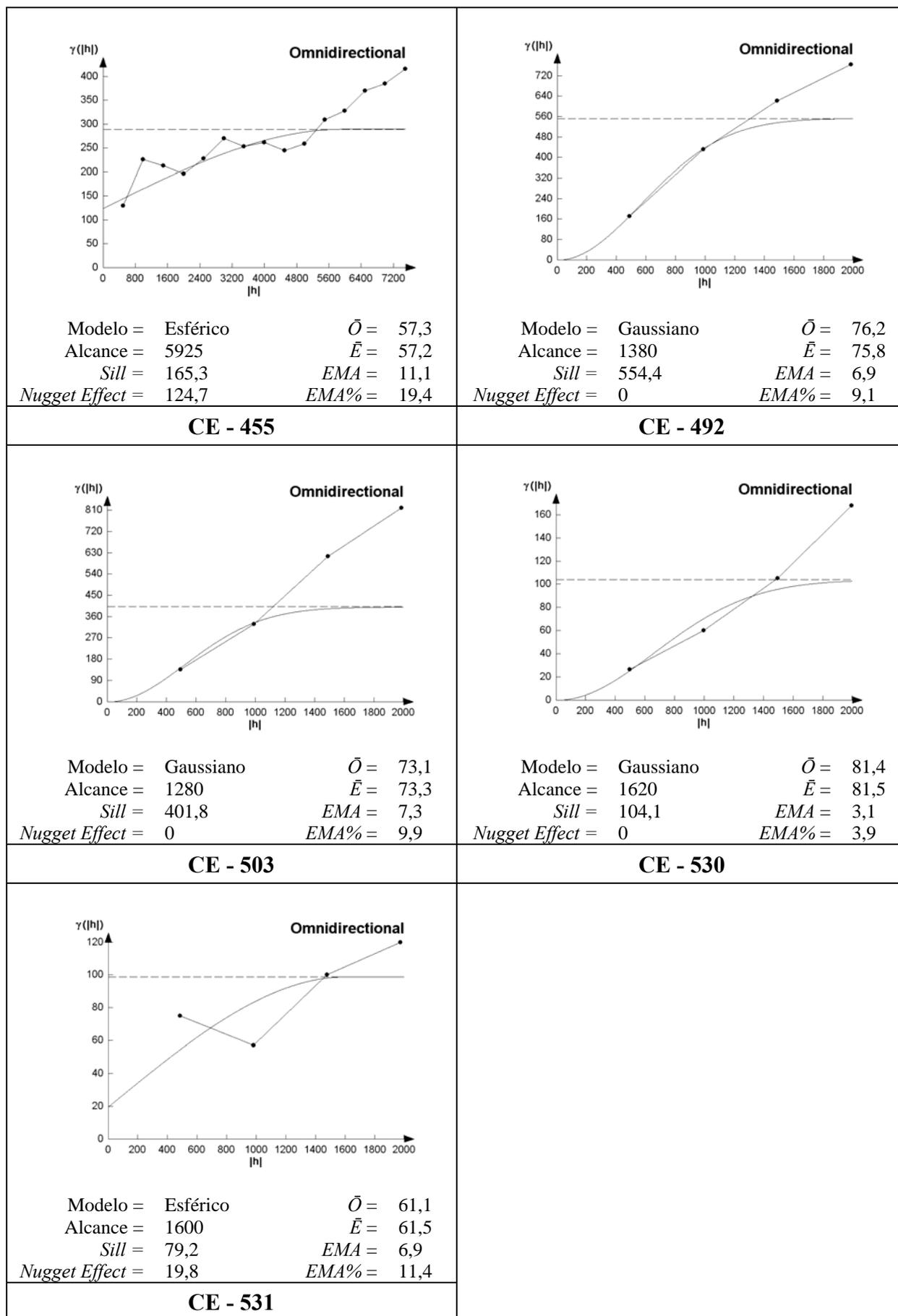
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 81,9</math>  Alcance = 4500 <math>\bar{E} = 81,8</math>  Sill = 300,8 <math>EMA = 4,3</math>  Nugget Effect = 12,8 <math>EMA\% = 5,2</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 84,1</math>  Alcance = 1500 <math>\bar{E} = 84,0</math>  Sill = 72,8 <math>EMA = 8,4</math>  Nugget Effect = 67,2 <math>EMA\% = 10,2</math></p>
<b>CE - 293</b>	<b>348ECE0130 até 348ECE0170</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 87,5</math>  Alcance = 1080 <math>\bar{E} = 87,5</math>  Sill = 32,64 <math>EMA = 4,6</math>  Nugget Effect = 34,68 <math>EMA\% = 5,2</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 72,2</math>  Alcance = 1560 <math>\bar{E} = 71,7</math>  Sill = 211,7 <math>EMA = 12,0</math>  Nugget Effect = 72,5 <math>EMA\% = 16,6</math></p>
<b>354ECE0150 até 354ECE0270</b>	<b>354ECE0410</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 81,4</math>  Alcance = 12000 <math>\bar{E} = 81,5</math>  Sill = 112,1 <math>EMA = 7,5</math>  Nugget Effect = 72,2 <math>EMA\% = 9,2</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 86,2</math>  Alcance = 4800 <math>\bar{E} = 86,1</math>  Sill = 24,5 <math>EMA = 5,2</math>  Nugget Effect = 45,5 <math>EMA\% = 6,0</math></p>
<b>354ECE0530 até 354ECE0550</b>	<b>356ECE0010 até 356ECE0070</b>

 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 85,6</math>  Alcance = 1800 <math>\bar{E} = 85,6</math>  Sill = 123,5 <math>EMA = 4,9</math>  Nugget Effect = 58,9 <math>EMA\% = 5,7</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 82,3</math>  Alcance = 17071 <math>\bar{E} = 82,2</math>  Sill = 68,4 <math>EMA = 8,7</math>  Nugget Effect = 104,4 <math>EMA\% = 10,6</math></p>
<b>CE - 358</b>	<b>362ECE0030 até 362ECE0110</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 80,2</math>  Alcance = 12800 <math>\bar{E} = 80,1</math>  Sill = 86 <math>EMA = 9,2</math>  Nugget Effect = 108 <math>EMA\% = 11,5</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 67,7</math>  Alcance = 2000 <math>\bar{E} = 67,8</math>  Sill = 160,8 <math>EMA = 10,9</math>  Nugget Effect = 76,8 <math>EMA\% = 16,1</math></p>
<b>362ECE0190 até 362ECE0270</b>	<b>363ECE0050</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 77,4</math>  Alcance = 32000 <math>\bar{E} = 77,4</math>  Sill = 132 <math>EMA = 7,6</math>  Nugget Effect = 88 <math>EMA\% = 9,8</math></p>	 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 78,0</math>  Alcance = 1025 <math>\bar{E} = 77,9</math>  Sill = 105,6 <math>EMA = 7,4</math>  Nugget Effect = 9,6 <math>EMA\% = 9,4</math></p>
<b>CE - 364</b>	<b>366ECE0190</b>

 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 87,0</math>  Alcance = 1260 <math>\bar{E} = 87,0</math>  Sill = 51,35 <math>EMA = 4,9</math>  Nugget Effect = 27,65 <math>EMA\% = 5,6</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 62,2</math>  Alcance = 1716 <math>\bar{E} = 62,0</math>  Sill = 84 <math>EMA = 11,0</math>  Nugget Effect = 119,7 <math>EMA\% = 17,6</math></p>
<b>CE - 368</b>	<b>371ECE0010 até 371ECE0050</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 44,3</math>  Alcance = 3080 <math>\bar{E} = 43,8</math>  Sill = 121,8 <math>EMA = 13,9</math>  Nugget Effect = 159,5 <math>EMA\% = 31,5</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 88,7</math>  Alcance = 7000 <math>\bar{E} = 88,7</math>  Sill = 31 <math>EMA = 2,03</math>  Nugget Effect = 19 <math>EMA\% = 2,3</math></p>
<b>371ECE0130</b>	<b>371ECE0230 até 371ECE0390</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 73,2</math>  Alcance = 1500 <math>\bar{E} = 73,1</math>  Sill = 24,12 <math>EMA = 4,8</math>  Nugget Effect = 42,21 <math>EMA\% = 6,9</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 90,0</math>  Alcance = 10080 <math>\bar{E} = 90,0</math>  Sill = 0,98 <math>EMA = 0,9</math>  Nugget Effect = 8,722 <math>EMA\% = 1,0</math></p>
<b>371ECE0450</b>	<b>371ECE0570 até 371ECE0610</b>

 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 62,8</math>  Alcance = 8200 <math>\bar{E} = 62,5</math>  Sill = 230,1 <math>EMA = 10,8</math>  Nugget Effect = 156 <math>EMA\% = 17,2</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 84,9</math>  Alcance = 9200 <math>\bar{E} = 84,9</math>  Sill = 136 <math>EMA = 3,4</math>  Nugget Effect = 27,2 <math>EMA\% = 4,0</math></p>
<b>375ECE0050</b>	<b>375ECE0110 até 375ECE0170</b>
 <p>Modelo = Gaussiano <math>\bar{O} = 82,6</math>  Alcance = 1120 <math>\bar{E} = 82,5</math>  Sill = 252,3 <math>EMA = 7,3</math>  Nugget Effect = 29 <math>EMA\% = 8,9</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 83,1</math>  Alcance = 1200 <math>\bar{E} = 83,0</math>  Sill = 81,6 <math>EMA = 9,4</math>  Nugget Effect = 83,3 <math>EMA\% = 11,3</math></p>
<b>377ECE0010 até 377ECE0090</b>	<b>377ECE0130 até 377ECE0150</b>
 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 89,1</math>  Alcance = 1200 <math>\bar{E} = 89,1</math>  Sill = 81,6 <math>EMA = 1,2</math>  Nugget Effect = 83,3 <math>EMA\% = 1,4</math></p>	 <p>Modelo = Esférico <math>\bar{O} = 70,6</math>  Alcance = 7020 <math>\bar{E} = 70,5</math>  Sill = 150,8 <math>EMA = 11,6</math>  Nugget Effect = 136,3 <math>EMA\% = 16,5</math></p>
<b>CE - 384</b>	<b>386ECE0010 até 386ECE0050</b>





### APÊNDICE III

#### (Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica no estado da Paraíba)

##### Considerações:

O *SNC* foi calculado pelo método de Queiroz (1981), a partir de relações estabelecidas com o *ISC* de camadas granulares.

Para a correção do subleito no *SNC* foi utilizado diretamente o valor de *ISC* disponível. Além disso, a análise foi feita considerando o revestimento em sua situação inicial (abertura ao tráfego –  $a_1 = 0,173$ ).

Código	Tipo Material
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
AAUQ	Areia Asfalto Usinado à Quente
PMQ	Pré-Misturado à Quente
PMF	Pré-Misturado à Frio
TST	Tratamento Superficial Triplo
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
AAUF	Areia Asfalto Usinado à Frio
LAMA	Lama Asfáltica
MICRO	Micro Concreto
BIND	Binder
RP	Revestimento Primário
LEN	Leito Natural
BCOR	Brita Corrida
BGRA	Brita Graduada
SBRI	Solo Brita
SEG	Solo Estabilizado
SCAL	Solo Cal
SCIM	Solo Cimento
MHID	Macadame Hidráulico
MBET	Macadame Betuminoso
SARG	Solo Argiloso
SARE	Solo Arenoso
SROC	Solo Rochoso
SLAT	Solo Laterítico

Índice de Gravidade Global (IGG)

Identificação		Classificação Climática			Revestimento			Base Granular			Sub-Base Granular			Capacidade Estrutural na Abertura			Características no Levantamento									
Trecho	KMI	KMF	EXT	Clima	C	Material	H <sub>REV</sub> (cm)	E <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	CBR <sub>B</sub> (%)	a <sub>2</sub>	H <sub>BASE</sub> (cm)	CBR <sub>SB</sub> (%)	a <sub>3</sub>	CBR <sub>SEL</sub> (%)	SVC	AASHTO	S	IGG	CONCEITO	Idade da Capa	N <sub>norm</sub>	N	
Rodovia	PB-073	0-520	1+300	780	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	25	0,024	20	40	0,045	5	2,839	17,00	-1	213	PESSIMO	17,00	5,23E+05	1,05E+07	1
	PB-073	4+100	5+100	1000	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	94	0,054	20	46	0,046	5	3,463	17,00	0	106	RUIIM	17,00	5,23E+05	1,05E+07	1
	PB-073	8+660	9+080	1020	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	78	0,051	20	39	0,045	23	4,527	17,00	1	75	REGULAR	17,00	5,23E+05	1,05E+07	1
	PB-073	2-920	3+600	480	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	58	0,044	20	17	0,035	23	4,208	23,00	1	34	BOM	23,00	1,92E+05	5,53E+06	0
	PB-073	7-580	8+900	1320	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	57	0,043	20	56	0,049	26	4,526	23,00	1	50	REGULAR	23,00	1,92E+05	5,53E+06	0
	PB-073	11+560	13+780	2220	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	59	0,044	20	38	0,044	17	4,224	23,00	1	48	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	16+580	17+200	620	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	52	0,041	20	10	0,030	13	6,688	23,00	0	61	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	17+220	18+960	1740	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	22	0,022	20	1	0,004	13	2,787	23,00	-1	134	RUIIM	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	25+120	26+260	1140	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	30	0,028	20	35	0,043	28	4,146	23,00	1	50	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	27+860	28+160	300	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	26	0,025	20	79	0,053	22	4,148	23,00	1	41	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	29+920	30+200	280	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	14	0,015	20	55	0,048	26	3,946	23,00	0	58	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	30+220	31+300	1080	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	14	0,015	20	55	0,048	26	3,946	23,00	0	57	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	32+020	32+940	920	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	30	0,028	20	28	0,041	18	3,864	23,00	0	67	REGULAR	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	34+300	35+560	1260	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	52	0,041	20	43	0,046	43	4,622	23,00	1	37	BOM	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	35+580	37+100	1520	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	MHID	20	48	0,039	20	21	0,038	21	4,821	23,00	1	38	BOM	23,00	1,74E+05	5,02E+06	0
	PB-073	0+240	1+280	1040	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	88	0,053	20	84	0,033	27	4,821	23,00	1	56	REGULAR	23,00	2,58E+05	7,45E+06	0
	PB-073	2+100	3+060	960	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	134	0,057	20	116	0,057	33	5,057	23,00	1	47	REGULAR	23,00	2,58E+05	7,45E+06	0
	PB-073	8+980	9+200	220	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	63	0,046	20	42	0,045	26	4,510	23,00	1	52	REGULAR	23,00	2,58E+05	7,45E+06	0
	PB-073	7+160	8+020	860	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	61	0,045	20	60	0,049	21	4,464	23,00	1	55	REGULAR	23,00	2,58E+05	7,45E+06	0
	PB-073	8+040	8+940	900	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	0,173	SNAT	20	61	0,045	20	60	0,049	21	4,464	23,00	1	55	REGULAR	23,00	2,58E+05	7,45E+06	0
	PB-325	0+620	2+600	1980	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	71	0,049	20	23	0,039	7	3,526	15,00	0	89	RUIIM	15,00	5,87E+05	1,02E+07	1
	PB-325	2+600	4+600	2000	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	61	0,045	20	33	0,043	11	3,910	15,00	0	93	RUIIM	15,00	5,87E+05	1,02E+07	1
	PB-325	4+600	6+600	2000	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	47	0,039	20	48	0,047	26	4,395	15,00	1	79	REGULAR	15,00	5,87E+05	1,02E+07	1
	PB-325	6+600	7+660	1060	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	46	0,038	20	22	0,038	14	3,853	15,00	0	100	RUIIM	15,00	5,87E+05	1,02E+07	1
	PB-325	11+300	12+800	1500	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	91	0,053	20	34	0,043	12	4,146	15,00	1	99	RUIIM	15,00	5,87E+05	1,02E+07	1
	PB-325	14+660	15+820	1160	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	41	0,035	20	19	0,037	8	3,333	15,00	0	94	RUIIM	15,00	1,94E+05	3,36E+06	-1
	PB-325	3+680	5+540	1860	SEMI-ÁRIDO	0,5	CBUQ	5	0,173	SARE	20	16	0,016	20	60	0,049	6	2,954	15,00	-1	159	RUIIM	15,00	1,79E+05	3,10E+06	-1
	Mínimo																									34
	Mediana																									76
	Máximo																									58
																										213

Deflexão Máxima com Viga Benkelman ( $Do_{1/2}$ )

Rodovia		Identificação				Classificação Climática		Revestimento				Base Granular				Sub-Base Granular				Capacidade Estrutural na Abertura		Características no levantamento				
		Trecho	KMI	KMF	EXT	Clima	C	Material	$H_{REV}$ (cm)	$E_{REV}$ (Mpa)	$a_1$	Material	$H_{BASE}$ (cm)	$CBR_{SP}$ (%)	$a_2$	$H_{SUB-BASE}$ (cm)	$CBR_{SP}$ (%)	$a_3$	$CBR_{SL}$ (%)	SNC AASHTO	S	$Do_{1/2}$ ( $10^{-3}$ mm)	Rc	Tolde da Capta	Normal	$N_{base}$
PB-073	PB-073/001	8+060	9+080	1020	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	78	0,051	20	39	0,045	23	4,527	1	50	144	17,00	5,23E+05	1,05E+06
PB-073	PB-073/003	0+000	0+560	560	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	30	0,028	20	23	0,039	23	3,957	0	44	155	23,00	1,92E+05	5,53E+06
PB-073	PB-073/003	2+920	3+400	480	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	58	0,044	20	17	0,035	23	4,208	1	34	187	23,00	1,92E+05	5,53E+06
PB-073	PB-073/003	3+420	4+260	840	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	47	0,044	20	36	0,044	21	4,221	1	36	189	23,00	1,92E+05	5,53E+06
PB-073	PB-073/003	7+580	8+900	1320	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	57	0,043	20	56	0,049	26	4,526	0	37	166	23,00	1,92E+05	5,53E+06
PB-073	PB-073/007	15+660	16+560	900	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	MHID	20	52	0,041	20	10	0,030	13	3,688	0	40	169	23,00	1,74E+05	5,02E+06
PB-073	PB-073/007	32+960	33+560	600	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	MHID	20	30	0,028	20	28	0,041	18	3,864	0	41	181	23,00	1,74E+05	5,02E+06
PB-073	PB-073/007	34+300	35+560	1260	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	MHID	20	52	0,041	20	43	0,046	43	4,622	1	31	233	23,00	1,74E+05	5,02E+06
PB-073	PB-073/007	0+000	0+220	220	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	88	0,053	20	84	0,053	27	4,821	1	40	195	23,00	2,58E+05	7,45E+06
PB-073	PB-073/017	8+960	9+200	240	SUB-UMIDO	UMIDO	-0,5	CBUQ	5	-	0,173	SNAT	20	88	0,053	20	74	0,052	29	4,825	1	36	153	23,00	2,58E+05	7,45E+06
PB-325	PB-325/001	0+000	0+620	620	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	71	0,049	20	23	0,039	7	3,526	0	60	107	15,00	5,87E+05	1,02E+07	
PB-325	PB-325/001	8+420	9+600	1180	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	122	0,056	20	34	0,043	21	4,563	1	55	228	15,00	5,87E+05	1,02E+07	
PB-325	PB-325/003	12+800	13+500	700	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	91	0,053	20	34	0,043	12	4,146	1	33	171	15,00	1,94E+05	3,36E+06	
PB-325	PB-325/003	13+500	14+660	1160	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	41	0,035	20	19	0,037	8	3,333	0	31	310	15,00	1,94E+05	3,36E+06	
PB-325	PB-325/003	15+820	16+680	860	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	116	0,056	20	58	0,049	5	3,559	0	36	217	15,00	1,94E+05	3,36E+06	
PB-325	PB-325/003	16+680	17+180	500	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	116	0,056	20	58	0,049	5	3,559	0	30	323	15,00	1,94E+05	3,36E+06	
PB-325	PB-325/003	17+180	18+840	1660	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	62	0,045	20	39	0,045	12	4,019	1	30	253	15,00	1,94E+05	3,36E+06	
PB-325	PB-325/005	0+000	1+200	1200	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	76	0,050	20	30	0,042	35	4,648	1	26	281	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/005	1+200	1+860	660	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	76	0,050	20	30	0,042	35	4,648	1	26	371	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/005	1+860	3+680	1820	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	48	0,039	20	16	0,035	16	3,891	0	33	328	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/005	5+540	6+380	840	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	36	0,032	20	32	0,042	0	3,643	0	291	291	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/005	7+760	9+080	1320	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	65	0,047	20	79	0,053	19	4,499	1	27	342	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/005	9+080	10+700	1620	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	86	0,052	20	22	0,038	31	4,577	1	33	257	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/007	15+000	17+000	2000	SEMI-ARIDO	0,5	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	28	0,026	20	58	0,049	41	4,379	1	30	469	15,00	1,79E+05	3,10E+06	
PB-325	PB-325/007	26+000	27+000	1000	SUB-UMIDO	SECO	0	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	57	0,043	20	27	0,041	20	4,227	1	32	254	15,00	1,97E+05	3,40E+06
PB-325	PB-325/009	30+000	32+000	2000	SUB-UMIDO	SECO	0	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	51	0,041	20	43	0,046	20	4,275	1	31	218	15,00	1,32E+05	2,28E+06
PB-325	PB-325/009	35+900	37+900	2000	SUB-UMIDO	SECO	0	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	63	0,046	20	13	0,032	20	4,113	1	28	317	15,00	1,32E+05	2,28E+06
PB-325	PB-325/011	44+240	45+000	760	SUB-UMIDO	SECO	0	CBUQ	5	-	0,173	SARE	20	58	0,044	20	21	0,038	20	4,179	1	26	300	15,00	1,32E+05	2,28E+06
Mínimo																			3,333							2,28E+06
Médiana																			4,180							4,70E+06
Máximo																			4,215							3,56E+06
																			4,825							1,05E+07

## APÊNDICE IV

### (Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Tratamento Superficial no estado da Paraíba)

#### Considerações:

O *SNC* foi calculado pelo método de Queiroz (1981), a partir de relações estabelecidas com o *ISC* de camadas granulares.

Para a correção do subleito no *SNC* foi utilizado diretamente o valor de *ISC* disponível. Além disso, a análise foi feita considerando o revestimento em sua situação inicial (abertura ao tráfego –  $a_1 = 0,04$ ).

<b>Código</b>	<b>Tipo Material</b>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
AAUQ	Areia Asfalto Usinado à Quente
PMQ	Pré-Misturado à Quente
PMF	Pré-Misturado à Frio
TST	Tratamento Superficial Triplo
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
AAUF	Areia Asfalto Usinado à Frio
LAMA	Lama Asfáltica
MICRO	Micro Concreto
BIND	Binder
RP	Revestimento Primário
LEN	Leito Natural
BCOR	Brita Corrida
BGRA	Brita Graduada
SBRI	Solo Brita
SEG	Solo Estabilizado
SCAL	Solo Cal
SCIM	Solo Cimento
MHID	Macadame Hidráulico
MBET	Macadame Betuminoso
SARG	Solo Argiloso
SARE	Solo Arenoso
SROC	Solo Rochoso
SLAT	Solo Laterítico

Índice de Gravidade Global (IGG)

Rodovia	Trecho	Identificação				Classificação Climática		Revestimento				Base Granular				Sub-Base Granular				Capacidade Estrutural na Abertura				Características no Levantamento			
		KMI	KMF	EXT	C	Material	Esp. (cm)	E <sub>rev</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>base</sub> (cm)	CBR <sub>90</sub> (%)	a <sub>2</sub>	H <sub>sub-base</sub> (cm)	CBR <sub>90</sub> (%)	a <sub>3</sub>	CBR <sub>90</sub> (%)	SVC AASHTO	Δ	IGG	CONCRETO	Idade da Capa	Nominal	N <sub>nom</sub>	N		
																										UMIDO	SEMI-ARIDO
PB-004	PB-004/005	4-800	6-200	1220	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	82	0,051	20	62	0,050	20	62	0,050	20	103	RUM	9,00	2,38E-05	2,33E-06	1		
PB-018	PB-018/001	1-760	2-800	1040	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	15	54	0,042	15	51	0,048	15	51	0,048	15	131	RUM	11,00	2,01E-05	2,45E-06	1		
PB-018	PB-018/003	7-520	8-400	880	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	15	34	0,041	15	27	0,041	10	2,399	11,00	-1	77	REGULAR	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0		
PB-018	PB-018/003	8-420	8-900	540	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	15	61	0,045	15	16	0,035	3	1,348	11,00	-1	72	REGULAR	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0		
PB-018	PB-018/003	8-980	10-1000	1020	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	15	61	0,045	15	16	0,035	36	3,271	11,00	0	76	REGULAR	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0		
PB-018	PB-018/003	11-620	13-280	1660	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	15	38	0,043	15	60	0,049	36	3,315	11,00	0	99	RUM	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0		
PB-025	PB-025/001	0-400	1-920	1920	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	66	0,047	20	63	0,050	18	3,674	6,00	1	84	RUM	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-025	PB-025/001	1-640	2-820	600	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	66	0,047	20	75	0,052	10	3,306	6,00	0	75	REGULAR	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-025	PB-025/001	2-560	3-420	860	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	66	0,047	20	75	0,052	10	3,306	6,00	0	67	REGULAR	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-025	PB-025/001	4-540	5-140	600	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	63	0,046	20	22	0,038	3	1,833	6,00	-1	98	RUM	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-025	PB-025/001	5-160	6-580	1420	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	80	0,051	20	23	0,039	29	3,781	6,00	-1	74	REGULAR	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-025	PB-025/001	6-600	8-180	1380	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	68	0,048	20	23	0,039	17	3,429	6,00	0	86	RUM	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-025	PB-025/003	10-920	11-680	760	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	66	0,047	20	4	0,019	7	2,354	6,00	-1	96	RUM	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0		
PB-041	PB-041/007	0-400	0-340	340	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	14	0,015	20	95	0,055	41	3,503	16,00	1	103	RUM	16,00	1,39E-05	2,59E-06	1		
PB-041	PB-041/007	1-840	2-040	200	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	62	0,045	20	59	0,049	24	3,789	16,00	1	99	RUM	16,00	1,39E-05	2,59E-06	1		
PB-041	PB-041/007	2-840	3-040	200	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	62	0,045	20	55	0,048	24	3,773	16,00	1	106	RUM	16,00	1,39E-05	2,59E-06	1		
PB-041	PB-041/007	4-140	4-840	700	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	52	0,041	20	46	0,046	23	3,625	16,00	1	109	RUM	16,00	1,39E-05	2,59E-06	1		
PB-065	PB-065/001	0-400	2-500	2500	-1	TSD	2,5	0,04	SARE	20	38	0,033	20	23	0,039	22	3,292	5,00	0	56	REGULAR	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1		
PB-065	PB-065/001	2-940	3-600	100	-1	TSD	2,5	0,04	SARE	20	17	0,017	20	49	0,047	31	3,305	5,00	0	60	REGULAR	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1		
PB-065	PB-065/001	3-060	3-680	620	-1	TSD	2,5	0,04	SARE	20	99	0,054	20	57	0,049	33	4,107	5,00	1	55	REGULAR	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1		
PB-079	PB-079/005	9-960	10-580	580	-1	TSD	2,5	0,04	SIAT	20	22	0,022	20	38	0,044	39	3,423	10,00	0	134	RUM	23,00	3,38E-04	2,57E-06	-1		
PB-087	PB-087/007	17-760	18-200	440	-1	TSD	2,5	0,04	SIAT	20	12	0,013	20	17	0,035	12	2,430	10,00	-1	43	REGULAR	10,00	3,38E-04	2,57E-06	-1		
PB-073	PB-073/019	0-220	0-960	740	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	99	0,054	20	10	0,030	9	2,925	13,00	1	99	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/019	5-600	5-980	380	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	47	0,039	20	41	0,045	25	3,591	13,00	1	95	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/019	7-400	7-600	200	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	60	0,045	20	69	0,051	4	2,388	13,00	-1	107	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/019	7-620	7-800	180	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	60	0,045	20	69	0,051	4	2,388	13,00	-1	113	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/019	10-540	10-920	380	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	48	0,039	20	17	0,035	32	3,518	13,00	1	93	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/019	13-840	14-220	380	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	26	0,025	20	99	0,055	40	3,709	13,00	1	86	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/021	25-600	26-000	400	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	64	0,046	20	74	0,052	28	3,928	13,00	1	90	RUM	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1		
PB-073	PB-073/023	28-480	28-720	220	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	77	0,050	20	90	0,054	37	4,168	13,00	1	58	REGULAR	13,00	1,25E-05	1,84E-06	0		
PB-073	PB-073/023	28-720	28-920	200	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	77	0,050	20	90	0,054	37	4,168	13,00	1	72	REGULAR	13,00	1,25E-05	1,84E-06	0		
PB-073	PB-073/023	28-940	29-160	220	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	77	0,050	20	62	0,050	5	2,710	13,00	0	89	RUM	13,00	1,25E-05	1,84E-06	0		
PB-105	PB-105/001	0-020	0-360	340	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	120	0,056	20	69	0,051	38	4,237	20,00	1	91	RUM	20,00	8,60E-04	2,09E-06	1		
PB-105	PB-105/001	7-980	8-240	260	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	143	0,057	20	58	0,049	25	4,031	20,00	1	106	RUM	20,00	8,60E-04	2,09E-06	1		
PB-148	PB-148/001	0-000	1-080	1080	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	91	0,053	20	58	0,049	55	4,251	11,00	-1	80	REGULAR	20,00	8,60E-04	2,09E-06	1		
PB-148	PB-148/001	1-080	1-080	1080	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	62	0,045	20	13	0,032	6	2,444	11,00	-1	170	PESSIMO	11,00	1,71E-05	2,08E-06	1		
PB-366	PB-366/011	8-020	8-620	600	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	67	0,047	20	32	0,042	18	3,531	0,00	1	32	BOM	0,00	1,00E-04	0,00E-00	-1		
PB-366	PB-366/011	9-600	10-000	400	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	67	0,047	20	48	0,047	26	3,819	0,00	1	29	BOM	0,00	1,00E-04	0,00E-00	-1		
PB-366	PB-366/011	11-840	11-920	740	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	67	0,047	20	48	0,047	26	3,819	0,00	1	32	BOM	0,00	1,00E-04	0,00E-00	-1		
PB-366	PB-366/011	12-760	13-940	1180	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	67	0,047	20	48	0,047	26	3,819	0,00	1	56	REGULAR	0,00	1,00E-04	0,00E-00	-1		
PB-108	PB-108/001	4-980	6-000	1020	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	28	0,026	20	20	0,037	8	2,419	15,00	-1	127	RUM	15,00	2,42E-05	4,19E-06	1		
PB-108	PB-108/001	3-220	3-220	600	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	48	0,039	20	52	0,048	10	3,069	11,00	0	155	RUM	11,00	9,70E-04	1,18E-06	0		
PB-108	PB-108/001	4-300	4-300	1080	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	11	0,012	20	49	0,047	5	1,886	11,00	-1	101	RUM	11,00	9,70E-04	1,18E-06	0		
PB-420	PB-420/001	4-500	5-620	1520	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	11	0,012	20	49	0,047	5	1,886	11,00	-1	108	RUM	11,00	9,70E-04	1,18E-06	0		
PB-420	PB-420/001	5-020	5-800	780	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	50	0,040	20	74	0,053	15	3,990	4,00	0	72	REGULAR	4,00	4,25E-05	1,75E-06	0		
PB-420	PB-420/001	0-000	0-900	900	-1	TSD	2,5	0,04	SNAT	20	67	0,047	20	52	0,042	21	3,619	8,00	1	29	REGULAR	8,00	2,94E-04	2,52E-05	-1		
Mínimo																									0,00E-00		
Média																										1,71E-06	
Mediana																										1,75E-06	
Máximo																										4,19E-06	

Deflexão Máxima com Viga Benkelman ( $Do_{1/8}$ )

Rodovia	Trecho	Identificação				Classificação Climática			Características da Estrutura do Pavimento										Características no Levantamento				
		KMI	KMF	EXT	C	Revestimento		Base Granular			Sub-Base Granular			CBR <sub>sl</sub> (%)	Capacidade Estrutural na Abertura		Do <sub>1/8</sub> (10 <sup>-2</sup> mm)	Re	Idade da Capa	N <sub>anual</sub>	N <sub>sem</sub>		
						Material	H <sub>rev</sub> (cm)	E <sub>rev</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>base</sub> (cm)	CBR <sub>sb</sub> (%)	a <sub>2</sub>		H <sub>sub</sub> (cm)	CBR <sub>sb</sub> (%)						a <sub>3</sub>	SVC AASHTO
PB-004	PB-004/005	8-220	9-220	1000	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	93	0,054	20	15	0,034	18	3,490	9,00	2,38E-05	2,32E-06	1
PB-004	PB-004/005	9-220	10-680	860	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	93	0,054	20	8	0,027	18	3,350	9,00	2,38E-05	2,32E-06	1
PB-004	PB-004/005	10-680	11-120	1040	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	93	0,052	20	8	0,027	6	2,471	9,00	2,38E-05	2,32E-06	1
PB-004	PB-004/007	17-960	18-880	920	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	34	0,031	20	35	0,043	4	1,958	9,00	2,26E-05	2,20E-06	1
PB-018	PB-018/003	7-520	8-400	880	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	15	34	0,031	15	27	0,041	10	2,599	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0
PB-018	PB-018/003	8-980	10-000	1020	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	15	61	0,045	15	16	0,035	36	3,271	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0
PB-018	PB-018/003	11-100	11-100	1080	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	15	42	0,036	15	43	0,046	36	3,296	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0
PB-018	PB-018/005	11-120	11-600	480	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	15	22	0,022	15	31	0,042	29	2,942	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0
PB-018	PB-018/005	15-460	16-440	980	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	15	22	0,022	15	31	0,042	29	2,942	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0
PB-018	PB-018/005	16-460	17-540	1080	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	15	22	0,022	15	31	0,042	29	2,942	11,00	1,22E-05	1,48E-06	0
PB-025	PB-025/001	0-000	1-920	1920	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	66	0,047	20	63	0,050	18	3,674	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0
PB-025	PB-025/001	2-560	3-420	860	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	66	0,047	20	75	0,052	10	3,306	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0
PB-025	PB-025/001	4-140	4-840	200	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	63	0,046	20	22	0,038	3	1,833	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0
PB-025	PB-025/001	5-160	6-180	120	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	80	0,051	20	23	0,039	29	3,781	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0
PB-025	PB-025/001	6-600	8-180	180	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	68	0,048	20	23	0,039	17	3,429	6,00	1,70E-05	1,07E-06	0
PB-041	PB-041/007	0-360	0-580	220	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	14	0,015	20	95	0,055	41	3,503	16,00	1,59E-05	2,59E-06	1
PB-041	PB-041/007	1-840	2-040	200	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	62	0,045	20	59	0,049	24	3,789	16,00	1,59E-05	2,59E-06	1
PB-041	PB-041/007	2-060	2-820	760	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	62	0,045	20	59	0,049	24	3,789	16,00	1,59E-05	2,59E-06	1
PB-041	PB-041/007	3-060	3-200	140	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	52	0,041	20	46	0,046	23	3,625	16,00	1,59E-05	2,59E-06	1
PB-041	PB-041/007	4-140	4-840	200	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	52	0,041	20	46	0,046	23	3,625	16,00	1,59E-05	2,59E-06	1
PB-065	PB-065/001	0-000	0-560	560	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	38	0,033	20	23	0,039	22	3,292	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	1-740	16-480	1040	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	17	0,017	20	49	0,047	31	3,305	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	2-520	2-700	180	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	17	0,017	20	49	0,047	31	3,305	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	2-720	2-920	200	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	17	0,017	20	49	0,047	31	3,305	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	3-060	3-680	620	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	99	0,054	20	57	0,049	33	4,107	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	3-700	5-740	2040	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	99	0,054	20	57	0,049	33	4,107	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	5-880	6-300	420	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	53	0,042	20	44	0,046	33	3,791	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	6-320	8-040	2620	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	57	0,043	20	40	0,045	28	3,736	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-065	PB-065/001	0-000	0-560	560	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SARE	20	91	0,053	20	21	0,038	22	3,671	5,00	1,52E-05	7,89E-05	-1
PB-079	PB-079/003	13-740	14-620	880	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	50	0,040	20	41	0,048	20	3,504	23,00	1,07E-05	3,10E-06	1
PB-079	PB-079/003	15-440	16-480	1040	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	46	0,039	20	60	0,049	20	3,547	23,00	1,07E-05	3,10E-06	1
PB-079	PB-079/003	16-480	18-400	1920	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	48	0,039	20	56	0,049	18	3,492	23,00	1,07E-05	3,10E-06	1
PB-079	PB-079/003	18-400	20-300	1900	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	48	0,039	20	56	0,049	18	3,492	23,00	1,07E-05	3,10E-06	1
PB-079	PB-079/005	4-420	6-120	1700	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	42	0,036	20	11	0,031	26	3,262	23,00	8,91E-04	2,57E-06	1
PB-079	PB-079/005	6-720	7-120	400	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	17	0,017	20	20	0,037	18	2,828	23,00	8,91E-04	2,57E-06	1
PB-087	PB-087/007	11-720	12-380	660	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	39	0,034	20	14	0,033	16	3,008	10,00	3,38E-04	3,70E-05	-1
PB-087	PB-087/007	14-800	16-000	1200	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	22	0,022	20	30	0,042	37	3,352	10,00	3,38E-04	3,70E-05	-1
PB-087	PB-087/007	16-020	16-880	860	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	12	0,013	20	30	0,042	17	2,790	10,00	3,38E-04	3,70E-05	-1
PB-087	PB-087/007	18-220	19-620	1400	UMIDO	-1	TSD	2,5	-	0,04	SIAT	20	12	0,013	20	17	0,035	17	2,664	10,00	3,38E-04	3,70E-05	-1
PB-073	PB-073/013	5-600	5-980	380	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	47	0,039	20	41	0,045	25	3,591	14,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/013	6-520	6-920	400	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	47	0,039	20	41	0,045	25	3,591	14,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	6-940	7-380	440	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	60	0,045	20	69	0,051	4	2,388	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	9-600	9-800	200	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	48	0,039	20	17	0,038	-1	1,965	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	10-080	10-520	440	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	48	0,039	20	17	0,038	32	3,518	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	12-660	12-860	200	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	59	0,044	20	99	0,055	40	4,096	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	12-880	13-420	540	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	59	0,044	20	99	0,055	40	4,096	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	15-120	15-500	380	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	26	0,025	20	22	0,038	40	3,375	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1
PB-073	PB-073/019	16-800	17-020	220	SUB-UMIDO/UMIDO	-0,5	TSD	2,5	-	0,04	SNAT	20	69	0,048	20	106	0,056	41	4,193	13,00	2,04E-05	2,99E-06	1

(continua)



## APÊNDICE V

### (Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Mistura Asfáltica no estado do Ceará)

#### Considerações:

O *SNC* foi calculado pelo método da AASHTO (1993), a partir dos módulos retroanalizados das camadas e pela consideração da correção do subleito.

Para a correção do subleito no *SNC* foi considerada a razão  $ISC = ESL/10$ . Além disso, a análise foi feita considerando o revestimento em sua situação inicial (abertura ao tráfego –  $a_1 = 0,173$ ).

Código	Tipo Material
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
AAUQ	Areia Asfalto Usinado à Quente
PMQ	Pré-Misturado à Quente
PMF	Pré-Misturado à Frio
TST	Tratamento Superficial Triplo
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
AAUF	Areia Asfalto Usinado à Frio
LAMA	Lama Asfáltica
MICRO	Micro Concreto
BIND	Binder
RP	Revestimento Primário
LEN	Leito Natural
BCOR	Brita Corrida
BGRA	Brita Graduada
SBRI	Solo Brita
SEG	Solo Estabilizado
SCAL	Solo Cal
SCIM	Solo Cimento
MHID	Macadame Hidráulico
MBET	Macadame Betuminoso
SARG	Solo Argiloso
SARE	Solo Arenoso
SROC	Solo Rochoso
SLAT	Solo Laterítico



Rodovia	Trecho	KMI	KMF	EXT	Clima	C	Material	H <sub>REV</sub> (cm)	F <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	F <sub>BASE</sub> (Mpa)	a <sub>2</sub>	SVC AASHITO	S	3/1/2/1996	D <sub>v</sub> <sub>EMP</sub> (0,3mm)	Rc	Idade da Capa	N <sub>ANAL</sub>	N <sub>COM</sub>	N
CE-025	025ECE0050	13+323	18+395	5072	ÚMIDO	-1	AAUQ	8	9865	0,173	SBR1	58	141	0,038	8,99	0	3/1/2/1996	32	234	5,08	1,83E+05	8,77E+05	-1
CE-040	040ECE0010D	0+000	6+940	6940	ÚMIDO	-1	CBUQ	20	1499	0,173	SEG	25	241	0,061	4,85	1	3/1/2/1996	25	306	5,08	2,35E+06	1,12E+07	1
CE-040	040ECE0030D	6+940	9+400	2460	ÚMIDO	-1	CBUQ	5	10000	0,173	SEG	25	379	0,079	15,09	1	3/1/2/1996	25	310	5,08	2,73E+06	1,31E+07	1
CE-040	040ECE0050D	9+400	13+694	4294	ÚMIDO	-1	CBUQ	9	10000	0,173	SBR1	39	342	0,076	11	0	3/1/2/1996	22	329	5,08	2,03E+06	9,74E+06	0
CE-040	040ECE0070D	13+735	19+045	5310	ÚMIDO	-1	CBUQ	9	3219	0,173	SBR1	39	156	0,042	10,18	0	3/1/2/1996	29	208	5,08	3,44E+05	1,65E+06	-1
CE-040	040ECE0090D	19+045	22+914	3869	ÚMIDO	-1	CBUQ	9	4464	0,173	SBR1	39	146	0,039	13,09	0	3/1/2/1996	29	222	5,08	2,09E+05	1,00E+06	-1
CE-060	060ECE0030D	3+838	7+644	3806	ÚMIDO	-1	CBUQ	4	10000	0,173	SEG	25	296	0,070	13,63	0	3/1/2/1996	29	214	5,08	2,52E+05	1,21E+06	-1
CE-060	060ECE0050D	7+644	13+453	5899	ÚMIDO	-1	CBUQ	9	10000	0,173	SBR1	36	104	0,025	14,12	-1	3/1/2/1996	51	142	5,08	6,06E+04	2,90E+05	-1
CE-060	060ECE0090D	19+720	21+670	1950	ÚMIDO	-1	CBUQ	9	10000	0,173	SBR1	36	103	0,024	10,54	-1	3/1/2/1996	49	174	5,08	5,24E+05	2,51E+06	-1
CE-060	060ECE0130	26+961	42+826	15865	ÚMIDO	-1	AAUQ	8	10000	0,173	SBR1	35	185	0,049	12,86	0	3/1/2/1996	33	233	5,08	4,03E+05	1,93E+06	-1
CE-060	060ECE0150	42+826	49+747	6921	ÚMIDO	-1	AAUQ	8	10000	0,173	SBR1	35	163	0,044	13,52	0	3/1/2/1996	34	217	5,08	1,08E+05	5,17E+05	-1
CE-060	060ECE0350	158+676	168+036	9560	SEMI-ARIDO	0,5	AAUQ	9	9960	0,173	SBR1	34	82	0,024	15,97	-1	3/1/2/1996	49	143	5,08	3,88E+04	1,86E+05	-1
CE-060	060ECE0370	168+036	198+220	30184	SEMI-ARIDO	0,5	AAUQ	9	10000	0,173	SBR1	34	171	0,046	13,1	0	3/1/2/1996	38	215	5,08	5,80E+05	2,78E+06	-1
CE-060	060ECE0610	375+019	379+420	4401	SUB-ÚMIDO SECO	0	AAUQ	4	10000	0,173	SEG	25	181	0,049	14,5	-1	3/1/2/1996	50	165	5,08	9,33E+05	4,47E+06	0
CE-065	065ECE0010D	0+000	5+661	5661	ÚMIDO	-1	CBUQ	4	10000	0,173	SEG	25	241	0,061	13,71	0	3/1/2/1996	42	195	5,08	1,97E+05	9,43E+05	-1
CE-065	065ECE0030D	5+661	9+225	3564	ÚMIDO	-1	CBUQ	10	4254	0,173	SBR1	40	123	0,032	12,37	0	3/1/2/1996	38	175	5,08	4,12E+04	1,97E+05	-1
CE-085	085ECE0010D	0+000	2+903	2903	ÚMIDO	-1	CBUQ	5	10000	0,173	SEG	25	182	0,049	11,3	-1	3/1/2/1996	45	167	5,08	3,27E+04	1,57E+05	-1
CE-085	085ECE00150	40+516	49+174	8658	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	AAUQ	4	6063	0,173	SEG	25	97	0,024	16,76	-1	3/1/2/1996	60	91	5,08	1,89E+06	1,06E+07	-1
CE-085	085ECE00390	217+547	225+405	7858	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	CBUQ	5	9517	0,173	SEG	25	203	0,053	11,38	-1	3/1/2/1996	43	152	5,08	1,09E+05	5,20E+05	-1
CE-085	085ECE0530	319+750	342+573	22823	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	AAUQ	4	10000	0,173	SEG	25	148	0,040	22,17	-1	3/1/2/1996	59	142	5,08	1,83E+05	8,76E+05	-1
CE-138	138ECE0010	0+000	0+702	702	ÚMIDO	-1	AAUQ	9	4576	0,173	SEG	30	384	0,079	318	0	3/1/2/1996	33	311	5,08	2,04E+05	9,75E+05	-1
CE-138	138ECE0020	0+702	14+703	14001	ÚMIDO	-1	AAUQ	9	1664	0,173	SEG	30	253	0,063	4,213	-1	3/1/2/1996	26	258	5,08	7,58E+04	3,63E+05	-1
CE-156	156ECE0050	10+329	15+510	5181	ÚMIDO	-1	AAUQ	4	10000	0,173	SEG	25	268	0,065	231	0	3/1/2/1996	39	221	5,08	4,90E+04	2,35E+05	-1
CE-163	163ECE0050	9+329	11+849	2620	ÚMIDO	-1	AAUQ	4	10000	0,173	SEG	25	246	0,062	115	0	3/1/2/1996	34	186	5,08	4,59E+04	2,20E+05	-1
CE-163	163ECE0070	11+849	19+263	7414	ÚMIDO	-1	AAUQ	4	10000	0,173	SEG	25	402	0,079	13,3	0	3/1/2/1996	26	300	5,08	3,36E+04	1,61E+05	-1

## APÊNDICE VI

### (Dados utilizados na elaboração de modelos de previsão de desempenho para pavimentos revestidos em Tratamento Superficial no estado do Ceará)

#### Considerações:

O *SNC* foi calculado pelo método da AASHTO (1993), a partir dos módulos retroanalizados das camadas e pela consideração da correção do subleito.

Para a correção do subleito no *SNC* foi considerada a razão  $ISC = ESL/10$ . Além disso, a análise foi feita considerando o revestimento em sua situação inicial (abertura ao tráfego –  $a_1 = 0,04$ ).

Código	Tipo Material
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
AAUQ	Areia Asfalto Usinado à Quente
PMQ	Pré-Misturado à Quente
PMF	Pré-Misturado à Frio
TST	Tratamento Superficial Triplo
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
AAUF	Areia Asfalto Usinado à Frio
LAMA	Lama Asfáltica
MICRO	Micro Concreto
BIND	Binder
RP	Revestimento Primário
LEN	Leito Natural
BCOR	Brita Corrida
BGRA	Brita Graduada
SBRI	Solo Brita
SEG	Solo Estabilizado
SCAL	Solo Cal
SCIM	Solo Cimento
MHID	Macadame Hidráulico
MBET	Macadame Betuminoso
SARG	Solo Argiloso
SARE	Solo Arenoso
SROC	Solo Rochoso
SLAT	Solo Laterítico

Índice de Condição do Pavimento (PCR)

Rodovia	Trecho	Identificação				Classificação Climática				Características da Estrutura do Pavimento										Características no levantamento								
		KMI	KMP	EXT	C	Clima	Revestimento		Base Granular		F <sub>su</sub> (Mpa)	Retor-análise (%)	Capacidade Estrutural na Abertura		Intervenção (ano)	PCI	Idade da Capa	CONCEITO	N <sub>anom</sub>									
							Material	H <sub>rev</sub> (cm)	E <sub>rev</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>			Material	H <sub>base</sub> (cm)						E <sub>base</sub> (Mpa)	a <sub>2</sub>	S	5					
CE-085	08SECE0030D	2+963	4+446	1483	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	199	25	0,053	11,5	17,07	2,703	0	3/1/12/1996	60	REGULAR	9,00	5,89E+05	4,81E+06	1			
CE-085	08SECE0050	4+475	6+431	1936	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	241,7	25	0,061	5,00	15,05	3,660	1	3/1/12/1996	85	EXCELENTE	9,00	4,78E+05	3,90E+06	1			
CE-085	08SECE0210	72+259	77+271	5038	-1	UMIDO	TSD	3,0	-	0,04	SBR1	146	35	0,059	11,2	6,96	2,828	0	3/1/12/1996	88	EXCELENTE	9,00	9,56E+04	7,80E+05	-1			
CE-085	08SECE0090	108+195	127+338	19143	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	3,0	-	0,04	SEG	145	32	0,059	10,6	14,3	2,657	0	3/1/12/1996	89	EXCELENTE	9,00	8,37E+04	6,83E+05	-1			
CE-085	08SECE0550	342+573	377+271	34698	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	3,0	-	0,04	SEG	201	25	0,053	10,5	19,05	2,648	0	3/1/12/1996	85	EXCELENTE	9,00	1,11E+05	9,03E+05	-1			
CE-156	156ECE0010	0+000	7+186	7186	-1	UMIDO	TSD	3,0	-	0,04	SEG	151	35	0,041	11,5	6,79	2,898	0	3/1/12/1996	86	EXCELENTE	9,00	5,87E+04	4,79E+05	-1			
CE-163	163ECE0030	0+000	9+229	1679	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	136	25	0,056	10,1	5,81	2,197	-1	3/1/12/1996	91	EXCELENTE	9,00	8,59E+04	7,01E+05	-1			
CE-168	168ECE0270	157+375	159+316	1941	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	2,0	-	0,04	SEG	297,1	20	0,070	5,00	23,68	3,572	1	3/1/12/1996	80	BOM	9,00	4,36E+05	3,56E+06	1			
CE-187	187ECE0370	242+316	258+288	15972	0,5	SUB-UMIDO SECO	TSS	0,8	-	0,04	SEG	240,7	25	0,061	11,4	9,27	2,892	0	3/1/12/1996	74	BOM	9,00	1,02E+05	8,32E+05	0			
CE-187	187ECE0430	239+469	256+836	17367	0,5	SEMI-ARIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	125,1	25	0,033	12,5	5,76	2,268	-1	3/1/12/1996	66	REGULAR	9,00	2,11E+05	1,73E+06	0			
CE-187	187ECE0430	312+713	315+086	2373	0,5	SEMI-ARIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	123	25	0,032	9,5	21,87	2,023	-1	3/1/12/1996	67	REGULAR	9,00	1,56E+05	1,27E+06	0			
CE-265	265ECE0210	152+730	175+780	23050	0,5	SEMI-ARIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	254	25	0,063	11,9	28,36	2,988	0	3/1/12/1996	78	BOM	9,00	2,79E+04	2,28E+05	-1			
CE-384	384ECE0090	49+594	75+310	30716	0	SUB-UMIDO SECO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	101	25	0,024	54	28,25	1,323	-1	3/1/12/1996	40	DEFICIENTE	9,00	3,34E+05	4,36E+06	1			
CE-384	384ECE0110	49+594	62+309	12846	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	3,0	-	0,04	SEG	122	35	0,032	8,9	28,89	2,376	-1	3/1/12/1996	79	BOM	9,00	2,11E+05	1,72E+06	1			
CE-341	341ECE0150	77+984	89+651	11667	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	2,0	-	0,04	SEG	201	20	0,053	11,0	24,58	2,455	-1	3/1/12/1996	83	BOM	9,00	7,75E+04	6,32E+05	-1			
CE-341	341ECE0150	57+268	59+347	2079	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	269,3	25	0,066	31,5	8,31	3,615	1	3/1/12/1996	89	EXCELENTE	9,00	2,04E+05	1,67E+06	0			
CE-348	348ECE0150	59+347	68+142	8795	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	275	25	0,066	12,5	15,37	3,109	0	3/1/12/1996	86	EXCELENTE	9,00	1,07E+05	8,74E+05	0			
CE-348	348ECE0170	68+142	76+703	8561	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	182	25	0,049	94	19,46	2,451	-1	3/1/12/1996	77	BOM	9,00	1,27E+05	1,03E+06	0			
CE-354	354ECE0550	536+221	551+931	15710	-1	UMIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	264	25	0,065	12,1	19,19	3,041	0	3/1/12/1996	88	EXCELENTE	9,00	9,49E+04	7,44E+05	-1			
CE-366	366ECE0190	102+346	188+871	26525	0	SUB-UMIDO SECO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	253	25	0,063	11,8	3,57	2,979	0	3/1/12/1996	78	BOM	9,00	1,15E+05	9,44E+05	-1			
CE-371	371ECE0450	327+668	349+154	21486	0,5	SEMI-ARIDO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	154	25	0,042	11,9	33,38	2,454	-1	3/1/12/1996	73	BOM	9,00	9,65E+04	7,88E+05	-1			
CE-422	422ECE0010	0+000	4+101	4101	-1	UMIDO	TSD	3,0	-	0,04	SBR1	221	35	0,057	167	5,76	3,668	1	3/1/12/1996	91	EXCELENTE	9,00	9,27E+03	7,57E+04	-1			
CE-434	434ECE0010	0+000	40+279	40279	0	SUB-UMIDO SECO	TSD	1,0	-	0,04	SEG	215	25	0,056	11,1	7,99	2,756	0	3/1/12/1996	81	BOM	9,00	9,49E+04	7,74E+05	-1			
Mínimo																	1,323							7,57E+04				
Média																		2,761							1,46E+06			
Mediana																										8,74E+05		
Máximo																											4,81E+06	

Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI)

Rodovia	Trecho	Identificação				Classificação Climática				Características da Estrutura do Pavimento										Características no levantamento								
		KMI	KMP	EXT	C	Clima	Revestimento		Base Granular		F <sub>su</sub> (Mpa)	Retor-análise (%)	Capacidade Estrutural na Abertura		Intervenção (ano)	IRI	Idade da Capa	QI	N <sub>anom</sub>									
							Material	H <sub>rev</sub> (cm)	E <sub>rev</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>			Material	H <sub>base</sub> (cm)						E <sub>base</sub> (Mpa)	a <sub>2</sub>	S	5					
CE-085	08SECE0030D	2+963	4+446	1483	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	199	0,053	11,5	17,07	2,703	0	3/1/12/1996	4,47	58	5,00	5,44E+05	2,57E+06	1			
CE-085	08SECE0050	4+475	6+431	1936	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	242	0,061	5,00	15,05	3,660	1	3/1/12/1996	4,30	56	5,00	4,42E+05	2,08E+06	1			
CE-085	08SECE0070	6+451	21+159	14728	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	192	0,051	10,3	9,74	2,582	0	3/1/12/1996	3,82	50	5,00	1,10E+05	5,19E+05	-1			
CE-085	08SECE0090	21+159	29+496	8337	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	195	0,052	8,7	12,52	2,463	-1	3/1/12/1996	4,01	52	5,00	1,09E+05	5,11E+05	-1			
CE-085	08SECE0190	63+465	72+239	8774	-1	UMIDO	TSD	3	-	0,04	SBR1	35	140	0,038	11,0	10,39	2,747	0	3/1/12/1996	3,91	51	5,00	1,69E+05	7,96E+05	-1			
CE-085	08SECE0230	77+271	93+306	16029	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	253	0,063	12,0	10,94	2,988	0	3/1/12/1996	3,77	49	5,00	1,42E+05	6,70E+05	-1			
CE-085	08SECE0280	108+195	127+338	19143	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	3	-	0,04	SEG	32	145	0,039	10,6	14,3	2,657	0	3/1/12/1996	3,74	49	5,00	7,73E+04	3,65E+05	-1			
CE-085	08SECE0510	316+922	319+750	2828	-1	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	127	0,033	9,8	23,61	2,100	-1	3/1/12/1996	4,03	52	5,00	1,12E+05	5,29E+05	-1			
CE-085	08SECE0550	342+573	377+271	34698	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	201	0,053	10,5	19,05	2,648	0	3/1/12/1996	3,48	45	5,00	1,02E+05	4,82E+05	-1			
CE-156	156ECE0030	7+186	10+329	3143	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	293	0,069	12,7	15,17	3,100	0	3/1/12/1996	3,64	47	5,00	4,56E+04	2,15E+05	-1			
CE-168	168ECE0370	242+316	258+288	15972	0	SUB-UMIDO SECO	TSS	0,8	-	0,04	SEG	25	241	0,061	11,4	9,27	2,892	0	3/1/12/1996	4,06	53	5,00	9,47E+04	4,44E+05	-1			
CE-187	187ECE0030	231+679	239+469	7790	0	SUB-UMIDO SECO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	171	0,046	7,9	11,49	2,529	-1	3/1/12/1996	5,58	73	5,00	2,45E+05	1,20E+06	0			
CE-187	187ECE0370	239+469	256+836	17367	0,5	SEMI-ARIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	125	0,033	12,5	5,76	2,268	-1	3/1/12/1996	5,60	73	5,00	1,95E+05	9,21E+05	0			
CE-341	341ECE0190	142+139	150+244	8105	0,5	SEMI-ARIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	153	0,041	7,5	48,43	2,074	-1	3/1/12/1996	6,44	84	5,00	1,58E+06	7,43E+06	1			
CE-341	341ECE0110	49+463	62+309	12846	-0,5	SUB-UMIDO UMIDO	TSD	3	-	0,04	SEG	35	122	0,032	8,9	28,89	2,376	0	3/1/12/1996	5,17	67	5,00	1,95E+05	9,18E+05	0			
CE-348	348ECE0150	59+347	68+142	8795	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	275	0,066	12,5	15,37	3,109	0	3/1/12/1996	3,63	47	5,00	9,89E+04	4,66E+05	-1			
CE-348	348ECE0170	68+142	76+703	8561	-1	UMIDO	TSD	1	-	0,04	SEG	25	182	0,049	94	19,46	2,451	-1	3/1/12/1996	3,67	48	5,00	1,17E+05	5,51E+05	-1			
CE-422	422ECE0010	0+000	4+101	4101	-1	UMIDO	TSD	3	-	0,04	SBR1	33	221	0,057	167	5,76	3,648	1	3/1/12/1996	3,30	43	5,00	8,57E+03	4,04E+04	-1			
Mínimo																		2,074								4,04E+04		
Média																		2,709								1,15E+06		
Mediana																		2,653								5,40E+05		
Máximo																		3,660									7,43E+06	

Deflexão Máxima do FWD (Do FWD)

Rodovia	Trecho	Identificação				Classificação Climática				Revestimento				Base Granular				RMSE da Capacidade Estrutural na Abertura				Intervenção				Características no levantamento			
		KMI	KMF	EXT	C	Material	H <sub>REV</sub> (cm)	E <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	E <sub>BASE</sub> (Mpa)	a <sub>2</sub>	F <sub>eq</sub> (Mpa)	S	Δ	SVC	AASHTO	Do FWD (10 <sup>-3</sup> mm)	Rc	Idade da Capa	Nominal	N <sub>nom</sub>	N					
					Clima																								
CE-085	085EC0030D	2+963	4+446	1483	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	199	0,053	11,5	17,07	2,703	0	31/12/1996	51	154	5,08	5,45E+05	2,61E+06	1				
CE-085	085EC0030S	4+475	6+431	1956	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	242	0,061	500	15,05	3,660	1	31/12/1996	45	120	5,08	4,50E+05	2,52E+06	1				
CE-085	085EC0070	6+431	21+159	14728	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	192	0,051	103	9,74	2,582	0	31/12/1996	41	140	5,08	1,10E+05	5,28E+05	-1				
CE-085	085EC0090	21+159	29+496	8337	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	195	0,052	87	12,52	2,463	-1	31/12/1996	50	129	5,08	1,09E+05	5,20E+05	-1				
CE-085	085EC0190	63+465	72+330	8774	UMIDO	-1	TSD	3	-	0,04	SBR1	35	140	0,038	110	10,39	2,747	0	31/12/1996	30	158	5,08	1,69E+05	8,10E+05	0				
CE-085	085EC0210	72+239	77+277	5038	UMIDO	-1	TSD	3	-	0,04	SBR1	35	146	0,039	112	6,96	2,828	0	31/12/1996	34	168	5,08	3,84E+04	4,23E+05	-1				
CE-085	085EC0220	77+277	95+306	16029	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	253	0,063	120	10,94	2,988	0	31/12/1996	28	204	5,08	1,42E+05	6,82E+05	-1				
CE-085	085EC0270	101+101	108+195	7094	UMIDO	-1	TSD	3	-	0,04	SEG	32	161	0,044	113	19,04	2,850	0	31/12/1996	31	172	5,08	7,19E+04	3,44E+05	-1				
CE-085	085EC0280	108+195	127+338	19143	SUB-UMIDO UMIDO	-0,5	TSD	3	-	0,04	SEG	32	145	0,039	106	14,3	2,657	0	31/12/1996	34	148	5,08	7,75E+04	3,71E+05	-1				
CE-085	085EC0350	191+038	201+085	10047	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	3	-	0,04	SEG	38	132	0,035	111	8,5	2,773	0	31/12/1996	36	163	5,08	1,11E+05	5,32E+05	-1				
CE-085	085EC0510	316+922	319+750	2828	SUB-UMIDO UMIDO	-0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	127	0,033	98	23,61	2,100	-1	31/12/1996	38	100	5,08	1,12E+05	5,39E+05	-1				
CE-085	085EC0550	342+573	377+271	34698	SUB-UMIDO UMIDO	-0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	201	0,053	105	19,05	2,648	0	31/12/1996	37	146	5,08	1,02E+05	4,90E+05	-1				
CE-085	085EC0570	377+271	390+481	13210	SUB-UMIDO UMIDO	-0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	179	0,048	101	15,54	2,490	-1	31/12/1996	44	131	5,08	9,19E+04	4,40E+05	-1				
CE-085	085EC0590	390+481	394+923	4441	SUB-UMIDO UMIDO	-0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	138	0,037	79	37,15	2,009	-1	31/12/1996	59	94	5,08	6,75E+04	3,23E+05	-1				
CE-090	090EC0010D	0+000	7+244	7244	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	159	0,043	78	14,18	2,150	-1	31/12/1996	59	102	5,08	6,73E+04	3,23E+05	-1				
CE-156	156EC0010	0+000	7+186	7186	UMIDO	-1	TSD	3	-	0,04	SEG	35	151	0,041	115	6,79	2,898	0	31/12/1996	37	181	5,08	3,43E+04	2,60E+05	-1				
CE-156	156EC0030	7+186	10+329	3143	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	293	0,069	127	15,17	3,190	0	31/12/1996	29	294	5,08	4,57E+04	2,19E+05	-1				
CE-163	163EC0030	7+580	9+229	1679	UMIDO	-1	TSD	1	-	0,04	SEG	25	136	0,036	101	5,81	2,197	-1	31/12/1996	50	106	5,08	7,95E+04	3,81E+05	-1				
CE-168	168EC0270	157+375	159+316	1941	SUB-UMIDO UMIDO	-0,5	TSD	2	-	0,04	SEG	20	297	0,070	500	23,68	3,572	1	31/12/1996	40	134	5,08	4,11E+05	2,30E+06	1				
CE-168	168EC0370	242+316	258+288	15972	SUB-UMIDO SECO	0	TSS	0,8	-	0,04	SEG	25	241	0,061	114	9,27	2,892	0	31/12/1996	45	175	5,08	9,43E+04	4,51E+05	-1				
CE-183	183EC0030	0+000	5+902	5902	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	3	-	0,04	SBR1	35	315	0,072	223	33,35	4,420	1	31/12/1996	40	95	5,08	3,28E+05	1,84E+06	0				
CE-183	183EC0030	5+902	26+294	20392	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	3	-	0,04	SBR1	20	142	0,038	97	24,61	2,100	-1	31/12/1996	67	101	5,08	1,35E+05	6,47E+05	-1				
CE-187	187EC0350	231+679	239+469	7990	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	1	-	0,04	SEG	25	171	0,046	79	11,49	2,239	-1	31/12/1996	61	109	5,08	2,56E+05	1,23E+06	0				
CE-187	187EC0370	239+469	256+836	17367	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	125	0,033	125	5,76	2,268	-1	31/12/1996	65	112	5,08	1,96E+05	9,37E+05	0				
CE-187	187EC0390	256+836	287+804	30944	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	137	0,037	105	26,51	2,235	-1	31/12/1996	60	112	5,08	1,35E+05	6,44E+05	-1				
CE-187	187EC0410	287+804	294+172	6392	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	167	0,045	103	35,58	2,432	-1	31/12/1996	56	126	5,08	2,26E+04	1,08E+06	-1				
CE-187	187EC0420	294+172	312+713	18541	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	185	0,049	500	20,22	3,372	0	31/12/1996	57	112	5,08	4,39E+05	2,46E+06	1				
CE-187	187EC0430	312+713	315+086	2373	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	123	0,032	93	21,87	2,023	-1	31/12/1996	60	95	5,08	1,44E+05	6,91E+05	-1				
CE-187	187EC0670	636+856	663+102	26306	SEMI-ARIDO	0,5	TSS	0,8	-	0,04	SEG	25	301	0,070	269	12,98	3,655	1	31/12/1996	48	259	5,08	4,74E+05	2,66E+06	1				
CE-261	261EC0030	0+000	12+539	12539	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	3	-	0,04	SEG	51	113	0,028	92	8,41	2,743	0	31/12/1996	38	160	5,08	5,73E+04	2,75E+05	-1				
CE-261	261EC0030	12+539	18+028	5489	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	3	-	0,04	SEG	51	114	0,029	95	23,27	2,789	0	31/12/1996	36	165	5,08	1,56E+05	7,45E+05	-1				
CE-265	265EC0210	152+730	175+780	23050	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	254	0,063	119	28,36	2,988	0	31/12/1996	38	199	5,08	2,58E+04	1,24E+06	-1				
CE-284	284EC0090	44+594	75+310	30716	SUB-UMIDO SECO	0	TSD	1	-	0,04	SEG	25	101	0,024	54	28,25	1,323	-1	31/12/1996	85	76	5,08	5,03E+05	2,82E+06	1				
CE-284	284EC0190	142+159	150+244	8105	SEMI-ARIDO	0,5	TSD	1	-	0,04	SEG	25	153	0,041	75	48,43	2,074	-1	31/12/1996	65	101	5,08	1,58E+06	7,56E+06	1				

(continua)

Identificação				Características da Estrutura do Pavimento										Características no levantamento												
Rodovia	Trecho	KMI	KMF	Classificação Climática		Revestimento		Base Granular				Capacidade Estrutural na Abertura		Intervenção (ano)	D <sub>95 F<sub>100</sub></sub> (10 <sup>2</sup> -mm)	Rc	Idade da Capa	N <sub>total</sub>	N <sub>conv</sub>	N						
				Clima	C	H <sub>REV</sub> (cm)	E <sub>REV</sub> (Mpa)	a <sub>1</sub>	Material	H <sub>BASE</sub> (cm)	E <sub>BASE</sub> (Mpa)	a <sub>2</sub>	F <sub>sub</sub> (Mpa)								RMSE da Retro-análise (%)	SNC AASHTO	S			
CE-341	341ECE0110	49+463	62+309	EXT	12846	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	TSD	3	-	0,04	SEG	35	122	0,032	89	28,89	2,376	-1	31/12/1996	59	122	5,08	1,95E+05	9,34E+05	0
CE-341	341ECE0150	77+984	89+651	11667	SUB-ÚMIDO ÚMIDO	-0,5	TSD	2	-	0,04	SEG	20	201	0,053	110	24,58	2,455	-1	31/12/1996	51	127	5,08	7,17E+04	3,43E+05	-1	

(continuação da deflexão)

## **APÊNDICE VII**

**(Mapa Rodoviário do Estado da Paraíba)**

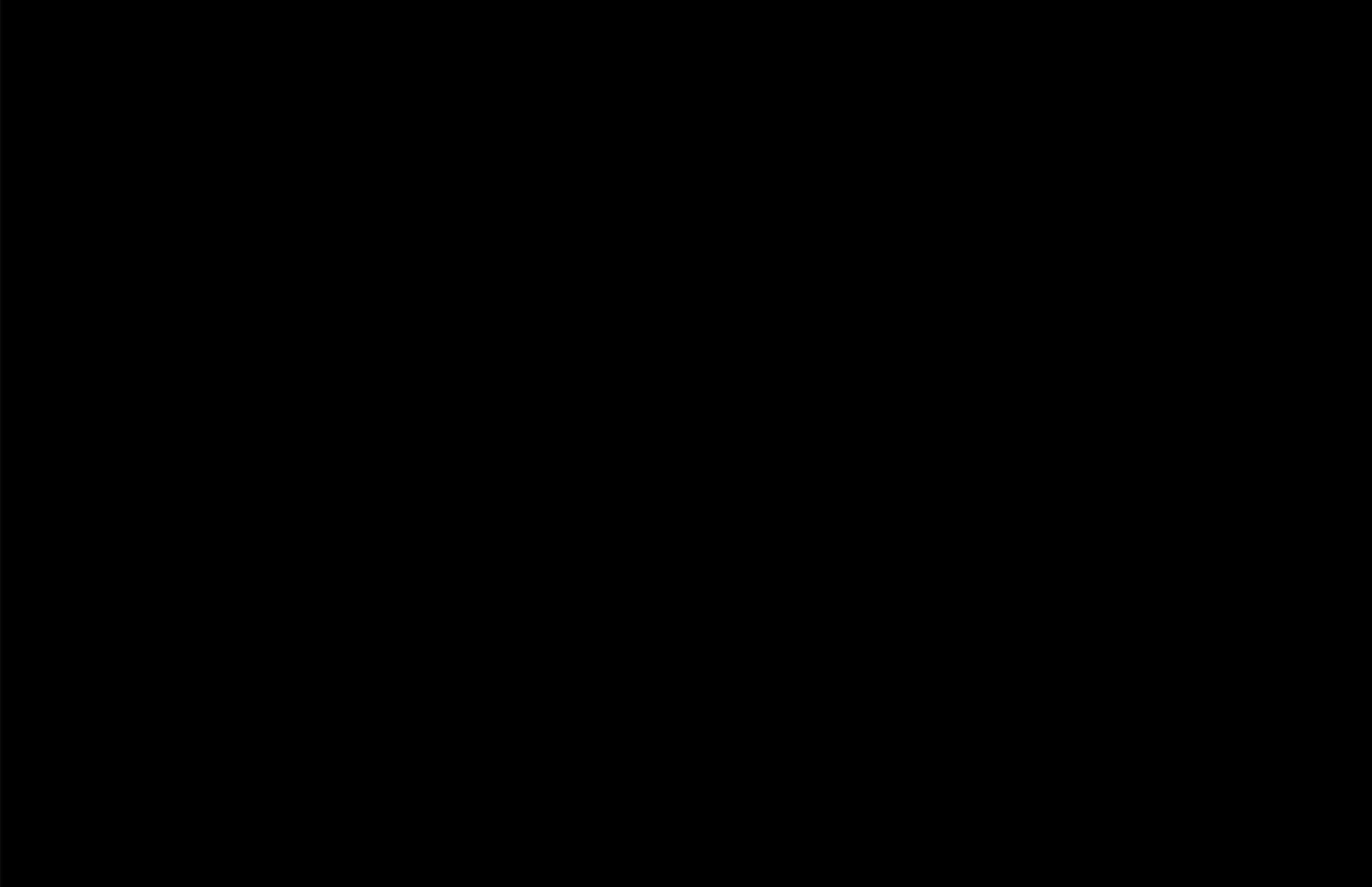


## **APÊNDICE VIII**

**(Mapa Rodoviário do Estado do Ceará)**



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES



## APÊNDICE IX

(Tabelas de Cálculo da Análise Multicriterial em Nível de Rede)

**Análise de desempenho atual e macro-solução em Nível de Rede:**

Código do Trecho	Parâmetros de Desempenho no Ano de Análise					SGP - Nível de Rede (Solução)
	<i>Do FWD</i> (0,01mm)	<i>Do VB</i> (0,01mm)	<i>IRI</i> (m/km)	<i>IGG</i>	<i>PCR</i>	
040ECE0030D	46	209	7,07	212	40	RECONSTRUÇÃO DA PISTA
040ECE0090D	35	30	3,04	60	86	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
060ECE0170D	49	50	3,98	253	77	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
065ECE0030D	38	29	2,92	73	88	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
065ECE0050D	31	27	2,88	52	87	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
085ECE0530	44	36	3,36	129	82	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
261ECE0090	28	26	2,81	50	85	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
341ECE0130	43	33	3,20	123	84	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
359ECE0010	33	33	3,25	54	83	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
085ECE0090	41	43	3,96	66	86	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
085ECE0570	43	45	4,20	68	84	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
168ECE0370	42	47	4,27	70	82	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
187ECE0370	52	58	5,17	97	70	LAMA ASFÁLTICA OU TSD
261ECE0030	44	51	4,44	80	79	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
354ECE0210	55	68	5,31	136	65	CORREÇÕES EM PONTO LOCALIZ. OU RECAP.
366ECE0190	41	48	4,24	71	82	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
371ECE0330	44	50	4,57	73	79	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-073/001	39	43	3,76	77	77	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-073/003	36	41	3,70	62	77	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-073/007	36	40	3,63	63	78	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-073/011	35	46	3,97	59	74	LAMA ASFÁLTICA OU TSD
PB-079/001	37	38	3,54	67	79	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-325/005	35	35	3,42	60	78	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-325/011	35	32	3,22	60	82	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-004/005	34	50	3,65	86	85	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-004/007	50	56	4,67	101	74	LAMA ASFÁLTICA OU TSD
PB-018/001	54	55	4,79	104	73	LAMA ASFÁLTICA OU TSD
PB-018/003	42	46	4,01	75	84	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-018/005	38	45	3,82	73	86	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-041/007	36	53	3,75	96	82	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-065/001	30	43	3,41	66	91	NADA A FAZER
PB-073/021	36	61	3,90	115	78	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-079/003	39	56	4,07	101	78	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PB-087/007	28	38	3,25	53	96	NADA A FAZER
PB-105/001	27	47	3,29	76	90	NADA A FAZER
PB-393/003	52	75	5,09	162	63	CORREÇÕES EM PONTO LOCALIZ. OU RECAP.
PBT-405/001	45	55	4,51	93	76	CONSERVAÇÃO ROTINEIRA
PBT-408/001	47	55	4,78	85	75	LAMA ASFÁLTICA OU TSD
PB-420/001	50	69	4,94	138	67	LAMA ASFÁLTICA OU TSD
PB-420/003	50	68	4,92	135	67	LAMA ASFÁLTICA OU TSD





## Hierarquização pelo Método PROMETHEE II:

Nº	Seg	$\phi(a_i)$	Paraíba	Ceará
15	354ECE0210	17,725		1
1	040ECE0030D	13,750		2
3	060ECE0170D	13,700		3
18	PB-073/001	12,700	1	
26	PB-004/007	10,350	2	
13	187ECE0370	10,175		4
27	PB-018/001	10,025	3	
39	PB-420/001	9,075	4	
21	PB-073/011	8,400	5	
40	PB-420/003	8,125	6	
19	PB-073/003	8,100	7	
36	PB-393/003	7,850	8	
33	PB-079/003	6,300	9	
38	PBT-408/001	5,700	10	
30	PB-041/007	4,100	11	
37	PBT-405/001	3,750	12	
32	PB-073/021	3,575	13	
20	PB-073/007	2,750	14	
25	PB-004/005	1,300	15	
14	261ECE0030	0,825		5
9	359ECE0010	-1,150		6
22	PB-079/001	-1,750	16	
10	085ECE0090	-2,500		7
6	085ECE0530	-2,900		8
2	040ECE0090D	-5,300		9
28	PB-018/003	-5,625	17	
23	PB-325/005	-6,050	18	
17	371ECE0330	-7,750		10
29	PB-018/005	-7,925	19	
35	PB-105/001	-7,950	20	
5	065ECE0050D	-8,350		11
16	366ECE0190	-8,725		12
24	PB-325/011	-9,250	21	
11	085ECE0570	-9,450		13
7	261ECE0090	-10,775		14
12	168ECE0370	-10,775		15
4	065ECE0030D	-12,200		16
31	PB-065/001	-12,200	22	
34	PB-087/007	-12,700	23	
8	341ECE0130	-14,950		17

## Hierarquização pelo Método Benefício/Custo:

Seg	Custo	Benefício/Custo	PCR <sub>atual</sub>	VDM	PCR <sub>inicial</sub>	Paraíba	Ceará
060ECE0170D	29.376,00	2,025	77	5632	87		1
PB-041/007	46.800,00	1,595	82	4839	98	1	
PB-073/003	61.800,00	1,102	77	5843	89	2	
040ECE0030D	1.476.000,00	1,071	40	30749	91	3	
PB-018/005	10.800,00	1,067	86	1458	94	4	
040ECE0090D	46.428,00	1,008	86	11884	90	5	
PB-004/005	78.000,00	0,668	85	4018	98	6	
PB-079/003	48.300,00	0,586	78	1923	93	7	
PB-079/001	27.000,00	0,556	79	1704	88	8	
PB-073/011	163.500,00	0,500	74	5204	89	9	
PB-073/001	69.000,00	0,480	77	3026	88	10	
PBT-408/001	28.000,00	0,473	75	1942	81	11	
PB-018/001	52.500,00	0,411	73	1648	86	12	
065ECE0050D	82.020,00	0,403	87	8127	91	13	
PB-073/021	69.600,00	0,387	78	1423	97	14	
PB-420/001	94.500,00	0,353	67	1763	86	15	
085ECE0090	50.022,00	0,285	86	2948	91	16	
PB-420/003	84.000,00	0,254	67	1153	86	17	
065ECE0030D	42.768,00	0,224	88	12382	89	18	
PB-073/007	175.800,00	0,216	78	3590	89	19	
PB-018/003	66.000,00	0,175	84	1458	92	20	
PB-004/007	282.000,00	0,155	74	3557	86	21	
261ECE0030	32.934,00	0,139	79	662	86	22	
PBT-405/001	144.780,00	0,117	76	1643	86	23	
359ECE0010	135.672,00	0,110	83	1884	91		
PB-325/005	98.400,00	0,085	78	1261	85		
PB-393/003	552.000,00	0,051	63	1253	86		
261ECE0090	50.646,00	0,043	85	700	89		
PB-325/011	111.180,00	0,038	82	866	87		
085ECE0530	136.938,00	0,035	82	1397	86		
187ECE0370	260.505,00	0,025	70	755	79		
085ECE0570	79.260,00	0,024	84	463	88		
354ECE0210	1.876.880,00	0,019	65	2085	82		
371ECE0330	92.502,00	0,009	79	228	82		
168ECE0370	95.832,00	0,007	82	158	86		
341ECE0130	94.050,00	0,004	84	262	86		
366ECE0190	159.150,00	0,004	82	144	87		
PB-065/001	-	-	91	1027	99		
PB-087/007	-	-	96	469	99		
PB-105/001	-	-	90	2042	102		

## Classificação do PCR:

Seg	PCR	Paraíba	Ceará
040ECE0030D	40		1
PB-393/003	63	1	
354ECE0210	65	2	
PB-420/001	67	3	
PB-420/003	67	3	
187ECE0370	70		3
PB-018/001	73	4	
PB-073/011	74	5	
PB-004/007	74	6	
PBT-408/001	75	7	
PBT-405/001	76	8	
060ECE0170D	77		4
PB-073/001	77	9	
PB-073/003	77	10	
PB-073/021	78	11	
PB-073/007	78	12	
PB-079/003	78	13	
PB-325/005	78	14	
371ECE0330	79		5
261ECE0030	79		6
PB-079/001	79	15	
PB-325/011	82	16	
366ECE0190	82		7
168ECE0370	82		8
PB-041/007	82	17	
085ECE0530	82		9
359ECE0010	83		10
085ECE0570	84		11
PB-018/003	84	18	
341ECE0130	84		12
PB-004/005	85	19	
261ECE0090	85		13
040ECE0090D	86		14
PB-018/005	86	20	
085ECE0090	86		15
065ECE0050D	87		16
065ECE0030D	88		17
PB-105/001	90	21	
PB-065/001	91	22	
PB-087/007	96	23	