Campus de São Carlos

***COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS E RÍGIDOS COM BASE EM CONCEITOS DE
GERÊNCIA DE PAVIMENTOS***

FERNANDA CRISTINA BIROLI

ORIENTADOR: PROF. ASSOC. JOSÉ LEOMAR FERNANDES JÚNIOR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Transportes
Área de Pós-graduação em Transportes

COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS E RÍGIDOS COM BASE EM CONCEITOS DE
GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 01.09.03

Ass.: *Kamafllu*

Fernanda Cristina Biroli

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100044183

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior

São Carlos
2003

✓

Class.	TESE
Cutt.	0894
Tombo	T289/03
Sysno	1333832

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

B619c Biroli, Fernanda Cristina
 Comparação dos custos de pavimentos flexíveis e
 rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos
 / Fernanda Cristina Biroli. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior.

1. Pavimentos flexíveis. 2. Pavimentos rígidos. 3.
Custos. 4. Gerência de pavimentos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheiro **FERNANDA CRISTINA BIROLI**

Dissertação defendida e julgada em 14-07-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JÚNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

A PROVA DA

Prof. Dr. **VLADIMIR COELHO**
(UNESP-Campus de Bauru)

APROVAZA

Profª. Dra. **ELIANE VIVIANI**
(UNESP-Campus de Bauru)

APROVAZA

Prof. Assoc. **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC, em exercício

DEDICATÓRIA

**Ao meu pai, José Roberto, e
a minha mãe, Marta.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior, pela orientação e pela instrução oferecidas durante a execução desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pela bolsa de estudo concedida.

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos em todas as etapas deste trabalho. Ao professor Segantine, pela sua constante presença e pelos excelentes conselhos durante toda a minha permanência em São Carlos.

A todos funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, pelo apoio técnico e administrativo sempre constantes. Em especial, à Magaly e ao Vicente pela ajuda e amizade.

Aos meus pais, José Roberto e Marta, a quem dedico as minhas alegrias e os bons resultados obtidos neste trabalho, pela presença constante em todos os momentos da minha vida. Ao meu pai, em especial, de quem tenho total orgulho pela plena competência e pela constante presença em todas as decisões da minha vida.

A minha irmã Roberta pelo amor constante e pela paciência “quase” interminável. A minha irmã Flávia e ao meu cunhado Marcelo, pelo amor e preocupação constante e pela competência e paciência na revisão final deste trabalho.

Ao meu namorado Alex, pelo amor, carinho e pelo apoio nos momentos mais difíceis. Agradeço muito a esta pessoa que eu amo tanto e que sempre está ao meu lado.

A minha avó Amélia, peça fundamental para a finalização desta pesquisa.

A todos os amigos e colegas com quem tenho convivido. Agradeço a amizade e a experiência compartilhada nesta fase da vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. INTRODUÇÃO À GERÊNCIA DE PAVIMENTOS.....	5
2.1. CUSTOS ASSOCIADOS AOS PAVIMENTOS.....	7
2.2. PROGRAMA COMPUTACIONAL DE GERÊNCIA DE	
PAVIMENTOS HDM-4.....	8
2.2.1. A Função do HDM-4 na Gerência de Rodovias.....	13
2.2.2. Aplicações do HDM-4.....	13
2.2.3. Módulos do HDM-4.....	14
2.2.4. Análise ao Longo do Tempo.....	15
2.2.5. Dados de Entrada Necessários ao HDM-4.....	16
2.2.6. Dados de Saída do HDM-4.....	17
3. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS.....	18
3.1. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	19
3.1.1. Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	21
<i>a) Método de Dimensionamento da AASHTO (1993).....</i>	21
<i>b) Método de Dimensionamento do DNER (1981).....</i>	28

3.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	33
3.2.1. Execução de Pavimentos Rígidos.....	36
<i>a) Fissuras.....</i>	<i>38</i>
<i>b) Juntas em Pavimentos Rígidos.....</i>	<i>41</i>
<i>c) Selagem de Juntas.....</i>	<i>44</i>
<i>d) Reservatório do Selante.....</i>	<i>45</i>
<i>e) Equipamentos para Execução.....</i>	<i>46</i>
<i>f) Sub-bases para Pavimentos Rígidos.....</i>	<i>47</i>
3.2.2. Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Rígidos.....	51
<i>a) Método de Dimensionamento da PCA/84.....</i>	<i>51</i>
<i>b) Método de Dimensionamento da AASHTO (1993)</i>	<i>61</i>
 4. CUSTOS DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS E CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS.....	 66
4.1. CUSTOS DE M & R DOS PAVIMENTOS.....	66
4.1.1. Identificação de Defeitos dos Pavimentos.....	67
4.1.2. Tipos de Defeitos dos Pavimentos.....	68
<i>a) Defeitos dos Pavimentos Flexíveis do Programa SHRP.....</i>	<i>68</i>
<i>b) Defeitos dos Pavimentos Rígidos do Programa SHRP.....</i>	<i>71</i>
4.1.3. Definição de Estratégias e Seleção de Atividades de M & R dos Pavimentos.....	73
4.1.4. Consideração das Atividades de M & R dos Pavimentos no HDM-4.....	83
<i>a) Atividades de M & R nos Pavimentos Flexíveis Consideradas pelo HDM-4.....</i>	<i>84</i>
<i>b) Atividades de M&R nos Pavimentos Rígidos Consideradas pelo Programa HDM-4.....</i>	<i>86</i>
4.2. CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS.....	88
 5. CUSTOS TOTAIS DE PAVIMENTOS.....	 91
5.1. FATORES CONSIDERADOS NO DIMENSIONAMENTO E NOS CUSTOS DOS PAVIMENTOS.....	91
5.1.1. Características dos Tráfegos Considerados.....	91

<i>a) Tipos de veículos e pesos por eixo.....</i>	92
<i>b) Classificação e composição dos tráfegos considerados.....</i>	93
<i>c) Taxa de crescimento do tráfego considerado.....</i>	93
5.1.2. Períodos de Projeto Considerados.....	93
5.1.3. Características dos Subleitos Considerados.....	94
5.1.4. Estruturas das Camadas dos Pavimentos Considerados.....	94
5.2. DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS.....	95
5.2.1. Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis pelo Método da AASHTO (1993)	95
5.2.2. Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis pelo Método do DNER (1981)	98
5.2.3. Dimensionamento dos Pavimentos Rígidos pelo Método da PCA (1984)	101
5.2.4. Dimensionamento dos Pavimentos Rígidos pelo Método da AASHTO (1993)	104
5.3. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	108
5.3.1. Custos Unitários de Construção de Pavimentos.....	108
5.3.2. Resultados dos Custos de Construção de Pavimentos.....	109
5.4. CUSTOS DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	113
5.4.1. Atividades de M & R dos Pavimentos.....	113
5.4.2. Critérios de Intervenção das Atividades de M & R dos Pavimentos.....	113
5.4.3. Custos Unitários das Atividades de M & R de Pavimentos..	114
5.5. CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS.....	119
5.6. CUSTOS TOTAIS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E RÍGIDOS.....	122
5.7. CUSTOS TOTAIS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E RÍGIDOS SEM ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO.....	126
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	130
6.1. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	130

6.1.1. Efeito dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos....	130
6.1.2. Efeito dos Tipos de Subleito.....	133
6.1.3. Efeito dos Períodos de Projeto.....	134
6.1.4. Comparação dos Custos de Construção dos Pavimentos Flexíveis e Rígidos.....	134
6.2. CUSTOS DE M & R DOS PAVIMENTOS.....	135
6.3. CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS.....	138
6.3.1. Efeito dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos....	138
6.3.2. Efeito dos Tipos de Subleito.....	138
6.3.3. Comparação dos Custos de Operação dos Veículos dos Pavimentos Flexíveis e Rígidos.....	139
6.4. CUSTOS TOTAIS DOS PAVIMENTOS.....	139
6.4.1. Efeito dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos....	139
6.4.2. Comparação dos Custos Totais dos Pavimentos Flexíveis e Rígidos.....	140
6.4.3. Efeito das Atividades de Manutenção e Reabilitação.....	140
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	148

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Intervalos das porcentagens dos custos dos pavimentos obtidos neste trabalho.....	8
FIGURA 2 - Otimização dos padrões de construção e manutenção de rodovias visando a minimização do custo total da modalidade rodoviária.....	12
FIGURA 3 - Diferença de distribuição de carga entre pavimentos flexíveis e rígidos.....	19
FIGURA 4 - Camadas componentes de um pavimento flexível.....	20
FIGURA 5 - Variação do coeficiente estrutural da camada (a_1) para revestimento de concreto asfáltico, relacionado ao módulo de elasticidade (resiliente) do concreto asfáltico.....	25
FIGURA 6 - Variação do coeficiente estrutural da camada de base granular (a_2) com vários parâmetros relacionados à base.....	26
FIGURA 7 - Variação do coeficiente estrutural da camada de sub-base granular (a_3) com vários parâmetros relacionados à sub-base.....	27
FIGURA 8 - Procedimento para determinar as espessuras das camadas pela AASHTO (1993).	27
FIGURA 9 - Ábaco de dimensionamento do DNER para pavimentos flexíveis.....	31
FIGURA 10 - Simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento pelo método do DNER.....	32
FIGURA 11 - Pavimento de concreto simples.....	34
FIGURA 12 - Pavimento de concreto simples com barras de transferência.....	35
FIGURA 13 - Pavimento de concreto com armadura distribuída descontínua.....	35
FIGURA 14 - Pavimento de concreto continuamente armado.....	36
FIGURA 15 - Aspecto superficial do pavimento de concreto após a ocorrência de fissuras transversais (sem juntas transversais)	39
FIGURA 16 - Empenamento teórico diurno e noturno de pavimento rígido.....	40
FIGURA 17 - Aspecto superficial de pavimento de concreto sem juntas, após a ocorrência de fissuras transversais e longitudinais.....	41
FIGURA 18 - Tipos de juntas em pavimentos rígidos.....	44
FIGURA 19 - Reservatório do selante.....	46
FIGURA 20 - Efeito do tipo de sub-base sob carregamento repetido.....	49
FIGURA 21 - Posição de carga crítica para as tensões de tração na flexão.....	54
FIGURA 22 - Posição de carga crítica para as deformações.....	54
FIGURA 23 - Relação entre índice de suporte Califórnia e coeficiente de recalque do subleito.....	56
FIGURA 24 - Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto composto não monolítico.....	60

FIGURA 25 - Ábaco para estimar o valor do módulo de reação do sistema subleito - sub-base.....	62
FIGURA 26 - Correção do valor do módulo de reação do sistema subleito-sub-base.....	63
FIGURA 27 - Curva de desempenho - análise de ciclos de vida durante o período de projeto.....	83
FIGURA 28 - Efeito da condição da via sobre os custos de operação dos veículos.....	89
FIGURA 29 - 1º pavimento-tipo: pavimento flexível.....	94
FIGURA 30 - 2º pavimento-tipo: pavimento rígido (sub-base de brita graduada).....	94
FIGURA 31 - 3º pavimento-tipo: pavimento rígido (sub-base de concreto rolado).....	95
FIGURA 32 - Custos de construção de pavimentos flexíveis em função do método de dimensionamento e do período de projeto (P), para CBR = 12%.....	131
FIGURA 33 - Custos de construção de pavimentos rígidos em função do método de dimensionamento e do tipo de sub-base, para CBR = 12% e P = 20 anos.....	132
FIGURA 34 - Custos de construção de pavimentos rígidos em função do método de dimensionamento e do tipo de sub-base, para CBR = 12% e P = 30 anos.....	132
FIGURA 35 - Custos de construção de pavimentos flexíveis em função do método de dimensionamento e da capacidade de suporte do subleito, para P = 30 anos.....	133
FIGURA 36 - Custos de construção de pavimentos rígidos em função do método de dimensionamento e da capacidade de suporte do subleito, para P = 30 anos.....	133
FIGURA 37 - Custos de construção de pavimentos flexíveis e rígidos em função da capacidade de suporte do subleito, para P = 20 anos.....	134
FIGURA 38 - Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA, para o menor volume de tráfego (Tráfego 1), CBR = 3% e P = 10 anos.....	135
FIGURA 39 - Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA, para o menor volume de tráfego (Tráfego 3), CBR = 3% e P = 10 anos.....	136
FIGURA 40 - Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA, para o menor volume de tráfego (Tráfego 5), CBR = 3% e P = 10 anos.....	136
FIGURA 41 - Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da DNER, para o menor volume de tráfego (Tráfego 1), CBR = 3% e P = 10 anos.....	137
FIGURA 42 - Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da DNER, para o menor volume de tráfego (Tráfego 3), CBR = 3% e P = 10 anos.....	137
FIGURA 43 - Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da DNER, para o menor volume de tráfego (Tráfego 5), CBR = 3% e P = 10 anos.....	138
FIGURA 44 - Custos dos usuários de pavimentos flexíveis e rígidos, para períodos de projeto (P) de 20 e 30 anos.....	139
FIGURA 45 - Comparação dos custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos, para P = 20 anos..	141

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Espessuras mínimas (construtivas) recomendadas pela AASHTO (1993) para materiais com $M_R > 270 \text{ MPa}$	28
TABELA 2 -	Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	30
TABELA 3 -	Tipos de sub-bases para pavimentos de concreto.....	47
TABELA 4 -	Faixas granulométricas para sub-bases granulares de pavimentos de concreto.....	48
TABELA 5 -	Aumento de k devido à presença de sub-base granular.....	57
TABELA 6 -	Valores recomendados do coeficiente de drenagem (C_d) para pavimentos rígidos..	65
TABELA 7 -	Causas dos principais defeitos dos pavimentos flexíveis.....	70
TABELA 8 -	Causas dos principais defeitos dos pavimentos rígidos.....	72
TABELA 9 -	Limites legais de carga por eixo para os veículos considerados.....	92
TABELA 10 -	Classificação e composição dos tráfegos utilizados.....	93
TABELA 11 -	Dimensionamento Tráfego 1 – pavimentos flexíveis (método da AASHTO/93).....	97
TABELA 12 -	Dimensionamento Tráfego 2 – pavimentos flexíveis (método da AASHTO/93).....	97
TABELA 13 -	Dimensionamento Tráfego 3 – pavimentos flexíveis (método da AASHTO/93).....	97
TABELA 14 -	Dimensionamento Tráfego 4 – pavimentos flexíveis (método da AASHTO/93).....	98
TABELA 15 -	Dimensionamento Tráfego 5 – pavimentos flexíveis (método da AASHTO/93).....	98
TABELA 16 -	Dimensionamento Tráfego 1 – pavimentos flexíveis (método do DNER/ 1981).....	99
TABELA 17 -	Dimensionamento Tráfego 2 – pavimentos flexíveis (método do DNER/ 1981).....	99
TABELA 18 -	Dimensionamento Tráfego 3 – pavimentos flexíveis (método do DNER/ 1981).....	100
TABELA 19 -	Dimensionamento Tráfego 4 – pavimentos flexíveis (método do DNER/ 1981).....	100
TABELA 20 -	Dimensionamento Tráfego 5 – pavimentos flexíveis (método do DNER/ 1981).....	101
TABELA 21 -	Dimensionamento Tráfego 1 – pavimentos rígidos (método da PCA/ 1984).....	103
TABELA 22 -	Dimensionamento Tráfego 2 – pavimentos rígidos (método da PCA/ 1984).....	103
TABELA 23 -	Dimensionamento Tráfego 3 – pavimentos rígidos (método da PCA/ 1984).....	103
TABELA 24 -	Dimensionamento Tráfego 4 – pavimentos rígidos (método da PCA/ 1984).....	103
TABELA 25 -	Dimensionamento Tráfego 5 – pavimentos rígidos (método da PCA/ 1984).....	104
TABELA 26 -	Dimensionamento Tráfego 1 – pavimentos rígidos (método do AASHTO/ 93).....	106
TABELA 27 -	Dimensionamento Tráfego 2 – pavimentos rígidos (método do AASHTO/ 93).....	107
TABELA 28 -	Dimensionamento Tráfego 3 – pavimentos rígidos (método do AASHTO/ 93).....	107
TABELA 29 -	Dimensionamento Tráfego 4 – pavimentos rígidos (método do AASHTO/ 93).....	107
TABELA 30 -	Dimensionamento Tráfego 5 – pavimentos rígidos (método do AASHTO/ 93).....	107

TABELA 31 -	Preços unitários utilizados para a composição dos custos de construção.....	109
TABELA 32 -	Resultados dos custos de construção (R\$ x 10 ⁶) dos pavimentos flexíveis a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP. – método do AASHTO (1993).....	110
TABELA 33 -	Resultados dos custos de construção (R\$ x 10 ⁶) dos pavimentos flexíveis a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP - método do DNER (1981).....	110
TABELA 34 -	Resultados dos custos de construção (R\$ x 10 ⁶) dos pavimentos rígidos a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP - método da PCA/84.....	111
TABELA 35 -	Resultados dos custos de construção (R\$ x 10 ⁶) dos pavimentos rígidos a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP – método da AASHTO/93.....	112
TABELA 36 -	Custos unitários das atividades de M & R dos pavimentos flexíveis e rígidos.....	115
TABELA 37 -	Custo de manutenção (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos.....	116
TABELA 38 -	Custo de manutenção (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos.....	116
TABELA 39 -	Custo de manutenção (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos.....	117
TABELA 40 -	Custo de manutenção (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos.....	117
TABELA 41 -	Custo de manutenção (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos.....	118
TABELA 42 -	Custo de manutenção (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos.....	118
TABELA 43 -	Custo dos usuários (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos.....	119
TABELA 44 -	Custo dos usuários (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos.....	120
TABELA 45 -	Custo dos usuários (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos.....	120
TABELA 46 -	Custo dos usuários (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos.....	121
TABELA 47 -	Custo dos usuários (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos.....	121
TABELA 48 -	Custo dos usuários (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos.....	122
TABELA 49 -	Custo total (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos.....	123
TABELA 50 -	Custo total (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos.....	123
TABELA 51 -	Custo total (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos.....	124

TABELA 52 -	Custo total (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos.....	124
TABELA 53 -	Custo total (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos.....	125
TABELA 54 -	Custo total (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos.....	125
TABELA 55 -	Custos totais (sem manutenção) (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos...	126
TABELA 56 -	Custos totais (sem manutenção) (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 10 anos...	127
TABELA 57 -	Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos...	127
TABELA 58 -	Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 20 anos...	128
TABELA 59 -	Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos...	128
TABELA 60 -	Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10 ⁶) em função do tipo de pavimento, do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do CBR, para P = 30 anos...	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACPA	Associação Americana de Pavimentos de Concreto
ARB	Associação Rodoviária Brasileira
ASTM	American Society for Testing and Materials
BT	Barra de Transferência
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CRCP	Continuously Reinforced Concrete Pavement
CM	Cura Média
DER/ SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FICEM	Federação Interamericana Del Cemento
FINNRA	Finnish Road Administration
GC	Grau de Compactação
HDM-III	Highway Design and Maintenance Standard Model
HDM-4	Highway Development and Management Tools
HRG	Highway Research Group
IKRAM	Road Research Institute in Malaysia
IRI	International Roughness Index
ISC	Índice de Suporte Califórnia
ISOHDM	International Study of Highway Development and Management Tools
JPCP	Jointed Plain Concrete Pavement
JRCP	Jointed Reinforced Concrete Pavement
LCPC	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussees
LTPP	Long Term Performance Pavement
MIT	Massachusetts Institute of Technology
M & R	Manutenção e Reabilitação
NDLI	N. D. Lea International
PCA	Portland Cement Association
PSI	Present Serviceability Index

RR	Ruptura Rápida
RD	Road Deterioration
RDME	Road Deterioration and Maintenance Effects
RTIM2	Road Transport Investment Model
RUE	Road User Effects
SEE	Social Environment Effects
SGP	Sistema de Gerência de Pavimentos
SHRP	Strategic Highway Research Program
SI	Sistema Internacional de Unidades
SN	Structural Number
SNRA	Swedish National Road Administration
TRL	Transport Research Laboratory
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
VPL	Valor Presente Líquido
WE	Works Effects

LISTA DE SÍMBOLOS

a_1	Coefficiente estrutural da camada de revestimento
a_2	Coefficiente estrutural da camada de base
a_3	Coefficiente estrutural da camada de sub-base
B	Espessura da base
C_d	Coefficiente de drenagem
CBR	Índice de Suporte Califórnia
D	Espessura da placa de concreto
D_i	Espessura da i-ésima camada do pavimento flexível
$D_{máx}$	Diâmetro máximo do agregado
E_c	Módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland
E_{AC}	Módulo de elasticidade do revestimento de concreto asfáltico
E_{BS}	Módulo de elasticidade da base
E_{SB}	Módulo de elasticidade da sub-base
$f_{ctM,k}$	Resistência característica do concreto à tração na flexão
f'_c	Resistência à compressão simples do concreto de cimento Portland
FC	Fator de cargas
FE	Fator de eixos
FR	Fator climático regional
FV	Fator de veículos
h_{20}	Espessura da sub-base do pavimento
H_{20}	Espessura de pavimento acima da sub-base
H_n	Espessura total de pavimento necessária para proteger um material com CBR = n
IP	Índice de Plasticidade
J	Coefficiente de transferência de carga
k	Coefficiente de recalque do subleito ou do sistema subleito-sub-base/ Módulo de reação do subleito
$k_{corrigido}$	Coefficiente de recalque considerando a perda de suporte da sub-base
k_B	Coefficiente estrutural da base
k_R	Coefficiente estrutural do revestimento
k_{Ref}	Coefficiente estrutural do reforço
k_s	Coefficiente estrutural da sub-base
LL	Limite de Liquidez
m_2	Coefficiente de drenagem na base

m_3	Coefficiente de drenagem na sub-base
M_R	Módulo de ruptura ou módulo resiliente do subleito
N	Número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto
p_0	Índice de serventia inicial
p_t	Índice de serventia final
P	Período de Projeto
P_{200}	Porcentagem passando na peneira n.º 200
R	DNER – Espessura do revestimento
R	AASHTO – Nível de confiança de projeto
S_0	Desvio padrão combinado
S'_c	Módulo de ruptura do concreto de cimento Portland utilizado no projeto
SN	Número estrutural do pavimento
t	Taxa de crescimento anual do tráfego
Z_R	Desvio padrão normal
W_{18}	Número de eixos simples equivalentes do eixo padrão (80kN)
ΔPSI	Diferença entre o índice de serventia inicial e o índice de serventia final de projeto
V_0	Volume médio diário de tráfego, em um sentido ou faixa, no primeiro ano em que o pavimento entrar em serviço
V_m	Volume médio diário de tráfego, em um sentido ou faixa
V_t	Volume total de tráfego, no período de projeto, em um sentido ou faixa

RESUMO

BIROLI, F. C. (2003). *Comparação dos custos de pavimentos flexíveis e rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Este trabalho tem por objetivo estudar todas as parcelas de custos que envolvem os pavimentos flexíveis e rígidos durante sua vida em serviço, abordando os custos de construção, de manutenção e reabilitação e os custos de operação dos veículos. Inicialmente, tem-se a análise dos métodos utilizados para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos, bem como dos custos associados a diferentes procedimentos construtivos utilizados no Brasil, visando o estabelecimento dos custos de construção. Os custos de manutenção e reabilitação são determinados a partir da identificação das principais formas de deterioração dos pavimentos. Os custos de operação dos veículos, que incidem diretamente sobre os usuários e dependem, principalmente, da condição da superfície de rolamento, são calculados com base em modelos de desempenho de programas de gerência de pavimentos utilizados por organismos rodoviários brasileiros. Para uma maior abrangência da análise comparativa de pavimentos flexíveis e rígidos foi elaborada uma programação fatorial de simulações. A comparação dos custos dos pavimentos flexíveis e rígidos é proveniente da análise dos custos totais obtidos para todas as combinações de fatores intervenientes (células da matriz fatorial). Os fatores utilizados são: tipo de subleito, materiais e espessuras das camadas (métodos de dimensionamento), solicitações e volume de tráfego e estratégia de manutenção e reabilitação dos pavimentos.

Palavras-chave: pavimentos flexíveis; pavimentos rígidos; custos; gerência de pavimentos.

ABSTRACT

BIROLI, F. C. (2003). *Comparison of costs between flexible and rigid pavements based on pavement management concepts*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

This research work aims to determine and compare the total cost for both, rigid and flexible pavements. Thus, it analyzes all components of costs related to flexible and rigid pavements during their service lives, i.e., construction cost, maintenance and rehabilitation cost and users cost. For the determination of the construction cost it is considered the most used pavement design methods, as well construction procedures used in Brazil. The maintenance and rehabilitation cost is calculated based on the identification of the main distress types for both flexible and rigid pavements that occur in Brazil. The users cost, function of the pavement surface condition, is calculated from performance models used by Brazilian highway agencies. For a broader comparison of rigid and flexible pavements it is performed a factorial analysis. The main factors to be considered are: subgrade type, pavement layer material and thickness, traffic load and volume, maintenance and rehabilitation strategy. The simulations for the determination of total cost will be done for each cell of the factorial matrix, i.e., for each combination of factors.

Keywords: flexible pavements; rigid pavements; costs; pavement management.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem. Destina-se a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego e do intemperismo, tornando mais durável a superfície de rolamento, e a melhorar as condições de rolamento, servindo aos usuários com conforto, segurança e economia.

Os pavimentos representam parcela expressiva da infra-estrutura de transportes. São estruturas complexas, que envolvem muitas variáveis, tais como: cargas do tráfego, solicitações ambientais, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais etc. Devem ser projetados e construídos de maneira a fornecer, com economia, boa qualidade de rolamento, que deve ser garantida, ao longo do tempo, com atividades de manutenção e reabilitação.

Entre as décadas de 40 e 50 foi intensa, no Brasil, a utilização do concreto de cimento Portland em vias urbanas e em rodovias. Essa prática sofreu, a partir de então, forte retração por força de vários fatores de natureza política e econômica. Durante mais de 20 anos, a partir do término da Segunda Guerra Mundial, a produção nacional do cimento foi destinada prioritariamente ao suprimento de necessidades fundamentais da indústria da Construção Civil, o que conduziu os setores de pavimentação a lançar-se em empreendimentos que não dependessem desse produto.

Na mesma época, desenvolveu-se nos EUA (e rapidamente foi absorvida pelos órgãos brasileiros ligados ao ramo da pavimentação) extensa tecnologia de pavimentos flexíveis, à base de produtos betuminosos, em detrimento aos de cimento Portland. A opção pelo asfalto foi estimulada pelo baixo custo, fruto do desenvolvimento da indústria do petróleo, numa época em que as empresas de cimento tinham outras prioridades. Além do mais, o asfalto era prático, facilitava a manutenção e conforto ao dirigir.

Essa situação estimulou o meio técnico de pavimentação brasileiro a aparelhar-se quase que exclusivamente para o emprego de pavimentos asfálticos. Como consequência, existe até hoje uma certa inércia no que se refere à adoção da alternativa dos pavimentos rígidos, mesmo havendo sinais efetivos da mudança das circunstâncias técnicas e, principalmente, econômicas.

O crescimento da malha viária e a falta de conservação das vias existentes causaram uma grande crise no setor, à qual o governo respondeu com a realização de concessões de trechos de rodovias à iniciativa privada.

Atualmente, com as constantes oscilações de preços dos derivados de petróleo no mercado mundial, uma maior capacidade de produção da indústria de cimentos e novas tecnologias que reduziram o desconforto dos pavimentos de concreto, o pavimento rígido passou a despertar a atenção dos organismos rodoviários e das concessionárias de rodovias.

São várias as vias pavimentadas em concreto no Brasil, dentre as principais tem-se: as marginais das rodovias Presidente Dutra (Guarulhos - SP) e Castelo Branco (SP); a interligação entre as rodovias Anchieta e Imigrantes (SP); a Linha Circular Sul e o Contorno Sul (Curitiba - PR); o Complexo Viário Maria Maluf (cidade de São Paulo); a Avenida Assis Brasil (Porto Alegre - RS); a ligação da BR-277 (Balsa Nova - PR); trechos das Rodovias dos Bandeirantes, dos Imigrantes e Ayrton Senna; o Rodoanel “Mário Covas” (em construção) e o Corredor Ligeirinho (Curitiba - PR).

Existem vantagens e desvantagens em cada um dos tipos de pavimentos, dependendo dos fatores que intervêm nos custos de pavimentação (tais como tipo de tráfego, volume de tráfego, tipo de subleito etc.), o que dificulta a escolha do tipo mais econômico. Para dar subsídios aos organismos rodoviários, são necessários estudos que contemplem não só os custos iniciais, mas também os custos de manutenção e reabilitação e, principalmente, os custos de operação dos veículos, responsáveis pela maior parcela dos custos rodoviários.

O principal objetivo desta pesquisa é o levantamento dos custos de construção, de manutenção e reabilitação e de operação dos veículos de pavimentos flexíveis e rígidos, visando determinar o custo total ao longo da vida em serviço e, a partir desses resultados, fazer uma análise comparativa dos pavimentos flexíveis e rígidos.

Para atingir os objetivos propostos, desenvolve-se uma programação fatorial que tem como variáveis dependentes o custo total e suas parcelas constituintes (custo de construção, custo de manutenção e reabilitação e custo de operação dos veículos). Os fatores considerados (variáveis independentes) são: solicitações e volume de tráfego; resistência do subleito; materiais, espessuras e estruturas das camadas.

Apresenta-se, no Capítulo 2, uma breve revisão bibliográfica sobre Sistemas de Gerência de Pavimentos, ressaltando seus objetivos e principais conceitos, assim como as parcelas que compõem o custo total da modalidade rodoviária e o programa computacional de gerência de pavimentos HDM-4.

No Capítulo 3 é apresentada revisão bibliográfica sobre os custos de construção de pavimentos flexíveis e rígidos, exemplificando alguns modos de execução, materiais, tipos e dimensionamento de pavimentos. Neste trabalho, o dimensionamento dos pavimentos flexíveis é baseado nos métodos utilizados pela American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 1993) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1981). O dimensionamento dos pavimentos rígidos é, por sua vez, baseado nos métodos utilizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (PCA, 1984) e pela American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 1993).

Uma revisão bibliográfica dos custos de manutenção e reabilitação (M & R), associados às principais formas de deterioração dos pavimentos (SHRP, 1993), é apresentada no Capítulo 4. Apresenta-se, também nesse capítulo, uma breve revisão bibliográfica sobre os custos de operação dos veículos.

No Capítulo 5 são apresentados os fatores considerados nos dimensionamentos e nos cálculos das parcelas dos custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos. Apresentam-se também, os resultados dos dimensionamentos dos pavimentos, dos custos de construção, dos custos de M & R, dos custos operacionais e, por fim, o resultado dos custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos. Esses custos são calculados com base em Tabelas de Preços Unitários do DER/SP.

Para uma maior abrangência da análise comparativa de pavimentos flexíveis e rígidos, no Capítulo 6 é apresentada a programação fatorial de simulações, com a determinação de todas as parcelas que compõem o custo total. Finalizando o trabalho, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – INTRODUÇÃO À GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

Os recursos orçamentários disponíveis para manutenção e reabilitação de pavimentos quase sempre são inferiores às necessidades, sendo fundamental, portanto, o estabelecimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos para que os recursos sejam utilizados da maneira mais eficiente possível.

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é uma ferramenta que visa fornecer, aos tomadores de decisão, estratégias ótimas, ou seja, o melhor resultado possível a partir dos recursos disponíveis.

De acordo com Haas, Hudson e Zaniewski (1994), um Sistema de Gerência de Pavimentos é um conjunto de atividades coordenadas que se destina a planejar, projetar, construir, manter, avaliar e conservar os pavimentos e a priorizar investimentos, de maneira que os usuários possam ser servidos por uma rodovia confortável, segura, eficiente e econômica. Um SGP tem como objetivo principal a utilização de informações confiáveis e critérios de decisão para produzir um programa de construção, manutenção e reabilitação de pavimentos que dê o máximo retorno possível para os recursos disponíveis.

Um dos objetivos principais da gerência de pavimentos é fornecer respostas para as seguintes questões (FERNANDES, JR., ODA E ZERBINI, 1999):

- 1) *O que* precisa ser feito numa determinada rede viária? (seleção da *estratégia* ótima);
- 2) *Como* devem ser executados os serviços? (definição das atividades de *manutenção e reabilitação* para cada seção);
- 3) *Quando* serão necessárias as intervenções para evitar a ruptura e prolongar a vida em serviço do pavimento? (definição da melhor época para a execução dos serviços de manutenção);
- 4) *Onde* se localizam os projetos prioritários?

Um Sistema de Gerência de Pavimentos deve catalogar os pavimentos, conhecer as condições presentes e prever as taxas de deterioração futuras, avaliar as alternativas e estratégias de manutenção e reabilitação necessárias e estimar os custos totais (de construção, de M & R e de operação dos veículos) no presente e no futuro, otimizando a utilização dos recursos disponíveis.

As atividades da gerência de pavimentos e os componentes do sistema estão caracterizados, geralmente, em dois níveis administrativos: gerência em nível de rede e gerência em nível de projeto.

A gerência de pavimentos em nível de rede trabalha com informações resumidas, relacionadas com toda a malha viária, utilizadas para tomada de decisões essencialmente administrativas (planejamento, programação e orçamento). Algumas das características ou aplicações de um sistema de gerência em nível de rede são:

- Identificação de projetos candidatos para intervenções;
- Priorização dos projetos considerando as características de desempenho, tráfego, custo dos usuários e outros fatores locais;
- Geração de necessidades de orçamento da agência a curto e longo prazo;
- Análise de estratégias de intervenção, com avaliação da condição atual do sistema e previsão da condição futura, em função dos recursos aplicados em cada alternativa.

A gerência de pavimentos em nível de projeto envolve o dimensionamento, construção, manutenção e reabilitação. Trabalha com informações técnicas detalhadas, relacionadas a seções específicas do pavimento, incluindo um diagnóstico detalhado dos defeitos, suas causas prováveis e métodos alternativos para correção. Exemplos de atividades de gerência de pavimentos em nível de projeto são:

- Seleção das atividades de manutenção, reabilitação e reconstrução, com base em critérios estabelecidos pelos níveis mais elevados da gerência;
- Realimentação da base de dados com relação ao desempenho do pavimento, fornecendo dados para as atividades de projeto, construção e manutenção;
- Definição dos parâmetros principais de projeto, tais como: resistência do subleito, número de solicitações do eixo padrão e especificações para os materiais.

A gerência de pavimentos define, portanto, a melhor estratégia de manutenção e reabilitação e a melhor época para a execução dos serviços, reduzindo assim, os custos de operação dos veículos, os custos futuros com manutenção e reabilitação, os custos dos acidentes etc.

2.1. CUSTOS ASSOCIADOS AOS PAVIMENTOS

O custo total de um pavimento é composto pelas seguintes parcelas: custo de construção, custo de M & R e custos operacionais. Enquanto os custos de construção e de manutenção e reabilitação dos pavimentos consomem grande parte dos recursos orçamentários de qualquer nação, os custos que incidem sobre os usuários quando da operação dos veículos são ainda maiores.

Nos custos de construção incidem, dentre outros, a desapropriação, o projeto geométrico, a terraplenagem, as obras de drenagem e a pavimentação. Os custos de manutenção estão ligados à deterioração do pavimento e dependem dos padrões de manutenção adotados. O custo de operação dos veículos é composto pelos custos devido ao volume de tráfego, à condição dos pavimentos, à geometria da via, às velocidades, aos tipos e idades dos veículos. Outras parcelas podem ser consideradas no custo total, geralmente de maneira exógena aos programas de gerência de pavimentos: atrasos nas viagens, tanto para cargas quanto para passageiros; acidentes; congestionamentos; poluição (Figura 1).

Deve-se destacar que a falta ou atraso nas atividades de manutenção e reabilitação acarreta danos aos pavimentos que vão exigir, posteriormente, um volume de recursos mais elevado que os previstos originalmente. Além disso, o tráfego sobre pavimentos deteriorados aumenta consideravelmente os custos operacionais dos veículos (maior consumo de combustível, maior desgaste dos pneus, maior tempo de viagem, maior desgaste dos componentes dos veículos, número maior de acidentes, redução do conforto).

FIGURA 1 – Intervalos das porcentagens dos custos dos pavimentos obtidos neste trabalho.

2.2. PROGRAMA COMPUTACIONAL DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS HDM-4

O Programa de Gerência de Pavimentos HDM-III (Highway Design and Maintenance Standards Model), desenvolvido pelo Banco Mundial, tem sido utilizado, por aproximadamente duas décadas, para avaliar técnica e economicamente alternativas de investimentos em rodovias e analisar estratégias e padrões de projetos. Com interesse de estender o alcance do HDM-III e criar um sistema melhor para a gerência de vias, foi realizado um estudo e gerado o programa HDM-4, com ferramentas adaptadas e computacionalmente mais amigável (KERALI, McMULLEN e ODOKI, 2000).

Conforme apresentado por Fernandes Jr. (1996a), os estudos do Banco Mundial foram iniciados em 1969 visando o desenvolvimento de uma metodologia para análise econômica de projetos rodoviários em países em desenvolvimento. A Fase I, completada em 1971, foi executada pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology), pelo TRRL (British Transport and Road Research Laboratory) e pelo LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées). Foram desenvolvidos, na Fase I, a estrutura conceitual e o primeiro Modelo de Custos Rodoviários, inter-relacionando os custos de construção, de manutenção e de operação dos veículos.

Embora a estrutura conceitual do modelo fosse correta, havia falta de evidências empíricas para o inter-relacionamento das diferentes parcelas que compõem os custos rodoviários. Consequentemente, foram iniciados em vários países em desenvolvimento (Quênia, Ilhas do Caribe, Brasil e Índia) estudos visando a obtenção de evidências empíricas que pudessem servir de base para o desenvolvimento teórico do modelo.

O estudo desenvolvido no Quênia, de 1971 a 1975, forneceu modelos de deterioração para pavimentos flexíveis sob condições de clima tropical e sub-tropical e para rodovias não-pavimentadas. Forneceu, também, a primeira relação quantitativa entre os custos de operação dos veículos e as condições da rodovia, mostrando a magnitude da economia que poderia ser conseguida com a adequada manutenção rodoviária. Os resultados do estudo realizado no Quênia permitiram o desenvolvimento do programa computacional RTIM2 (Road Transport Investment Model – TRRL).

Um estudo muito mais amplo foi conduzido no Brasil, de 1976 a 1981, com a participação de equipes técnicas brasileira e internacional, sob a coordenação do Prof. W. Ronald Hudson, da Universidade do Texas. No mesmo período, nas Ilhas Caribenhas de Barbados, São Vicente, Santa Lúcia e Dominica, foi desenvolvido um estudo dos custos operacionais sob condições extremas de terreno e traçado geométrico. Na Índia, de 1977 a 1982, foi desenvolvido um quarto estudo, restrito aos custos de operação dos veículos e das condições de congestionamento e acidentes que prevalecem na Índia.

A fase de conclusão constou da revisão de todas as pesquisas de campo realizadas. O esforço principal foi concentrado nas análises dos resultados obtidos no Brasil, visando produzir modelos para previsão dos custos de operação dos veículos e das velocidades de operação, da evolução da deterioração das rodovias e dos efeitos da manutenção e dos quantitativos para construção. A base empírico-mecanística desses modelos permite que eles sejam mais facilmente adaptados a condições diferentes daquelas para as quais eles foram desenvolvidos. Muitos dos modelos, particularmente os de deterioração rodoviária, foram validados com dados de diferentes países.

Os modelos resultantes foram incorporados à terceira versão do Programa HDM (HDM-III), lançada em 1987 (a versão para microcomputadores foi lançada em 1989). O HDM-III tem sido utilizado em aproximadamente 40 países em desenvolvimento para avaliações de projetos, desenvolvimento de programas rodoviários e planejamento em nível de rede. Tem sido, também, adaptado para utilização em diversos países industrializados (Austrália, Bélgica, Canadá, Finlândia, Nova Zelândia e Reino Unido).

A principal limitação do HDM-III é que o submodelo de deterioração da rodovia não inclui pavimentos rígidos, avaliando somente pavimentos asfálticos ou vias não-pavimentadas.

O Programa de Gerência de Pavimentos HDM-4 (Highway Development and Management Tools) é uma atualização do HDM-III. O desenvolvimento do HDM-4 foi coordenado pela ISOHDM (International Study of Highway Development and Management Tools), com participação dos seguintes centros de pesquisas:

- FINNRA (Finnish Road Administration): especificação das estratégias e programas de intervenções;
- FICEM (Federacion Interamericana Del Cemento): desenvolvimento dos modelos de deterioração e manutenção relacionados às vias de Concreto de Cimento Portland;
- The Highway Research Group (HRG), da Escola de Engenharia Civil da Universidade de Birmingham: desenvolvimento do programa computacional;
- Road Research Institute (IKRAM), na Malásia, em conjunto com a N.D. Lea International (NDLI): relação entre deterioração da via e custos dos usuários;
- Transport Research Laboratory (TRL), no Reino Unido: revisão e novos modelos de desempenho de pavimentos flexíveis;
- SNRA (Swedish National Road Administration): desenvolvimento de modelos de desempenho em climas frios, segurança da via e efeitos ambientais.

A documentação do HDM-4 é composta de cinco manuais:

- *Volume 1: Overview* - descreve sucintamente todo o sistema do HDM-4;
- *Volume 2: Applications Guide* - descreve exemplos típicos de diferentes tipos de análises;
- *Volume 3: Software User Guide* - descreve as ferramentas computacionais do HDM-4;

- *Volume 4: Analytical Framework and Model* - descreve a estrutura analítica e os objetivos do HDM-4;
- *Volume 5: A Guide to Calibration and Adaptation* - sugere métodos para calibrar e adaptar o HDM a condições locais existentes em diferentes países.

Em relação às versões anteriores, o HDM-4 difere por:

- Incluir uma extensa gama de tipos e estruturas de pavimento (inclusive pavimentos rígidos);
- Considerar pavimentos asfálticos em climas frios;
- Atualizar as características da frota de veículos;
- Considerar aspectos de segurança da estrada;
- Considerar efeitos ambientais (consumo de energia, barulho do tráfego e emissão de gases poluentes dos veículos);
- Considerar efeitos de congestionamento;
- Atualizar o programa computacional (versão para Windows).

A Federação Interamericana de Cimento (FICEM) foi a responsável pelo desenvolvimento dos estudos relativos à inclusão dos pavimentos rígidos na nova versão do programa, particularmente dos modelos de deterioração (RDME - Road Deterioration and Maintenance Effects), que permitem análises técnicas do desempenho de pavimentos rígidos a longo prazo em função das estratégias de manutenção ou reabilitação adotadas.

A inclusão de modelos de pavimentos de concreto no modelo HDM-4 permite que os custos e desempenhos de pavimentos flexíveis e rígidos sejam comparados através de um procedimento único e atualizado. Neste trabalho, portanto, será utilizado o programa HDM-4 para obtenção de estratégias de manutenção e reabilitação, dos custos de manutenção e reabilitação e dos custos de operação de veículos em pavimentos flexíveis e rígidos.

No HDM-4 as diferentes parcelas de custos são somadas ao longo do tempo e descontadas para a obtenção do valor presente líquido. Comparações podem, então, ser feitas, com base em outros critérios econômicos (taxa interna de retorno, relação benefício/custo, benefícios do primeiro ano etc.). A otimização econômica busca minimizar o custo total da modalidade rodoviária, conforme apresentado na Figura 2.

FIGURA 2 – Otimização dos Padrões de Construção e Manutenção de Rodovias visando a Minimização do Custo Total da Modalidade Rodoviária (FERNANDES JR., ODA, ZERBINI, 1999).

O HDM-4 compara estimativas de custos e faz avaliações econômicas de diferentes alternativas de construção e manutenção, incluindo diferentes estratégias de intervenções ao longo do tempo. Estima o custo total das diferentes opções de projeto e manutenção, ano a ano, descontando os custos futuros a diferentes taxas de desconto, de modo que o usuário possa procurar pela alternativa com o menor custo total descontado. O HDM-4 também permite a análise de sensibilidade dos resultados a mudanças dos parâmetros mais importantes (custos unitários, composição do tráfego, taxas de crescimento do tráfego, taxa de desconto, custos dos atrasos e custos dos acidentes, dentre outros).

O HDM-4 fornece um sistema para:

- Gerência de rodovias;
- Programação dos serviços de pavimentação;
- Estimativa dos recursos necessários;
- Alocação de orçamento;
- Previsão do desempenho da rede viária;
- Avaliação de projeto;
- Estudo de impactos de políticas.

O HDM-4 é utilizado para avaliar os aspectos técnicos e econômicos dos projetos de investimentos nas vias, podendo-se armazenar as características das redes viárias, a composição e as características do tráfego e os trabalhos que estão sendo executados ou virão a ser executados na via. Possibilita que os usuários substituam os modelos que são fornecidos por modelos próprios, pois suas equações podem ser facilmente calibradas e adaptadas às condições locais.

2.2.1. A Função do HDM-4 na Gerência de Rodovias

Antes de analisar as aplicações do programa HDM-4 é necessário analisar o processo de gerência de rodovias com relação às atividades de planejamento, programação e operação.

a) Planejamento: envolve a análise do sistema viário como um todo, visando o estabelecimento de estratégias de intervenção a médio e longo prazo sob vários orçamentos e cenários econômicos.

b) Programação: envolve a programação de despesas, com seleção das seções da rede viária que necessitam de manutenção, reabilitação ou reconstrução. Estima os gastos em cada ano, sob orçamentos definidos, para diferentes estratégias de M&R e para cada seção da via.

c) Operação: programação de trabalhos a serem executados, incluindo análises laboratoriais, verificação dos equipamentos e materiais que serão utilizados etc.

2.2.2. Aplicações do HDM-4

Há quatro áreas principais de aplicação do HDM-4:

a) Análise de Estratégias: visa estimar os recursos necessários a médio e longo prazo, para ampliação e manutenção da rede viária. O HDM-4 aplica o conceito de uma matriz de rede viária contendo categorias definidas de acordo com os atributos que mais influenciam o desempenho do pavimento e os custos dos usuários da via, sendo essa matriz definida em função dos fatores que mais afetam os custos de transportes no país. Uma matriz de rede viária típica é caracterizada por segmentos de rodovias definidos pelos seguintes parâmetros: classe da rodovia, tipo de pavimento (superfície), condição do pavimento, volume de tráfego, carregamento do tráfego e ambiente ou zona climática. Permite a previsão, a longo prazo, do desempenho da rede viária sob vários níveis orçamentários e a alocação ótima dos recursos.

- b) *Análise de Programas:*** prioriza os projetos de intervenção, em função dos padrões de manutenção e reabilitação e melhorias, definidos pelo organismo rodoviário. Permite a comparação dos custos totais sem nenhuma manutenção (ou com manutenção mínima) e com diferentes estratégias de manutenção (manutenção periódica, melhoria ou ampliação). A análise de programas lida com seções individuais, enquanto que a análise de estratégias agrupa todos os segmentos viários com características similares dentro das categorias da matriz viária.
- c) *Análise de Projetos:*** avaliação de um ou mais projetos ou opções de investimentos, durante um determinado período de vida em serviço. Pode ser usada para estimar a viabilidade econômica ou construtiva dos projetos mediante análise do desempenho dos pavimentos, dos efeitos da manutenção e das melhorias e dos custos dos usuários.
- d) *Pesquisa e Estudos de Programas:*** estuda as políticas de investimentos, como por exemplo, políticas de financiamento de vias coletoras versus vias principais; alocação de custos rodoviários; impactos das mudanças da política rodoviária sobre o consumo de energia; impactos dos limites de carga por eixo; normas de manutenção e reabilitação.

2.2.3. Módulos do HDM-4

As ferramentas de análise do HDM-4, citadas anteriormente, operam com dados definidos de acordo com os seguintes gerenciadores de dados:

- a) *Rede Viária:*** define as características físicas das seções viárias para analisá-las como rede ou sub-rede. Não há limite no número de redes viárias ou no número de seções de cada rede.
- b) *Frota de Veículo:*** define as características da frota de veículos que opera na rede viária analisada. Os dados da frota são utilizados para o cálculo das velocidades dos veículos, dos custos operacionais, dos custos de tempo de viagem e outros efeitos dos veículos. Veículos motorizados e não-motorizados podem ser incluídos e não há limite no número e tipos de veículos que podem ser especificados.

c) *Trabalhos na Via:* define os padrões de manutenção e reabilitação que serão aplicados em diferentes seções das vias, junto com seus custos unitários.

d) *Configuração do HDM:* define as opções de dados que serão utilizadas nas aplicações. Um conjunto de opções de dados é gerado quando o HDM-4 é instalado pela primeira vez. Os usuários devem modificar esses dados de acordo com as condições ambientais e as circunstâncias do meio ou local de análise.

O HDM-4 utiliza quatro conjuntos de modelos:

- RD – Road Deterioration (Deterioração da Via): prevê a deterioração do pavimento para vias com revestimentos de asfalto, concreto e não pavimentadas;
- WE – Works Effects (Efeitos dos Trabalhos): simula os efeitos dos trabalhos realizados nas vias sobre as condições do pavimento e determina os custos correspondentes;
- RUE – Road User Effects (Efeitos sobre os usuários): determina o custo de operação dos veículos, acidentes na via e tempo de viagem;
- SEE – Social Environment Effects (Efeitos Sociais e Ambientais): determina os efeitos dos veículos em termos de emissão de poluentes e consumo de energia.

2.2.4. Análise ao Longo do Tempo

O HDM-4 simula o desempenho dos pavimentos e os custos correspondentes durante o período de análise especificado pelo usuário. Faz análises econômicas de diferentes opções de investimentos, estima os custos para um grande número de alternativas (ano a ano), durante o período de análise definido pelo usuário, descontando os custos futuros. Simula, para cada seção, a condição da via e os recursos usados em cada alternativa de manutenção, assim como as velocidades dos veículos e os recursos físicos consumidos pela operação do veículo. Os benefícios relativos são calculados para diferentes alternativas, seguidos pelo valor presente e a taxa de retorno.

2.2.5. Dados de Entrada Necessários ao HDM-4

Os dados necessários para o HDM-4 são:

a) Rede viária:

- *Dados de entrada:* nome da seção, tipo de fluxo de tráfego, número de faixas, zona climática, classe da via, tipo de superfície (de asfalto, de concreto ou sem revestimento), tipo de pavimento (por exemplo, pavimento asfáltico com base granular), comprimento (km), largura da estrada (m), largura do acostamento (m), volume médio diário de veículos motorizados, volume médio diário de veículos não motorizados, direção do fluxo (por exemplo, duas direções);
- *Dados da geometria:* geometria básica, velocidade limite (km/h), tipo de drenagem;
- *Dados do Pavimento:* superfície (tipo de material, espessura), trabalhos anteriores (última reconstrução, última reabilitação, último recapeamento, última manutenção preventiva), resistência (número estrutural e CBR do subleito) e base da via (espessura da base e módulo resiliente);
- *Condição do Pavimento no fim do ano especificado:* Irregularidade (IRI), área total de trincas (%), número de painéis, profundidade média da trilha de roda (mm) etc.

b) Frota de veículos:

- *Categoria dos Veículos Motorizados:* motocicleta, veículos leves (carros para passageiro: pequeno, médio e grande), veículos utilitários, caminhão leve, caminhão médio, caminhão pesado, caminhão articulado, microônibus, ônibus leve, ônibus médio e ônibus pesado.
- *Categoria dos Veículos Não Motorizados:* pedestre, bicicleta e carroça.

c) Características dos veículos:

- *Características básicas:* número de rodas e de eixos, pneus (tipo de pneu, número base de recauchutagem), utilização dos veículos (número de quilômetros rodados por ano, horas de trabalho, vida média, porcentagem de uso, número de passageiros), carregamento (peso de operação);
- *Custos Unitários:* custo do veículo novo, da troca de pneus, do combustível, do óleo lubrificante, da mão-de-obra para manutenção, gastos gerais anuais, juros anuais;
- *Valor do tempo:* passageiro em serviço, passageiro a passeio, custo da carga.

d) Atividades de Manutenção e Reabilitação:

- Cada item é definido em função da classe da superfície da via e do tipo de operação.
- Os *padrões de melhorias* definem os trabalhos de melhoramentos a serem realizados quando as condições da rede viária estiverem abaixo de um certo nível estipulado. Cada padrão de melhoria é definido em termos de classe da superfície da via no qual se aplica um nível de intervenção, do tipo de melhoria, dos custos e duração dos trabalhos e do efeito resultante sobre o pavimento em termos de condições, geometria, resistência etc.

2.2.6. Dados de Saída do HDM-4

Os dados de saída (resultados) produzidos pelo HDM-4 são:

- Indicadores de eficiência econômica de projetos individuais das vias;
- Programa de trabalhos para vários anos (produzido depois da priorização de vários projetos);
- Programação dos serviços de manutenção e/ou melhoria: resultado das previsões feitas para longo prazo a respeito do desempenho da rede viária;
- Quantificação do consumo de combustível, lubrificante e pneus, dos gastos com manutenção e reabilitação, dos custos fixos, da velocidade, do tempo de viagem, dos custos dos usuários da via;
- Efeitos ambientais e sociais: níveis de emissões de gases, energia utilizada e número de acidentes;
- Análise econômica: custos e benefícios, incluindo benefícios exógenos;
- Cálculo do valor presente líquido e taxa interna de retorno por seção.

Assim, é a partir da utilização dos conceitos de Sistemas de Gerência de Pavimentos e do programa HDM-4 que se obtém, neste trabalho, os custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos.

CAPÍTULO 3 – CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS

Considera-se pavimento o conjunto de camadas de materiais diversos que se constrói sobre o subleito (solo de fundação) de uma via, que tem como função resistir e distribuir os esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego e do intemperismo (dando durabilidade à superfície de rolamento) e melhorar as condições de rolamento dos veículos quanto ao conforto, segurança e economia. De acordo com Haas, Hudson e Zaniewski (1994), faz-se distinção de apenas dois tipos básicos de pavimentos: flexíveis, que normalmente apresentam uma mistura asfáltica como camada de revestimento, e rígidos, que têm como principal camada estrutural o concreto de cimento Portland.

Em função do tipo de pavimento tem-se uma variação muito grande dos custos de construção. Os pavimentos rígidos e flexíveis, por serem muito diferentes conceitualmente, possuem estruturas em camadas e custos de construção diferentes. Enquanto o pavimento flexível usa a concepção de distribuir as cargas por múltiplas camadas de materiais variados, um pavimento rígido atua com uma única camada (placa) apoiada sobre uma “fundação elástica” (subleito) (MOTTA e RABELLO, 1994). O pavimento de concreto, devido à sua rigidez e elevado módulo de elasticidade, possui uma área de distribuição de carga muito maior que a do pavimento flexível, pois a maior parte da capacidade estrutural é suprida pela própria placa de concreto (Figura 3). Assim, variações nas propriedades do subleito pouco influenciam sua capacidade estrutural.

Para a construção de um pavimento é necessário que se executem serviços preliminares (sondagens, levantamento topográfico, locações etc.), terraplenagem (limpeza do terreno, escavação, transporte de material, compactação etc.), obras de arte, obras de contenção geotécnica, pavimentação e serviços complementares (implantação de sinalização, colocação de gramas etc.). Nos custos de construção de um pavimento,

seja ele flexível ou rígido, estão incluídos os custos de todos os serviços citados anteriormente. Os custos de construção de pavimentos estão diretamente relacionados ao tipo de pavimento, ao método de dimensionamento, aos materiais que constituem as camadas, ao volume de tráfego e ao tipo de subleito. Para o cálculo dos custos de construção dos pavimentos são utilizados, geralmente, os custos unitários de Tabelas de Preços Unitários de organismos rodoviários brasileiros.

FIGURA 3 - Diferença de distribuição de carga entre pavimentos flexíveis e rígidos.

3.1. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os pavimentos flexíveis possuem várias camadas compostas por diferentes materiais (Figura 4). Dependendo da capacidade de suporte do subleito e das cargas do tráfego, algumas camadas podem ser suprimidas. Estes pavimentos possuem a seguinte estrutura de camadas:

- *Revestimento* (Capa de Rolamento) - camada de concreto asfáltico, tanto quanto possível impermeável, destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, melhorar as condições de rolamento no que se refere ao conforto e segurança e transmitir, de forma atenuada, as ações do tráfego às camadas inferiores;
- *Base* - camada destinada a receber e distribuir os esforços oriundos do tráfego ao subleito, acima da qual se constrói o revestimento;

- *Sub-base* - camada complementar à base, quando é tecnicamente indicada uma camada entre a base e o subleito;
- *Reforço do Subleito* - camada construída acima da regularização, com características técnicas superiores a ela e inferiores à camada que irá sobrepô-la. Pode ser considerada uma camada de complementação do subleito ou uma camada complementar à sub-base;
- *Regularização do Subleito* - camada de espessura variável, construída sobre o subleito, destinada a conformar o subleito com o projeto. Deve ser executada sempre em aterro, em condições construtivas controladas;
- *Subleito* - não é componente do pavimento, mas o terreno de fundação sobre o qual se implanta o pavimento.

FIGURA 4 – Camadas componentes de um pavimento flexível.

Neste trabalho, serão utilizados os seguintes materiais para compor as camadas dos pavimentos flexíveis:

- Sub-base e base: solo-brita (material muito utilizado no Estado de São Paulo);
- Imprimadura impermeabilizante (finalidade de impermeabilizar a base): asfalto diluído tipo CM-30;
- Pintura de ligação (finalidade de promover a ligação da base com o revestimento): emulsão asfáltica catiônica tipo RR-1C;
- Revestimento: concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ (produto resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado mineral graduado, material de enchimento (fíler) e material betuminoso, lançado e compactado a quente).

3.1.1. Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

O dimensionamento de pavimentos flexíveis visa determinar as espessuras das camadas do pavimento, para um determinado período de projeto, cujas camadas, como um todo, têm que ser capaz de resistir aos esforços provenientes das cargas repetidas do tráfego e às condições climáticas que agem sobre o pavimento.

O dimensionamento dos pavimentos flexíveis, neste trabalho, será baseado nos métodos utilizados pela American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 1993) e pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1981).

a) Método de Dimensionamento da AASHTO (1993)

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO, de 1993, é uma atualização do método anteriormente proposto em 1986. A base do método é empírica, resultante de um grande experimento de campo que foi a pista experimental da AASHO, concebida e executada na década de 50 em Ottawa, Illinois, e que foi um marco na história da pavimentação. Nela surgiu o conceito de desempenho (habilidade de um pavimento servir satisfatoriamente ao tráfego ao longo de um período de tempo) e serventia (habilidade de um pavimento servir ao tráfego para o qual foi projetado, medida numa certa data). Constituiu-se de um experimento em verdadeira grandeza onde foram construídas seções de pavimento com diferentes espessuras de camadas, com objetivo de definir uma relação entre a repetição da carga e a perda de serventia, para diversas estruturas.

Os parâmetros necessários para o dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo Método da AASHTO (1993) são os seguintes:

- W_{18} : número de solicitações equivalentes do eixo padrão (eixo simples, rodas duplas, 80kN);
- R : nível de confiabilidade de projeto;
- Z_R : desvio padrão normal;
- S_θ : desvio padrão combinado;
- M_R : módulo resiliente do subleito (MPa);
- ΔPSI : diferença entre o índice de serventia inicial e o índice de serventia final de projeto.

a.1) Determinação do Número de solicitações equivalentes do eixo-padrão (W_{18})

O cálculo do número de solicitações equivalentes, que transforma o tráfego misto no número de passadas do eixo-padrão de 80 kN (18.000 lbs, 18 kips ou 8,2 tf) é feito através de fatores de equivalência de carga, que dependem do tipo de eixo (simples, tandem duplo ou tandem triplo), do número estrutural do pavimento (1 a 6), do valor terminal de serventia adotado no projeto e da carga por eixo (1 a 40 t). O fator de equivalência de carga deve multiplicar o número de eixos de um certo tipo, com uma certa carga, para se obter o número de aplicações do eixo simples de 80 kN, que teria o mesmo efeito no desempenho do pavimento.

O somatório de todos os produtos, para todos os veículos previstos durante a vida útil do pavimento, conduz à previsão do tráfego W_{18} . O fator de equivalência de carga representa a razão entre o número de repetições de qualquer carga por eixo em cada configuração, necessário para causar a mesma redução do Índice de Serventia (PSI, Present Serviceability Index) que uma aplicação do eixo padrão.

Como o cálculo do W_{18} é função do Número Estrutural (SN), é necessário, primeiramente, adotar um valor de SN para selecionar os fatores de equivalência adequados. Feito o dimensionamento, deve-se comparar o SN adotado com o que foi realmente obtido com a estrutura final dimensionada. Havendo diferença significativa, refazem-se os cálculos. Em geral, como primeira aproximação, recomenda-se adotar $SN = 5$.

a.2) Determinação do Nível de Confiabilidade de Projeto (R)

O nível de confiabilidade de projeto (R) é a probabilidade de que o pavimento dimensionado tenha um comportamento real igual ou melhor que o previsto durante a vida útil adotada. A AASHTO (1993) recomenda alguns valores de R para várias classificações funcionais de estradas, que variam de 99,9 para rodovias com elevado volume de tráfego a 50,0 para rodovias com baixo volume de tráfego.

a.3) Determinação do Desvio Padrão Normal (Z_R)

O valor do desvio padrão normal (Z_R) é adotado em função do valor do nível de confiabilidade (R), variando de 0,00 (para $R = 50,0$) até $-3,75$ (para $R = 99,9$).

a.4) Determinação do Desvio Padrão Combinado (S_0)

O valor do desvio padrão combinado para pavimentos flexíveis varia de 0,40 a 0,50, sendo recomendado pela AASHTO que seja utilizado desvio padrão igual a 0,49 para o caso onde é considerada uma variação no tráfego futuro projetado e de 0,44 para o caso onde não é considerada uma variação no tráfego futuro projetado.

a.5) Determinação do Módulo de Resiliência (M_R)

O módulo de resiliência (M_R) é adotado pela AASHTO (1993) como uma medida da resposta elástica do subleito às cargas de tráfego, levando em consideração algumas características não lineares do mesmo. O manual de dimensionamento da AASHTO (1993) cita a correlação do módulo de resiliência com o valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), segundo Heukelom e Klomp (1962), satisfatória para solos de granulação fina com $CBR \leq 10\%$:

$$M_R(MPa) = 10 \cdot CBR \quad (1)$$

a.6) Determinação da Diferença entre Índice de Serventia Inicial e Final de Projeto (ΔPSI)

A diferença ΔPSI representa a perda de serventia prevista para ocorrer entre os valores inicial e final. O PSI (Present Serviceability Index) mede o valor de serventia no instante da avaliação. No caso da pista experimental da AASHO, foi obtido um p_0 ou $PSI_{inicial}$ de 4,2, sendo os experimentos levados até a condição p_t ou PSI_{final} de 1,5. Atualmente, considera-se que o valor terminal de 2,5 é o mais adequado para ser adotado para estradas com elevado volume de tráfego e o valor terminal de 2,0 para estradas com baixo volume de tráfego.

O fato de se aceitar um valor terminal maior ou menor está ligado ao custo sob dois aspectos: o primeiro é o do usuário, já que quanto menor a serventia (em termos de *PSI*) maior os custos de operação dos veículos; o segundo é o do próprio órgão responsável pelas rodovias, que terá que investir mais no reforço ou reconstrução dos trechos quanto menor for o nível de serventia ao final da vida útil do pavimento. Uma rodovia com *PSI* igual a zero seria impossível de ser transitada, enquanto um *PSI* igual a 5 indicaria uma superfície perfeita, o que também, na prática, não se obtém por melhores que sejam as técnicas construtivas. A partir do momento que os valores dos índices de serventia final (p_t) e inicial (p_0) são estabelecidos, obtém-se:

$$\Delta PSI = p_0 - p_t \quad (2)$$

a. 7) Determinação do Número Estrutural do Pavimento (SN)

O número estrutural SN tem por objetivo indicar a resistência estrutural do pavimento. Trata-se de uma ponderação das espessuras das camadas através de "pesos" que representam o coeficiente estrutural dos diversos materiais, englobando uma parcela de avaliação de eficiência do sistema de drenagem.

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (3)$$

sendo:

a_i - coeficiente estrutural da i -ésima camada (revestimento, base, sub-base);

D_i - espessura em polegadas da i -ésima camada;

m_2 - coeficiente de drenagem da base;

m_3 - coeficiente de drenagem da sub-base.

Os coeficientes estruturais se correlacionam com os módulos resilientes das camadas:

- *Revestimento de Concreto Asfáltico* (Figura 5);
- *Base Granular* (Figura 6);
- *Sub-Base Granular* (Figura 7).

FIGURA 5 – Variação do coeficiente estrutural da camada (a_1) para revestimento de concreto asfáltico, relacionado ao módulo de elasticidade (resiliente) do concreto asfáltico (AASHTO, 1993).

A equação para dimensionamento de pavimentos flexíveis é:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log_{10}(M_R) - 8,07 \quad (4)$$

- (1) Escala derivada de correlações de Illinois.
 (2) Escala derivada de correlações obtidas da Califórnia, do Novo México e de Wyoming.
 (3) Escala derivada de correlações obtidas do Texas.
 (4) Escala derivada do projeto NCHRP.

FIGURA 6 – Variação do coeficiente estrutural da camada de base granular (a_2) com vários parâmetros relacionados à base (adaptado da AASHTO, 1993).

A Figura 8 mostra o procedimento usual de cálculo das espessuras das diversas camadas. Este procedimento deve ser usado para materiais de base e sub-base com $M_R \leq 270$ MPa. Materiais que apresentem módulos superiores devem ser empregados com as espessuras mínimas dadas na Tabela 1 (AASHTO, 1993).

- (1) Escala derivada de correlações de Illinois.
 (2) Escala derivada de correlações obtidas do Instituto de Asfalto, Califórnia, do Novo México e de Wyoming.
 (3) Escala derivada de correlações obtidas do Texas.
 (4) Escala derivada do projeto NCHRP.

FIGURA 7 – Variação do coeficiente estrutural da camada de sub-base granular (a_3) com vários parâmetros relacionados à sub-base (adaptado da AASHTO, 1993).

FIGURA 8 - Procedimento para determinar as espessuras das camadas pela AASHTO (1993).

Portanto, sendo o cálculo feito por camadas, tem-se:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1} \rightarrow SN_1^* = a_1 \cdot D_1^* \geq SN_1 \quad (5)$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2} \rightarrow SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2 \quad (6)$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3^* - (SN_1^* - SN_2^*)}{a_3 \cdot m_3} \quad (7)$$

OBS₁: a, D, m e SN têm valores mínimos;

OBS₂: o asterisco em D ou SN indica que representa o valor usado no momento, que pode ser igual ou maior que o valor necessário.

TABELA 1 – Espessuras mínimas (construtivas) recomendadas pela AASHTO (1993) para materiais com $M_R > 270 \text{ MPa}$.

Tráfego (W_{18})	Concreto Asfáltico (cm)	Base Granular (cm)
< 50.000	2,5	10,0
50.001 – 150.000	5,0	10,0
150.001 – 500.000	6,5	10,0
500.001 – 2.000.000	7,5	15,0
2.000.001 – 7.000.000	9,0	15,0
> 7.000.000	10,0	15,0

b) Método de Dimensionamento do DNER (1981)

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER é baseado na experiência do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América e em algumas conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHO.

Os parâmetros necessários para o dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo Método do DNER (1981) são os seguintes:

- N: número equivalente de operações do eixo simples padrão (80 kN) durante o período de projeto;
- CBR_i: valor do CBR (Índice de Suporte Califórnia) das camadas do pavimento (base, sub-base, reforço e subleito);
- Espessura mínima de revestimento betuminoso.

b.1) Tráfego

Pelo método de dimensionamento do DNER (1981) as espessuras das camadas do pavimento são calculadas em função do CBR, de modo a suportarem um tráfego de projeto N (número de operações de um eixo-padrão de projeto equivalente ao número de operações do tráfego real da via). O eixo-padrão de projeto é considerado como sendo um eixo com rodas duplas com uma carga total de 80 kN (8,2 tf).

O tráfego de projeto (N) é calculado a partir do tráfego real de veículos, através da seguinte expressão:

$$N = V_t \cdot FV \cdot FR \rightarrow FV = FE \cdot FC \rightarrow \therefore N = V_t \cdot FE \cdot FC \cdot FR \quad (8)$$

onde:

N = tráfego de projeto (número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto);

V_t = volume total de tráfego, no período de projeto, em um sentido ou faixa;

FV = fator de veículos;

FR = fator climático regional. É utilizado para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano. No Brasil, é usual adotar $FR = 1$;

FE = fator de eixos;

FC = fator de cargas.

Admitindo-se uma taxa de crescimento anual (t , %), em progressão *aritmética*, o volume total de tráfego, V_t , durante o período de projeto (P) é dado por:

$$V_m = \frac{V_0 \cdot [2 + (P-1) \cdot (t/100)]}{2} \quad (9)$$

$$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m \quad (10)$$

Admitindo-se uma taxa de crescimento anual (t , %), em progressão *geométrica*, o volume total de tráfego, V_t , durante o período de projeto (P) é dado por:

$$V_t = \frac{365 \cdot V_0 \cdot \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{\frac{t}{100}} \quad (11)$$

onde:

V_m = volume médio diário de tráfego, em um sentido ou faixa;

V_0 = volume médio diário de tráfego, em um sentido ou faixa, no primeiro ano em que o pavimento entrar em serviço;

P = período de projeto, em anos;

t = taxa de crescimento anual, em porcentagem.

Os valores de FE e FC são calculados com base no conceito de equivalência. O fator de eixos, FE , é um número que multiplicado pela quantidade de veículos dá o número de eixos operacionais operantes no período de projeto. O fator de cargas, FC , é um número que multiplicado pela quantidade de operações de eixos, durante o período de projeto, dá o número de operações equivalentes do eixo-padrão.

b.2) Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso

Na Tabela 2 são apresentados os valores mínimos recomendados pelo DNER (1981) para a espessura de revestimento betuminoso em função do tráfego de projeto (N).

TABELA 2 – Espessura mínima de revestimento betuminoso (DNER,1981).

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0cm de espessura
$5 \times 10^6 \leq N < 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5cm de espessura

b.3) Dimensionamento

O dimensionamento é feito com base no valor da espessura de uma camada granular de $CBR = 100\%$. Para o dimensionamento é necessária a utilização do ábaco de dimensionamento do DNER (Figura 9) para a determinação da espessura total do pavimento, fornecida em termos de material com $k = 1,00$ (coeficiente estrutural tabelado pelo DNER).

A Figura 10 mostra a simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento, sendo que H_m designa, de modo geral, a espessura total de pavimento necessária para proteger um material com $CBR = m$.

Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20, a espessura de pavimento necessária para protegê-la é determinada como se este valor fosse 20 e, por esta razão, usam-se, sempre, os símbolos H_{20} e h_{20} para designar as espessuras de pavimento acima da sub-base e a espessura da sub-base, respectivamente.

FIGURA 9 - Ábaco de dimensionamento do DNER para pavimentos flexíveis (adaptado do DNER, 1981).

FIGURA 10 – Simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento pelo método do DNER (DNER, 1981).

Uma vez determinadas as espessuras H_m , H_n , H_{20} , pelo gráfico da Figura 9, e R pela Tabela 2, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B \geq H_{20} \quad (12)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_{20} \cdot k_S \geq H_n \quad (13)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_{20} \cdot k_S + h_n \cdot k_{Ref} \geq H_m \quad (14)$$

onde:

k_R : coeficiente estrutural do revestimento;

k_B : coeficiente estrutural da base;

k_S : coeficiente estrutural da sub-base;

k_{Ref} : coeficiente estrutural do reforço;

B : espessura da base;

R : espessura do revestimento.

Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40 e para $N \leq 10^6$, admite-se substituir na equação (12) H_{20} por $0,2 \times H_{20}$. Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na equação (12), H_{20} por $1,2 \times H_{20}$.

3.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS

O pavimento rígido é um tipo de pavimento que, por causa de sua rigidez elevada, proporcionada pelo alto módulo de elasticidade da camada de revestimento (placa de concreto de cimento Portland) em relação ao do subleito e/ou da sub-base, tende a distribuir a carga aplicada em uma área extensa de solo e não acompanha as deformações deste material. Assim, é de grande importância, no projeto de um pavimento rígido, a resistência do próprio concreto (MOTTA e RABELLO, 1994).

Embora o pavimento de concreto não requeira altos índices de suporte da fundação para seu bom funcionamento, este se beneficia largamente da adoção de sub-bases estáveis e não bombeáveis, apesar delas pouco contribuírem para a distribuição de cargas. Assim, é prática internacionalmente consagrada a utilização de uma camada delgada de sub-base, com a função principal de proporcionar suporte uniforme e de evitar o bombeamento dos finos do subleito.

Assim como os produtores de asfalto defendem os pavimentos flexíveis, os representantes da indústria de cimento ressaltam os pontos positivos dos pavimentos rígidos. Por exemplo, algumas vantagens dos pavimentos rígidos, em relação aos pavimentos flexíveis, listadas pela ABCP (1991) são:

- Maior durabilidade: ao longo do tempo, devido às propriedades estruturais do concreto, é menor a incidência de defeitos que reduzem o conforto e a segurança e podem conduzir o pavimento à destruição total ou parcial;
- Menor consumo de combustível devido à superfície rígida, indeformável e estável do concreto, que cria menos resistência ao veículo, beneficiando o seu rolamento. Traz benefícios ao meio ambiente, uma vez que reduz a emissão de gases dos veículos;
- Melhor atendimento ao usuário: as vias de concreto sofrem interrupções de tráfego menos freqüentes ao longo do tempo e, desta maneira, o usuário sofre menos transtornos;
- Consumo menor de iluminação nas vias devido à superfície clara.

Os pavimentos rígidos são classificados da seguinte maneira (AASHTO, 1993; ODOKI & KERALI, 2000):

1. *Pavimento de concreto simples sem barras de transferência de carga (Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) without Load Transfer Dowels)*: pavimento com placas curtas (3 a 6 metros) sem armadura, não dispondo de espécie alguma de aço e tendo a entrosagem dos agregados como única maneira de transferência de carga entre as placas. O espaçamento entre juntas transversais (ou comprimento da placa) é tal que as deformações induzidas por mudanças de temperatura e/ou teor de umidade não produzem fissuras entre as juntas. O espaçamento máximo entre juntas é limitado para minimizar a movimentação da placa e maximizar a transferência de carga. É utilizado em vias de baixo volume de tráfego e geralmente é executado sobre uma sub-base tratada com cimento (Figura 11);

FIGURA 11- Pavimento de Concreto Simples (adaptada da ABCP, 1998b).

2. *Pavimento de concreto simples com barras de transferência de carga (Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) with Load Transfer Dowels)*: dotado de um sistema artificial de transferência de carga formado por barras curtas de aço liso, postadas na meia-seção das juntas transversais para ajudar na transferência de carga. O espaçamento entre juntas transversais (ou comprimento da placa) é tal que as deformações induzidas por mudanças de temperatura e/ou teor de umidade não produzem fissuras entre as juntas. O espaçamento máximo entre juntas é limitado para minimizar a movimentação da placa e maximizar a transferência de carga. Os valores usuais de comprimento de placa são de até 9,0 metros (Figura 12);

FIGURA 12- Pavimento de Concreto Simples com barras de transferência (adaptada da ABCP, 1998b).

3. *Pavimento de concreto com armadura distribuída descontínua (Jointed Reinforced Concrete Pavement - JRCP)*. Este tipo de pavimento possui armadura antes de cada junta transversal; sem função estrutural, apenas para manter fortemente ligadas as fissuras que acaso se formem entre duas juntas transversais seguidas, pois as placas são de grande comprimento (até 30 metros, sendo mais comuns de 12,0 a 15,0 metros) (Figura 13);

FIGURA 13- Pavimento de concreto com armadura distribuída descontínua.

4. *Pavimento de concreto continuamente armado (CRCP - Continuously Reinforced Concrete Pavement)*. Este tipo de pavimento possui armadura longitudinal em todo seu comprimento (armadura contínua), não possuindo, portanto, juntas transversais de retração (só possui juntas de construção). O objetivo da armadura longitudinal é controlar as fissuras que são produzidas no pavimento devido à retração no concreto. O comprimento das placas é igual à extensão diária construída (Figura 14).

FIGURA 14 - Pavimento de Concreto Continuamente Armado (adaptada da ABCP, 1998b).

3.2.1. Execução de Pavimentos Rígidos

Um pavimento rígido é uma estrutura sujeita a ações mecânicas de grande intensidade, causadas pelas cargas do tráfego e também pelos efeitos ambientais, resultantes das variações de temperatura e umidade do meio, as quais exigem elevadas resistências à tração na flexão e à compressão simples. Além disso, o pavimento de concreto tem proporção entre área e volume muito grande e condições peculiares de concretagem, que requerem, geralmente, um tipo de concreto *duro*, de consistência *seca*, mas com um nível mínimo de trabalhabilidade (propriedade que lhe permite ser transportado, lançado, distribuído, adensado e acabado) que possibilite a obtenção, em função do tipo de equipamento empregado, de uma camada homogênea, densa e de grande impermeabilidade.

Portanto, o concreto empregado em pavimentação deve ser dosado exclusivamente por método experimental, sempre considerando os seguintes requisitos básicos (ABCP, 1989):

- Alta resistência mecânica;
- Baixa relação água/cimento (a/c);
- Consumo mínimo unitário de cimento;
- Limitação da dimensão máxima característica do agregado;
- Consistência seca;
- Trabalhabilidade.

Sobre esses requisitos básicos, a ABCP (1989) faz extensas considerações. Indica, por exemplo, que um pavimento rígido só deve ser aberto ao tráfego quando sua resistência efetiva for igual, no mínimo, à resistência característica indicada no dimensionamento ($f_{dM,k}$), sendo possível fazê-lo antes desde que sejam verificados os possíveis efeitos que o carregamento precoce possa trazer à sanidade estrutural e, por conseqüência, à durabilidade do pavimento. Quando da necessidade de antecipação do uso do pavimento há, ainda, meios artificiais de garantir-lhe maior resistência inicial, como o emprego de cimentos especiais, de aditivos apropriados e de procedimentos de cura acelerada.

A relação água/cimento (a/c) deve ser a mais baixa possível, para produzir um concreto de consistência e trabalhabilidade compatíveis com o tipo e capacidade de produção do equipamento de construção, de modo a apresentar resistência capaz de assegurar a durabilidade da estrutura, consideradas as condições de exposição e o período de projeto.

A consistência de um concreto simples de pavimentação deve ser seca, compatível com o elevado teor de agregado gráudo na massa. Em concretos correntes de edificações, a medida de consistência faz-se pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test), mas no caso dos pavimentos aplicam-se melhor os métodos de ensaios dinâmicos, capazes de detectar com maior precisão pequenas variações na consistência (por exemplo, mesa de Graf e fluidímetro de Lesage). Recomenda-se que o valor de abatimento máximo seja fixado de acordo com o equipamento de construção do pavimento (reduzido = 5 ± 1 cm; formas deslizantes = 2 ± 1 cm).

A trabalhabilidade do concreto depende da dimensão máxima característica do agregado gráudo, do teor de argamassa, do consumo de cimento e da consistência do concreto, fixados previamente no projeto, nas especificações ou no método de dosagem. Estabelecidos esses dados, basta o ajuste da trabalhabilidade aos padrões desejados quando da verificação experimental da dosagem, pela observação da massa fresca, cujo aspecto e plasticidade orientarão as eventuais modificações no teor de argamassa e na relação a/c.

Portanto, de acordo com a ABCP (1998b), os fatores que condicionam a consistência do concreto são:

- Quantidade de água no traço (litros/m³);
- Composição do traço;
- Granulometria e morfologia do agregado;
- Aditivos;
- Condições atmosféricas.

a) Fissuras

As fissuras transversais e longitudinais, nos pavimentos de concreto de cimento Portland, são provocadas pelas variações volumétricas do concreto e pela combinação dos efeitos do empenamento restringido das placas e das solicitações do tráfego. As fissuras influem na durabilidade e no aspecto estético da superfície de rolamento do pavimento.

Sob a ação do tráfego e das condições ambientais, tendem a aumentar de tamanho e causar a deterioração das bordas, diminuindo a qualidade da superfície de rolamento e a capacidade estrutural do concreto. O aparecimento de fissuras faz com que ocorra um aumento das despesas de conservação e uma diminuição da vida útil do pavimento. As fissuras podem permitir também a infiltração de água e de materiais incompressíveis, prejudicando a uniformidade do suporte através de bombeamento e provocando danosas concentrações de tensões de compressão ao longo do bordo transversal.

a.1) Dispositivos de Controle das Fissuras

Existem dois dispositivos de controle das fissuras nos pavimentos de concreto:

- Armadura distribuída, sem função estrutural - é empregada apenas para manter as faces das fissuras fortemente ligadas, impedindo sua separação;
- Seções artificialmente enfraquecidas - são seções espaçadas de modo a forçar a ocorrência das fissuras em locais previamente determinados. Este tipo de dispositivo caracteriza o pavimento de concreto com juntas (pavimento de concreto simples).

a.2) Mecanismo do Aparecimento de Fissuras nos Pavimentos de Concreto

• *Fissuras Transversais*

As fissuras transversais têm como causa básica a retração do concreto nas primeiras horas após o término das operações de construção do pavimento. Durante o processo de endurecimento ocorrem as reações de hidratação, que consomem uma pequena parcela da água de mistura do concreto. A água que está em excesso é eliminada da massa, principalmente pela evaporação, levando a uma redução de volume em relação ao volume inicial do concreto. A diminuição da temperatura do concreto já endurecido, em relação à temperatura provocada na massa pelo calor desenvolvido durante a hidratação do cimento, também é um fator de redução do volume de concreto.

Essa retração volumétrica conduz à retração linear, propiciando o surgimento das fissuras transversais, conforme é mostrado esquematicamente na Figura 15. Têm grande importância no processo de retração do concreto o tipo de cimento, o tipo de agregado e as características ambientais da região.

FIGURA 15 - Aspecto superficial do pavimento de concreto após a ocorrência de fissuras transversais (sem juntas transversais) (ABCP, 1998b).

• *Fissuras Longitudinais*

O aparecimento de fissuras longitudinais é função das tensões de tração provenientes da restrição feita ao empenamento natural da placa, pelo peso próprio do concreto e pelo atrito da placa com o subleito (ou sub-base).

O empenamento de uma placa de concreto é um efeito de curvatura produzido pelas diferenças de temperatura e de umidade entre as faces superior e inferior da placa. Durante o dia, o topo do pavimento é mais quente do que a face inferior, tendendo a placa a expandir-se na parte de cima e curvar ou empenar as bordas para baixo (Figura 16.a). Essa tendência é restringida pelas reações de atrito com a camada subjacente, produzindo, então, compressão no topo e tração na face inferior da placa (Figura 16.b).

À noite ocorre o inverso, o fundo da placa perde calor mais lentamente do que o topo, resultando na contração deste, por estar mais frio, enquanto a face inferior se expande (Figura 16.c). Tais ações são resistidas pelo peso próprio do concreto e por eventuais sollicitações do tráfego (Figura 16.d).

FIGURA 16 - Empenamento teórico diurno e noturno de pavimento rígido (adaptada da ABCP, 1998b).

Considerando-se as tensões devidas ao empenamento, tem-se que pavimentos rígidos carentes de juntas longitudinais trincam mais facilmente devido às tensões de tração oriundas da restrição feita ao empenamento natural da placa pelo peso próprio do concreto e pelo atrito da placa com a sub-base ou subleito.

O aspecto esquemático da superfície de um pavimento de concreto sem juntas, após alguns dias de acabado, é mostrado na Figura 17.

FIGURA 17 - Aspecto superficial de pavimento de concreto sem juntas, após a ocorrência de fissuras transversais e longitudinais (ABCP, 1998b).

b) Juntas em Pavimentos Rígidos

Segundo Basílio (1971), a execução de juntas é de fundamental importância para evitar que o pavimento trinque aleatoriamente, servindo também para assegurar a transmissão de esforços de uma placa para outra. O uso de juntas produz seções enfraquecidas, de modo a forçar a ocorrência das fissuras nos locais previamente determinados.

A distribuição das placas e o detalhamento das juntas devem atender a algumas recomendações básicas:

- As juntas devem ser concordantes quanto à posição (por exemplo, paralelas ao eixo), mesmo que não sejam quanto ao tipo (por exemplo, com e sem barras de transferência);
- Deve-se evitar que a superfície das placas de formato irregular contenha um ângulo agudo inferior a 80°.

Os principais tipos de juntas em pavimentos rígidos apresentados pela ABCP (1998b) são:

- Juntas Transversais de Retração;
- Juntas Longitudinais de Articulação;
- Juntas Longitudinais de Articulação com Barras de Ligação;
- Juntas de Expansão;
- Juntas de Retração.

b.1) Juntas Transversais

As juntas transversais são executadas perpendicularmente ao eixo longitudinal do pavimento (no sentido da largura da placa de concreto) e são subdivididas em:

- *de retração (ou contração):* têm a função de controlar as fissuras resultantes da retração volumétrica do concreto nas primeiras horas após o término da construção do pavimento. Cria-se uma seção enfraquecida na placa através de uma ranhura feita na superfície da mesma após o endurecimento inicial, com o emprego de uma serra de disco de diamante (Figura 18.a). Sua profundidade varia de 1/4 a 1/6 da espessura da placa, com um mínimo de 4cm, devendo sua abertura ser de no mínimo 3mm (valor usual igual a 6mm). O espaçamento deve atender às necessidades de controle não só das trincas devido à variação inicial de volume como das adicionais de empenamento. Para determinação do espaçamento deve-se levar em conta o tipo de agregado graúdo empregado no concreto (espaçamento menor para seixo rolado do que para agregado britado), as condições ambientais da região (espaçamento menor em regiões com grandes variações de temperatura ou umidade), o atrito entre a placa e a camada subjacente (menor espaçamento quanto maior o atrito) e o tipo do tráfego. No Brasil, o espaçamento comumente adotado é 6m;
- *de retração com barras de transferência:* têm a função de controlar as fissuras devido à retração do concreto e de propiciar uma transferência de carga de uma placa para outra através da junta (Figura 18.b). A adoção deste tipo de junta é função do tráfego de projeto e da magnitude das cargas solicitantes. O tráfego pesado, juntamente com a desuniformidade do suporte, pode provocar deslocamento vertical entre placas contíguas, caracterizando uma situação inicial de desconforto para o usuário e a ruína da superfície de rolamento na junta. Uma diminuição artificial da carga é possibilitada através da colocação de barras de aço lisas, com metade do seu comprimento pintada e engraxada para não oxidar e permitir a movimentação quando da contração ou expansão, em plano horizontal paralelo à superfície, sendo cada barra colocada na interseção deste com um plano vertical paralelo ao eixo longitudinal. As barras permitem a transferência de uma certa porcentagem da carga atuante em um dos lados da junta transversal para a placa seguinte, diminuindo a solicitação e evitando um possível deslocamento vertical das placas na região da junta. Esta redução de cargas conduz a tensões menores que as consideradas no dimensionamento da espessura, atuando como coeficiente adicional de segurança de projeto. O uso de sub-bases delgadas, não sujeitas ao bombeamento e com suporte homogêneo, diminui a necessidade de colocação de dispositivo de transferência de carga.

b.2) Juntas Longitudinais

As juntas longitudinais são executadas perpendicularmente ao eixo transversal do pavimento e são subdivididas em:

- *de articulação*: são empregadas para controlar as fissuras devido ao empenamento e servem também de juntas de construção. O espaçamento depende do nível de tensões devidas ao empenamento, sendo o valor máximo de 3,75 m (superior às larguras de faixas de tráfego utilizadas), permitindo a utilização de juntas longitudinais coincidentes com a faixa de tráfego. Esta junta pode ser de encaixe tipo macho-fêmea (Figura 18.e), quando for de construção, ou de seção enfraquecida (serrada, Figura 18.a);
- *de articulação com barras de ligação*: o uso de dispositivo de ligação serve para atender à necessidade de manutenção das faixas de tráfego livres de possíveis movimentos laterais e assegurar que, unidas, possibilitem a transferência de carga pela entrosagem dos agregados ou pelo encaixe. Seu espaçamento máximo também é de 3,75 m, podendo ser, também, de encaixe tipo macho-fêmea (Figura 18.f) quando for de construção, ou de seção enfraquecida (serrada, Figura 18.c).

b.3) Juntas de Expansão

As juntas de expansão controlam a movimentação longitudinal por dilatação do concreto em função da temperatura elevada e são executadas em locais ou situações especiais, como no caso do encontro do pavimento com outro tipo de estrutura (viadutos, pontes) (Figura 18.g).

b.4) Juntas de Construção

As juntas de construção são coincidentes com as juntas longitudinais de articulação quando uma faixa de rolamento é construída de cada vez, e, por outro lado, coincidentes com uma junta transversal de contração quando o ciclo de trabalho termina onde esta ocorreria (junta de construção planejada, Figura 18.d e 18.e) e quando há um imprevisto e a obra precisa parar (junta de construção de emergência, Figura 18.d).

FIGURA 18 - Tipos de juntas em pavimentos rígidos (adaptado de YODER e WICTZAC, 1975).

c) Selagem de Juntas

A selagem de juntas tem como função impedir a infiltração de água e a intrusão de materiais sólidos nas mesmas. A infiltração de água nas juntas pode causar sérios danos à camada de fundação, provocando a expulsão dos finos que a compõem, descalçando a placa e levando o pavimento rapidamente à ruína.

A concentração de material sólido na região da junta produz, quando o concreto se expande, tensões de compressão elevadas ao impedir que a junta feche normalmente. Dependendo da magnitude destas tensões, a junta pode degenerar e precipitar o colapso das placas afetadas.

c.1) Tipos de Materiais a serem utilizados como selante

Um selante adequado deve possuir propriedades bem definidas, como fluidez, período de cura, viscosidade, adesividade, dureza, resistência à oxidação, compressibilidade, elasticidade, resistência à fissuração e coesão interna. A opção por um determinado tipo de selante deve ser tomada em consideração, paralelamente, à maior ou menor facilidade de execução das operações de aplicação de cada um dos tipos propostos e às condições de solicitação da junta, tanto ambientais (temperaturas anuais e pluviosidade) quanto mecânicas (o volume de tráfego e a magnitude das cargas solicitantes).

Os materiais podem ser separados em três grandes grupos:

- *Selantes colocados a quente*: alcatrões, asfaltos filerizados e asfaltos misturados a materiais elásticos, como as borrachas sintéticas. São difíceis de serem aplicados, principalmente pela elevada temperatura de serviço e não são muito utilizados, pois perdem a elasticidade com certa rapidez, podendo ocorrer danos nas juntas.
- *Selantes colocados a frio*: asfaltos diluídos, emulsões asfálticas e elastômeros. Têm como inconveniente principal a perda de volume devido à evaporação do solvente, provocando sérias falhas no comportamento da junta selada.
- *Selantes pré-moldados*: poliuretanos (do tipo neoprene), borracha esponjosa, cortiça e outros. Selante de fácil utilização, possuindo comportamento melhor que os demais tipos. Seu custo de aquisição é, entretanto, muito maior do que os demais.

d) Reservatório do Selante

As dimensões do reservatório do selante (Figura 19) são:

- Profundidade variando de 1/4 a 1/6 da espessura da placa, com um mínimo de 4 cm;
- Abertura de no mínimo 3 mm (valor usual igual a 6 mm).

FIGURA 19 - Reservatório do Selante.

e) Equipamentos para Execução

Um equipamento que tem sido muito utilizado na execução de pavimentos de concreto no Brasil é a vibro acabadora de fôrmas deslizantes. É uma máquina dotada de tração própria, constituída fundamentalmente dos seguintes elementos:

- Estrutura montada sobre chassi de rodas pneumáticas ou esteiras;
- Bitola regulável entre 3,5m e 7,5m ou entre 3,5m e 14m;
- Receptor frontal de concreto, abrangendo toda a largura da pista, contendo um sistema vibrador;
- Régua regularizadora oscilante pré-acabadora;
- Régua acabadora;
- Fôrmas deslizantes fixas à viga vibratória;
- Sistema de controle por meio de fio-guia, apoiado lateralmente em hastes metálicas reguláveis.

Após a utilização deste equipamento são feitas a texturização do pavimento e a cura do concreto.

f) Sub-bases para Pavimentos Rígidos

As sub-bases, nos pavimentos rígidos, possuem as seguintes funções:

- Impedir a ocorrência do bombeamento de solos finos plásticos porventura existentes no subleito, quando saturados, na passagem de cargas pesadas (melhora da drenagem);
- Evitar efeitos danosos à estrutura do pavimento devido a mudanças excessivas de volume de solos instáveis do subleito (controle de fissuras, dilatação e retração do subleito);
- Promover suporte razoavelmente uniforme e constante ao longo da fundação e, como vantagem adicional, aumento do valor real de suporte disponível no topo do sistema subleito-sub-base (aumento do valor de k disponível para o cálculo, o que diminui o valor necessário da espessura das placas de concreto, quando comparada com a que seria requerida se o pavimento fosse assentado diretamente sobre o subleito);
- Contribuir sensivelmente para a diminuição da erosão da fundação do pavimento.

f.1) Tipos de Sub-Bases para Pavimentos Rígidos

Os tipos de sub-bases para pavimentos rígidos são classificados de acordo com a Tabela 3 (DNER, 1989).

TABELA 3 - Tipos de sub-bases para pavimentos de concreto (DNER, 1989).

Sub-bases para Pavimentos de Concreto	Sub-bases Granulares		Granulometria Fechada
			Granulometria Aberta
	Sub-bases Tratadas	Com Cimento	Solo-Cimento
			Solo Melhorado
			Brita Graduada Tratada com Cimento
			Concreto Rolado
		Com outros Aditivos	Asfalto
			Cal

Neste trabalho, nos pavimentos rígidos, são utilizadas sub-bases granulares e sub-bases de concreto rolado.

f.2) Sub-Bases Granulares para Pavimentos Rígidos

Conforme o DNER (1989), as sub-bases granulares utilizadas nos pavimentos de concreto devem atender as faixas granulométricas da Tabela 4.

TABELA 4 - Faixas granulométricas para sub-bases granulares de pavimentos de concreto (DNER, 1989).

<i>Peneira (mm)</i>	<i>Porcentagem passando em massa (%)</i>					
	A	B	C	D	E	F
50,0	100	100	-	-	-	-
25,0	-	75 – 95	100	100	100	100
9,5	30 – 65	40 – 75	50 – 85	60 – 100	-	-
4,75	25 – 55	30 – 60	35 – 65	50 – 85	55 – 100	70 – 100
2,0	15 – 40	20 – 45	25 – 50	40 – 70	40 – 100	55 – 100
0,425	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45	20 – 50	30 – 70
0,075	2 – 8	5 – 20	5 – 15	5 – 20	6 – 20	8 – 25

Além da utilização dessas faixas granulométricas, os materiais utilizados deverão atender, segundo o DNER (1989), aos seguintes requisitos:

- Índice de Plasticidade (IP) $\leq 6\%$ e Limite de Liquidez (LL) $\leq 25\%$;
- Porcentagem passando na peneira n.º 200 (P_{200}) $\leq 35\%$;
- Diâmetro máximo do agregado ($D_{m\acute{a}x}$) $\leq 1/3$ da espessura da sub-base;
- A granulometria do material deverá permitir que, depois de executada a sub-base e sob ação do tráfego, a consolidação do pavimento seja a menor possível.

Com a utilização de sub-bases granulares obtém-se uma substancial influência nas reduções das pressões no subleito e na prevenção do bombeamento. Verifica-se portanto, a partir de estudos já realizados, que quanto maior a espessura da sub-base granular, maior a pressão diretamente abaixo da carga na interface placa-sub-base e menor a pressão na interface subleito-sub-base (PACKARD, 1973).

f.3) Sub-Bases de Concreto Rolado para Pavimentos Rígidos

O concreto rolado é um concreto seco, de consistência dura e de trabalhabilidade tal que permita sua compactação por rolos compressores ou equipamento semelhante, ao invés de serem empregadas régua vibratórias ou vibradores de imersão. Este tipo de concreto contém um teor de cimento muito menor do que os teores utilizados nos concretos normalmente empregados em pavimentação.

As principais características, com relação à utilização de sub-bases de concreto rolado (sub-bases tratadas com cimento), são:

- Fornece um pavimento impermeável, uniforme e de elevado suporte;
- Elimina a consolidação da sub-base;
- Melhora muito a transferência de cargas nas juntas;
- Aumenta muito o módulo de reação do sistema subleito-sub-base, produzindo uma redução na espessura da placa.

De acordo com Packard (1973) a transferência de carga através das juntas, considerando apenas o intertravamento dos agregados das sub-bases tratadas com cimento (que incluem as sub-bases de concreto rolado) é muito mais eficaz que a das sub-bases granulares (Figura 20).

FIGURA 20 - Efeito do tipo de sub-base sob carregamento repetido (PACKARD, 1973).

Observa-se que o aumento das solicitações diminui a eficácia das sub-bases, mas numa sub-base tratada com cimento a perda ocorreu em menor proporção (após 1.000.000 de aplicações da carga, a eficácia permaneceu a um nível de quase 60%).

f.3.1) Dosagem do Concreto Rolado

- *Conteúdo de Água*

O concreto rolado deve conter uma quantidade de água que lhe confira uma trabalhabilidade adequada à sua compactação por rolos compressores. A fixação dessa quantidade tem sido feita por meio de um ensaio de compactação, similar ao empregado pela tecnologia de solos e de solo-cimento. A experiência mostra que, para compactação por rolos, o conteúdo ótimo de umidade no concreto rolado está perto de 6% em relação à massa dos materiais secos.

Portanto, recomenda-se usar um teor inicial de água de 6% em massa, na maior parte dos casos. Quando o agregado tiver uma absorção em proporção acima do usual ou contiver finos plásticos – o que é totalmente contra-indicado – é necessário orientar as misturas experimentais para uma quantidade maior de água (ABCP, 1998a).

- *Consumo de Concreto*

A maioria dos concretos rolados utilizados fica na faixa de 1:12 a 1:24 (cimento:agregados, em massa). Misturas mais ricas podem apresentar graves ocorrências de fissuras e trincas, enquanto que consumos menores de cimento levam, na maioria dos casos, à heterogeneidade da mistura do cimento com o agregado, criando pontos fracos na camada, comprometendo, assim, a durabilidade do material (ABCP, 1998a).

f.3.2) Execução da Sub-Base de Concreto Rolado

A escolha do tipo de equipamento que vai produzir o concreto é função do volume da obra e da disponibilidade de máquinas e mão-de-obra. Podem ser utilizadas usinas normais de concreto ou até simples betoneiras. Dependendo da magnitude da obra, pode-se executar o espalhamento do concreto manualmente, com motoniveladora, com distribuidora comum de agregados e com vibro acabadora de asfalto.

A compactação do concreto é normalmente feita com o auxílio de rolos lisos, vibratórios ou não, ou pequenos rolos vibratórios. A máxima espessura recomendável da camada compactada é de 20,0cm. Com relação à cura, a experiência demonstra que a ausência ou inadequação da cura ocasiona defeitos indesejáveis. O processo de cura pode ser feito por pintura com emulsão betuminosa (processo mais usado), por colocação de sacaria, por colocação de plástico e por aspersão de água, sendo recomendável observar os três dias de cura inicial (ABCP, 1998a).

3.2.2. Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Rígidos

O dimensionamento de pavimentos rígidos visa determinar a espessura da placa de concreto, para um determinado período de projeto, com uma certa resistência à tração na flexão e apoiada em um solo com módulo de reação do subleito capaz de resistir aos esforços provenientes das cargas repetidas do tráfego e às condições climáticas que agem sobre o pavimento.

O dimensionamento dos pavimentos rígidos, neste trabalho, será baseado nos métodos utilizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (PCA, 1984) e pela American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 1993).

a) Método de Dimensionamento da PCA/84

A *Portland Cement Association* (PCA) dos EUA desenvolveu um procedimento de dimensionamento de pavimentos rígidos que agrega progressos e conhecimentos obtidos nas áreas de cálculo de tensões, projeto geométrico, construção e gerência desse tipo de pavimento.

O método da PCA de 1984 difere completamente do editado em 1966, fundado exclusivamente no modelo de fadiga do concreto. Além disso, o método PCA/84 aplica-se tanto a pavimentos de concreto simples e com barras de transferência quanto aos dotados de armadura distribuída, descontínua ou contínua e usa um modelo de análise estrutural por elementos finitos.

Outros tópicos que o novo processo leva em conta são o tipo e grau de transferência de carga nas juntas transversais, os efeitos da existência ou não de acostamentos de concreto, a contribuição estrutural das sub-bases de concreto rolado ou sub-bases tratadas com cimento, a ação dos eixos tandem triplos e introduz o modelo de ruína por erosão da fundação do pavimento, o qual inclui o modelo de ruína por formação de *degraus* ou escalonamento nas juntas transversais, usando-o concomitantemente com o tradicional modelo de fadiga. Este método de dimensionamento permite combinar facilmente diferentes fatores de projeto, propiciando a análise acelerada de muitas soluções alternativas (ABCP, 1998b).

Segundo a ABCP (1998b), para o dimensionamento de um pavimento de concreto é preciso considerar pelo menos quatro condicionantes para que resulte uma solução o mais eficaz possível:

- O efeito das sub-bases tratadas com cimento, principalmente as de maior rigidez e melhores características elásticas e mecânicas, como as de concreto rolado, de modo a incorporá-las ao pavimento como camada que contribua estruturalmente e não seja mero componente sem função estrutural. Para tanto, é preciso que o modelo de análise seja capaz de estudá-las como uma segunda camada rígida, construída de modo a formar com o concreto do pavimento uma estrutura monolítica ou não, e determinar que influência isto terá no estabelecimento dos padrões de fadiga e de erosão do pavimento como um todo;
- O papel do tipo e grau de transferência de carga nas juntas transversais e nas bordas longitudinais entre placas e acostamentos, muito importantes no estabelecimento dos níveis de tensões e deformações nessas áreas;
- As conseqüências da existência de vazios ou de contato parcial entre as placas e sua fundação, causa bastante comum de defeitos dos mais variados graus de gravidade em pavimentos de concreto;
- A distribuição do tráfego ao longo da seção transversal do pavimento.

É um método de dimensionamento mecanístico (em contraposição aos métodos empíricos) que faz uma análise completa das tensões e deformações empregando elementos finitos e que trabalha com as propriedades do concreto, o tipo e grau de transmissão de cargas nas juntas transversais, nas bordas longitudinais e nas trincas, por entrosagem de agregados ou barras de transferência, propriedades dos acostamentos de concreto e da posição da carga (se inferior, canto, borda longitudinal ou junta transversal).

As variáveis de dimensionamento do método PCA/84 são:

- *Modelo de Ruína por Fadiga*: considera que as tensões de tração por flexão são produzidas pela passagem de carga tangenciando a borda longitudinal. Neste critério os eixos simples são os de maior influência no fenômeno da fadiga.
- *Modelo de Ruína por Erosão*: a erosão é a perda de material do topo da camada imediatamente sob a placa de concreto, causada pela ação combinada da água e da passagem de cargas pesadas (bombeamento), principalmente dos eixos múltiplos. A erosão pode ocorrer tanto nas juntas transversais como nas laterais do pavimento. Os efeitos da erosão manifestam-se sob a forma de deformações verticais críticas, principalmente nos cantos e nas bordas longitudinais livres das placas e causam *degraus ou escalões* nas juntas transversais (principalmente as desprovidas de barras de transferência). O critério de erosão depende da correlação entre os valores calculados das deformações verticais do canto da placa e das pressões verticais exercidas na interface entre a placa e a sua fundação. Segundo a ABCP (1998b), o critério de dano por erosão é intimamente ligado às condições climáticas regionais e à eficiência da drenagem, sendo que esses fatores não são utilizados no método da PCA/84.

Com relação à análise de diferentes tipos de pavimentos, nota-se que nos *Pavimentos com Juntas Transversais de Retração* a posição crítica da carga de projeto é próxima ou tangente à borda longitudinal e a meio caminho entre duas juntas transversais contíguas, no que se refere às tensões de tração por flexão (Figura 21). Considerando as distâncias usuais entre juntas depreende-se que elas, no modelo de fadiga, não influem no estabelecimento do nível crítico de tensões, o mesmo acontecendo com o sistema de transferência de carga por entrosagem de agregados ou por barras de transferência. Na análise de erosão, a deformação crítica é a que se dá no canto da placa (Figura 22), quando a carga tangencia ao mesmo tempo a borda longitudinal livre do pavimento e a junta transversal. Estudando essa situação de carregamento fica claro que a eficácia do sistema de transferência de carga, tanto entre placas vizinhas como entre placa e acostamento, desempenha papel preponderante no comportamento do pavimento quanto à erosão.

FIGURA 21 - Posição de carga crítica para as tensões de tração na flexão (adaptada da ABCP, 1998b).

FIGURA 22 - Posição de carga crítica para as deformações (adaptada da ABCP, 1998b).

Quando o método PCA/84 analisa os *Pavimentos Continuamente Armados* (caracterizados pela inexistência de juntas de retração e pela presença de elevada taxa de armadura distribuída contínua - até 6% de aço em relação à seção transversal de concreto) é permitido que ocorram fissuras em toda a extensão do pano concretado, as quais são mantidas fechadas, propiciando um certo grau de transmissão de carga entre as faces do concreto fissurado (no método, considerado como de 35%). Este tipo de pavimento não é utilizado no Brasil e não está sendo analisado neste trabalho.

O efeito dos acostamentos de concreto é substancial para a redução das deformações verticais ao longo da borda do pavimento. O modelo estrutural computa uma eficiência de junta da ordem de 65%, no caso de haver ligação entre o acostamento e a pista, o que pode resultar em até 15% de redução da espessura necessária de placa, dependendo dos outros parâmetros específicos do projeto em andamento.

O valor de suporte é medido pelo coeficiente de recalque (chamado por Westergaard de módulo de reação), simbolizado pela letra k , o qual é determinado diretamente por uma prova de carga estática (ASTM, D1196/87) sobre a fundação preparada. O módulo de reação avalia a pressão necessária para produzir uma deformação unitária no terreno, sendo expresso no Sistema Internacional de Unidades (SI) em MPa/m. O método PCA/84 considera também procedimentos mais simples, como o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), conforme a correlação que se tem na Figura 23, cuja precisão é satisfatória para fins de dimensionamento, visto que a determinação exata de k não é essencial e as variações pequenas de seu valor não têm maior influência no resultado do cálculo da espessura.

Não são levadas em conta as flutuações sazonais do valor de k , entendendo que, mesmo em regiões sujeitas a congelamento e degelo, os períodos de enfraquecimento do suporte são muito menores do que aqueles em que o valor é igual ou superior ao previsto no projeto.

As sub-bases podem ser tratadas ou não com cimento (além de estabilizadas com cal, pozolana ou materiais asfálticos). Em qualquer caso, é possível determinar indiretamente o coeficiente de recalque no topo do sistema subleito-sub-base, em função do tipo e da espessura desta e do CBR ou k do subleito. A Tabela 5 traz o valor do coeficiente de recalque para uso no dimensionamento quando a sub-base é granular.

As sub-bases de concreto rolado (identificadas pela PCA/84 como concreto magro - *lean concrete*), são capazes de acrescentar ao pavimento maior poder estrutural do que qualquer outro tipo de sub-base, por sua alta rigidez, elevada resistência à tração na flexão e não serem erodíveis. Portanto este tipo de sub-base não é dimensionada de acordo com o critério de simples aumento de k no topo de um sistema de fundação.

Segundo a ABCP (1998b), verifica-se que a contribuição das barras de transferência pode trazer uma economia de até aproximadamente 20% de espessura do concreto, no caso de pavimentos para tráfego pesado, sem acostamento de concreto e sem sub-base. O empenamento do concreto devido à ação de variações de temperatura e de umidade não é considerado.

FIGURA 23 - Relação entre índice de suporte Califórnia (CBR) e coeficiente de recalque (k) do subleito (válida somente para camadas de espessura semi-infinita).

O período de projeto recomendado é de 20 anos, por ser praticamente impossível garantir a precisão da projeção de tráfego por períodos maiores (ABCP, 1998b).

O método utiliza os seguintes fatores de segurança para cargas:

- 1,0 – para ruas ou vias que carreguem pequena frequência de caminhões e instalações urbanas semelhantes (estacionamentos, por exemplo);
- 1,1 – para estradas e vias com moderada frequência de caminhões;
- 1,2 – para grande frequência de caminhões.

TABELA 5 – Aumento de k devido à presença de sub-base granular (ABCP, 1998b)
(valores sem considerar a perda de suporte do material).

Valor de Suporte do Subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a (cm)			
CBR (%)	k (MPa/m)	10	15	20	30
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	72	79	96

a.1) Procedimento de Cálculo do Método da PCA/84 (ABCP, 1998b)

As informações necessárias para o dimensionamento pelo método da PCA (1984) são:

- Cargas por eixo simples, tandem duplo e tandem triplo;
- Fator de segurança para as cargas;
- Número previsto de repetições das cargas por eixo durante o período de projeto;
- Resistência característica do concreto ($f_{ctM,k}$) (ou módulo de ruptura, M_R) medida aos 28 dias;
- Coeficiente de recalque do subleito ou do sistema subleito-sub-base (k), já considerando a perda de suporte do material utilizado para sub-base;
- Tipo de junta transversal (com ou sem barra de transferência - BT);
- Tipo de acostamento (se de concreto ou não).

O dimensionamento faz-se pelas análises de fadiga e erosão, de modo sistematizado por tabelas e ábacos. No uso das tabelas é permitida a interpolação, que se faz por regra de três. A leitura do número admissível de repetições de cargas não requer precisão exaustiva, em nenhum dos ábacos; caso a reta de interseção saia acima da linha correspondente ao número admissível de repetições de carga, este deve ser considerado ilimitado.

Os limites máximos de consumo de fadiga e de danos por erosão são de 100% para cada um, ou seja, uma certa espessura será considerada adequada somente se tanto o consumo total de fadiga quanto o dano total por erosão forem inferiores a 100% e não a soma dos dois.

A análise de fadiga geralmente leva a resultados mais danosos no caso de eixos simples, enquanto que os eixos múltiplos afetam principalmente a análise de erosão. Nos pavimentos submetidos a tráfego leve, dotados ou não de barras de transferência, e tráfego médio com barras de transferência, o dimensionamento será orientado quase sempre pela fadiga do concreto. Já a erosão deverá ser o fator preponderante nos dimensionamentos de pavimentos para tráfego médio, sem barras de transferência, e para tráfego pesado, com e sem sistema de transferência de carga.

a.2) Procedimento de Dimensionamento de Pavimentos Rígidos com Sub-base de Concreto Rolado - Método da PCA/84 (ABCP, 1998b)

O dimensionamento de pavimentos rígidos com sub-base de concreto rolado, pelo método da PCA/84, considera que a camada de concreto rolado contribui efetivamente na diminuição dos valores das tensões e deformações do pavimento (portanto, não considera que este tipo de sub-base provoque apenas um aumento de coeficiente de recalque).

Há duas opções de cálculo: considerando as camadas aderidas entre si (pavimento de concreto composto *monolítico*) ou completamente separadas (pavimento de concreto composto com *sub-base de concreto rolado*, ou *não monolítico* – como é considerado neste trabalho).

No caso deste trabalho, que está dimensionando para pavimento de concreto composto com *sub-base de concreto rolado* (ou *não monolítico*), tem-se que a espessura total resultante (soma das espessuras das duas camadas) é estruturalmente equivalente à espessura de uma camada única de concreto comum de pavimento, apoiada diretamente sobre o subleito. A equivalência entre os pavimentos é determinada pelo fato de que o pavimento composto oferece a mesma segurança que o pavimento simples. Assim:

- 1) As relações de tensões em cada uma das camadas do pavimento composto devem ser iguais ou inferiores às do pavimento simples (ou de referência);
- 2) Os danos por erosão na interface entre o subleito e a camada de concreto rolado não devem ser maiores do que as ocorrentes no pavimento de referência;
- 3) Ao procedimento de fadiga já exposto adicionou-se o critério de erosão;
- 4) Considera-se que haja certa contribuição estrutural da camada de concreto rolado, desde que ela sobrepasse as laterais da camada superior de concreto simples (mínimo de 50cm a 60cm).

A Figura 24 mostra o ábaco de dimensionamento para o pavimento *não monolítico*. A resposta do ábaco é a espessura necessária da camada de concreto simples, dada em função da espessura equivalente da camada única de concreto do pavimento em referência e da espessura de sub-base de concreto rolado. Os concretos simples dos pavimentos de referência e do pavimento composto devem ter resistência característica

à tração na flexão variando de 3,4MPa a 4,8MPa, enquanto que a do concreto rolado da sub-base estará entre 1,0MPa e 3,0MPa (neste trabalho, no concreto rolado, estão sendo utilizadas $f_{ctM,k} = 1,5\text{MPa}$ e espessura do concreto rolado de 10cm).

As medidas mostradas nas curvas são as espessuras necessárias de concreto simples na camada de topo do pavimento, em cm

FIGURA 24 – Ábaco de dimensionamento de pavimento de concreto composto não monolítico (ABCP, 1998a).

b) Método de Dimensionamento da AASHTO (1993)

O método da AASHTO (1993) é um método empírico, desenvolvido após o *AASHTO Road Test*, que utiliza equações de desempenho e relaciona o critério de ruptura com o desempenho, definido como a variação da serventia (medida de quão bem um dado pavimento serve ao tráfego com segurança, conforto e economia para qualquer estado climático) ao longo do tempo. Este método não tem um critério de fadiga, sendo seu critério de ruptura o nível de serventia mínimo admissível.

Os parâmetros necessários para o dimensionamento de pavimentos rígidos pela AASHTO (1993) são os seguintes:

- Módulo de reação do subleito (k);
- Número de solicitações equivalentes do eixo padrão (eixo simples, rodas duplas, 80kN) (W_{18});
- Nível de confiabilidade de projeto (R);
- Desvio padrão normal (Z_R);
- Desvio padrão combinado (S_θ);
- Diferença entre o índice de serventia inicial e o índice de serventia final de projeto (ΔPSI);
- Módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland (E_c);
- Módulo de ruptura do concreto de cimento Portland utilizado no projeto (S'_c);
- Coeficiente de transferência de carga (J);
- Coeficiente de drenagem (C_d).

b.1) Determinação do M_R e do Módulo de Reação do Subleito (k)

O módulo de resiliência, no dimensionamento de pavimentos rígidos, tem que ser convertido para o valor do módulo de reação do subleito (k). O módulo de reação do subleito, utilizado para quantificar a capacidade de suporte dos solos, deve ser corrigido em função da presença de sub-base (k do sistema subleito/sub-base) e em função de variações sazonais e perda de suporte (Figuras 25 e 26).

Exemple:

$$D_{SB} = 6 \text{ inches}$$

$$E_{SB} = 20,000 \text{ psi}$$

$$M_R = 7,000 \text{ psi}$$

$$\text{Solution: } k_{\text{eq}} = 400 \text{ pci}$$

FIGURA 25 – Ábaco para estimar o valor do módulo de reação do sistema subleito - sub-base, assumindo uma camada de subleito semi-infinita (AASHTO, 1993).

b.2) Determinação do Número de solicitações equivalentes do eixo-padrão (W_{18})

O cálculo do número de solicitações equivalentes, que transforma o tráfego misto no número de passadas do eixo-padrão de 80 kN (18.000 lb, 18 kips ou 8,2 t) é feito através de fatores de equivalência de carga, que são funções do tipo de eixo (simples, tandem duplo ou tandem triplo), da espessura da placa (6" a 14"), do valor terminal de serventia adotado no projeto e da carga por eixo (1 a 40 t).

FIGURA 26 – Correção do valor do módulo de reação do sistema subleito-sub-base, devido à perda de suporte do material da sub-base (AASHTO, 1993).

Como o cálculo do W_{18} é função de D (espessura da placa), é necessário, primeiramente, adotar um valor de D , para selecionar os fatores de equivalência adequados. Feito o dimensionamento, deve-se comparar o D adotado com o que foi realmente obtido com a estrutura final dimensionada. Havendo diferença significativa, refazem-se os cálculos.

b.3) Determinação do Desvio Padrão Combinado (S_0)

O valor do desvio padrão combinado para pavimentos rígidos varia de 0,30 a 0,40, sendo recomendado pela AASHTO que seja utilizado desvio padrão igual a 0,39 para o caso onde é considerada uma variação no tráfego futuro projetado e de 0,34 para o caso onde não é considerada uma variação no tráfego futuro projetado.

b.4) Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto (E_c)

A AASHTO (1993), para a determinação do módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland (E_c), cita a seguinte correlação recomendada pela American Concrete Institute:

$$E_c = 57000 \cdot (f'_c)^{0.5} \quad (15)$$

sendo:

E_c – módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland (MPa) e

f'_c – resistência à compressão simples do concreto de cimento Portland (MPa).

De acordo com a ASTM C39-96 (Método de ensaio para resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto), os valores da resistência à compressão simples do concreto de cimento Portland variam de 13 MPa a 53 MPa.

b.5) Determinação do Coeficiente de Transferência de Carga (J)

A capacidade que um pavimento rígido tem de distribuir as cargas solicitantes através das juntas é representada pelo coeficiente de transferência de carga (J) e sua eficiência depende da existência ou não de barras de transferência, do grau de entrosagem entre os agregados, do tipo de sub-base, da temperatura ambiente e suas variações sazonais e se o acostamento é ou não pavimentado.

A transferência de carga diminui durante a utilização da estrada e a existência de barras de transferência nas juntas transversais diminui o J, resultando num aumento da resistência equivalente. Analogamente, sub-bases tratadas têm menores valores de J quando comparadas com as granulares, o que também resulta em um aumento da resistência equivalente.

b.6) Determinação do Coeficiente de Drenagem (C_d)

O coeficiente de drenagem representa a eficiência drenante da sub-base. A norma da AASHTO (1993) recomenda valores de coeficientes de drenagem (Tabela 6).

TABELA 6 – Valores recomendados do coeficiente de drenagem (C_d) para pavimentos rígidos (AASHTO, 1993).

Qualidade da drenagem	Porcentagem de tempo que a estrutura do pavimento é exposta a níveis de umidade próximos da saturação			
	Menor que 1%	1 – 5%	5 – 25%	Acima de 25%
Excelente	1,25 – 1,20	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10
Boa	1,20 – 1,15	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00
Regular	1,15 – 1,10	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90
Ruim	1,10 – 1,00	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80
Péssima	1,00 – 0,90	0,90 – 0,80	0,80 – 0,70	0,70

b. 7) Dimensionamento da Placa de Concreto - Determinação da Espessura da Placa

O dimensionamento pode ser feito utilizando-se a equação de projeto, apresentada abaixo.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 7,35 \cdot \log_{10}(D+1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D+1)^{8,46}}} +$$

$$+ (4,22 - 0,32 \cdot p_i) \cdot \log_{10} \left[\frac{S'_e \cdot C_d \cdot (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \cdot \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0,25}} \right]} \right] \quad (16)$$

A AASHTO (1993) apresenta a fórmula (16) citada anteriormente e um ábaco (em dois segmentos) para dimensionar a espessura da placa de concreto do pavimento rígido.

Os resultados dos dimensionamentos dos pavimentos flexíveis e rígidos, de acordo com os métodos de dimensionamento expostos neste capítulo, são apresentados no capítulo 5, em função dos seguintes fatores: solicitações e volume de tráfego, períodos de projeto, resistências do subleito e materiais e estruturas das camadas. Os resultados dos custos de construção dos pavimentos flexíveis e rígidos, que é função dos materiais e dos métodos de dimensionamentos utilizados (espessuras das camadas), são também apresentados no capítulo 5, em função dos seguintes fatores: métodos de dimensionamento, solicitações e volume de tráfego, períodos de projeto, resistências do subleito e materiais e estruturas das camadas.

CAPÍTULO 4 – CUSTOS DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS E CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS

4.1. CUSTOS DE M & R DOS PAVIMENTOS

Os pavimentos são estruturas complexas que envolvem muitas variáveis, tais como: cargas do tráfego, solicitações ambientais, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais etc. Qualquer material que se utilize em pavimentação apresenta, durante a vida em serviço, alguma forma de deterioração. Esta deterioração é resultado das solicitações do tráfego e das condições climáticas (temperatura e teor de umidade) a que são submetidos antes mesmo de começarem a servir aos usuários.

O reconhecimento do tipo de defeito, a quantificação de sua extensão (frequência de ocorrência ou área do revestimento sujeita a um determinado tipo de defeito) e a identificação do nível de severidade (nível de deterioração dos defeitos, normalmente classificado em baixo, médio e alto), juntamente com a determinação de suas causas, são de vital importância para a seleção das estratégias de intervenção e definição das atividades de manutenção e reabilitação (FERNANDES, ODA e ZERBINI, 1999).

É muito importante, também, saber que pavimentos diferentes apresentam diferentes taxas de deterioração e que os pavimentos se deterioram mais lentamente nos anos iniciais de sua vida em serviço, mas à medida que se aproximam do final da vida de projeto a taxa de deterioração aumenta.

Portanto, a partir do momento em que um pavimento não estiver mais proporcionando economia, segurança e conforto ao usuário, é necessária a verificação da necessidade de sua manutenção e reabilitação.

4.1.1. Identificação de Defeitos dos Pavimentos

Durante os trabalhos de levantamento de campo, geralmente surgem dúvidas relacionadas ao reconhecimento e à forma de medição dos defeitos. Vários manuais têm sido elaborados buscando estabelecer e uniformizar a nomenclatura, as definições, os conceitos e os métodos de levantamento dos principais defeitos observados nos pavimentos.

Em virtude da necessidade de uniformização da coleta de dados, utiliza-se, neste trabalho, o manual de levantamento de defeitos do Programa SHRP (Strategic Highway Research Program). O manual do Programa de Pesquisa SHRP considera 15 tipos de defeitos em pavimentos flexíveis e 16 tipos de defeitos em pavimentos rígidos, identificando-os através de fotos e figuras. Apresenta, para cada tipo de defeito, a descrição, os níveis de severidade (inclusive com fotos) e a forma de quantificação da extensão (SHRP, 1993).

Existem outros manuais que são importantes como complemento ao Manual de Identificação de Defeitos dos Pavimentos do Programa SHRP:

- Catálogo dos Defeitos dos Revestimentos dos Pavimentos (ASSOCIAÇÃO RODOVIÁRIA BRASILEIRA - ARB, 1978): considera 64 tipos de defeitos (34 para pavimentos flexíveis), apresentando, para cada um deles, a descrição e possíveis causas;
- AASHTO – Apêndice K: Defeitos Típicos (AASHTO, 1986): considera 17 tipos de defeitos (14 coincidentes com o SHRP), apresentando, para cada um deles, a descrição, níveis de severidade e métodos de medição;
- Manual para identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos (DOMINGUES, 1993): considera 24 tipos de defeitos, apresentando, para cada um deles, a descrição, mecanismo de ocorrência, localização, classe (funcional ou estrutural), níveis de severidade (fotos) e métodos de medição;

Os manuais publicados em língua portuguesa (ARB, 1978 e DOMINGUES, 1993) podem ser utilizados, mas não se deve esquecer que eles também foram elaborados a partir das experiências francesa e americana e que apresentam limitações e deficiências eliminadas nas diversas revisões que passou o Manual do Programa SHRP (SMITH et al., 1987; CASTEDO et al., 1990). Neste trabalho consideram-se, portanto, as formas de deterioração utilizadas nos estudos sobre Desempenho de Pavimentos a Longo Prazo

(LTPP) do Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (SHRP, 1993). Como referências complementares são consideradas as normas do DNER relacionadas aos defeitos dos pavimentos, tais como:

- DNER-TER 01/78: Norma rodoviária com as terminologias de defeitos de pavimentos flexíveis e semi-rígidos;
- DNER-TER 49: Norma rodoviária com as terminologias de defeitos de pavimentos rígidos;
- DNER-PRO 008/94: Norma rodoviária para Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos;
- DNER-PRO 50: Norma rodoviária para Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Rígidos;
- DNER-PRO 51: Norma rodoviária para Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Rígidos;
- DNER-ES 128/83: Norma para Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede;
- DNER-ES 169/86: Norma para Controle da Qualidade de Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede.

4.1.2. Tipos de Defeitos dos Pavimentos

As formas de deterioração de pavimentos flexíveis e rígidos consideradas neste trabalho são as apresentadas no Manual de Identificação de Defeitos do Programa SHRP (1993). Descrições detalhadas de cada tipo de defeito, seu nível de severidade e método para medição da extensão são apresentados por FERNANDES JR., ODA e ZERBINI (1999) e por SEVERI (1997).

a) Defeitos dos Pavimentos Flexíveis do Programa SHRP

O Manual de Identificação de Defeitos dos Pavimentos do programa SHRP (1993), adotado neste trabalho, considera 15 tipos de defeitos em pavimentos flexíveis, identificando-os através de fotos e figuras. No Manual cada tipo de defeito tem a sua descrição, o seu nível de severidade (fotos) e o método para sua medição. Resumidamente, são apresentados a seguir estes defeitos.

- 1) *Trincas por Fadiga do Revestimento*: Áreas submetidas a cargas repetidas de tráfego, em forma de "couro de crocodilo" ou "tela de galinheiro", com espaçamento inferior a 30 cm.
- 2) *Trincas em Blocos*: Trincas que dividem o pavimento em pedaços aproximadamente retangulares. Tamanho dos blocos entre 0,1 a 10 m².
- 3) *Trincas nos Bordos*: Apenas para pavimentos com acostamentos não pavimentados. Ocorre dentro de uma faixa de 60 cm a partir da extremidade do pavimento.
- 4) *Trincas Longitudinais*: Trincas predominantemente paralelas ao eixo, podendo se localizar dentro ou fora das trilhas de roda.
- 5) *Trincas por Reflexão*: Reflexão de trincas ou juntas das camadas inferiores. Ocorrem em recapeamentos ou pavimentos novos (devido à contração da base).
- 6) *Trincas Transversais*: Trincas predominantemente perpendiculares ao eixo. Severidade de uma trinca: adotar a mais elevada, desde que represente pelo menos 10% da extensão.
- 7) *Remendos*: Porção da superfície do pavimento, maior que 0,1 m², removida e substituída ou material aplicado ao pavimento após a construção inicial.
- 8) *Panelas*: Buracos resultantes de desintegração localizada, sob a ação do tráfego e em presença de água. Fragmentação, causada por trincas por fadiga ou desgaste, e remoção localizada de partes do revestimento.
- 9) *Deformação Permanente*: Depressão longitudinal nas trilhas de roda, em razão de densificação dos materiais ou ruptura por cisalhamento.
- 10) *Corrugação*: Deformação plástica caracterizada pela formação de ondulações transversais na superfície do pavimento, causada por esforços tangenciais (frenagem ou aceleração).
- 11) *Exsudação*: Excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento.
- 12) *Agregados Polidos*: Polimento (desgaste) dos agregados e do ligante betuminoso e exposição dos agregados graúdos. Comprometimento da segurança: redução do coeficiente de atrito pneu-pavimento.

- 13) **Desgaste:** Perda de adesividade do ligante betuminoso e desalojamento dos agregados. Devido ao envelhecimento, endurecimento, oxidação, volatilização e intemperização.
- 14) **Desnível (Degrau) entre Pista e Acostamento:** Diferença de elevação entre a faixa de tráfego e o acostamento. Ocorrem devido a camadas sucessivas de revestimento asfáltico; erosão do acostamento não pavimentado; consolidação diferencial.
- 15) **Bombeamento:** Saída de água pelas trincas do pavimento sob a ação das cargas do tráfego. Identificado pela deposição à superfície, de material carreado das camadas inferiores.

Para os defeitos considerados no manual do Programa SHRP (1993), pode-se fazer uma adaptação do manual da AASHTO (1986) e distinguir as causas principais (Tabela 7).

TABELA 7 - Causas dos principais defeitos dos pavimentos flexíveis (adaptada de AASHTO, 1986).

TIPO DE DEFEITO	CAUSA PRINCIPAL	
	Associada ao Tráfego	Materiais e Meio Ambiente
1. Trincas por Fadiga	X	
2. Trincas em Blocos		X
3. Trincas nos Bordos (Laterais)		X
4. Trincas Longitudinais		X
5. Trincas por Reflexão		X
6. Trincas Transversais		X
7. Remendos	X	
8. Panelas	X	
9. Deformação Permanente nas Trilhas de Roda	X	
10. Corrugação		X
11. Exsudação		X
12. Agregados polidos	X	
13. Desgaste		X
14. Desnível pista/acostamento		X
15. Bombeamento	X	X

b) Defeitos dos Pavimentos Rígidos do Programa SHRP

O Manual de Identificação de Defeitos dos Pavimentos do programa SHRP (1993), adotado neste trabalho, considera 16 tipos de defeitos em pavimentos rígidos, identificando-os através de fotos e figuras. Resumidamente, são apresentados a seguir estes defeitos.

- 1) ***Trincas de Canto:*** Placa com uma trinca qualquer que corte a junta adjacente transversal e longitudinal, descrevendo um ângulo de 45° com a direção do tráfego.
- 2) ***Trincas Circulares:*** ocorrem adjacentes à junta, trinca ou bordos livres, começando no canto da placa e com formato de meia-lua.
- 3) ***Trincas Longitudinais:*** placa com trincas paralelas ao eixo da pista.
- 4) ***Trincas Transversais:*** ocorrem perpendicularmente à linha de centro do pavimento.
- 5) ***Junta com Selante Deteriorado:*** qualquer condição que possibilite que material incompressível ou significativa quantidade de água vinda da superfície do pavimento infiltre na junta. 5a) *junta transversal*; 5b) *junta longitudinal*.
- 6) ***Esborcinamento de Junta Longitudinal:*** trinca, fratura, lascamento ou desgaste do bordo da placa dentro de um limite de 0,6 m da junta.
- 7) ***Esborcinamento de Junta Transversal:*** trinca, fratura, lascamento ou desgaste do bordo da placa dentro de um limite de 0,6 m da junta.
- 8) ***a) Trincas Interligadas:*** série de trincas que se estendem somente na superfície da placa, freqüentemente orientadas na direção longitudinal do pavimento e interconectadas por trincas aleatórias ou transversais com menor abertura.
b) Escamação: deterioração do concreto da superfície da placa, normalmente entre 3 e 13 mm, podendo ocorrer em qualquer lugar da superfície do pavimento.
- 9) ***Agregados Polidos:*** a argamassa da superfície e a textura usada são perdidas e o agregado fica exposto.
- 10) ***Estilhaçamento:*** pequenas partes do pavimento quebrado se soltam da superfície, com diâmetro entre 25 e 100 mm e uma profundidade entre 13 e 50 mm.
- 11) ***Alçamento Localizado:*** movimentos ascendentes localizados na superfície do pavimento na junta transversal ou trinca, muitas vezes acompanhados de quebra do concreto naquela área.

- 12) **Degrau na Junta Transversal ou na Trinca:** diferença na elevação transversal de uma junta ou trinca.
- 13) **Desnível Pista/Acostamento:** diferença na elevação entre o bordo da placa e o acostamento, ocorre principalmente quando o exterior do acostamento se adensa.
- 14) **Separação Pista/Acostamento:** alargamento da junta entre o bordo da pista e o acostamento.
- 15) **Remendos:** área do pavimento original, maior que $0,1m^2$, removida e substituída, ou material adicional aplicado ao pavimento após a construção.
- 16) **Bombeamento:** vazamento ou ejeção de água através das trincas, podendo ser detectado pela deposição de material fino (das camadas de suporte) sobre a superfície do pavimento.

Para os defeitos considerados no manual do Programa SHRP (1993), pode-se fazer uma adaptação do manual da AASHTO (1986) e distinguir as causas principais (Tabela 8).

TABELA 8 - Causas dos principais defeitos dos pavimentos rígidos
(adaptada de AASHTO, 1986).

TIPO DE DEFEITO	CAUSA PRINCIPAL	
	Associada ao Tráfego	Materiais e Meio Ambiente
1. Trincas de canto	X	
2. Trincas circulares		X
3. Trincas longitudinais		X
4. Trincas transversais	X	X
5. Deterioração do selante		X
6 e 7. Esborcinamento de juntas	X	X
8. Trincas interligadas e escamação		X
9. Agregados polidos	X	X
10. Estilhaçamento		X
11. Alçamento localizado		X
12. Degrau na junta transversal ou trinca	X	X
13. Desnível pista/acostamento	X	X
14. Separação pista/acostamento		X
15. Deterioração do remendo	X	X
16. Bombeamento	X	X

4.1.3. Definição de Estratégias e Seleção de Atividades de M & R dos Pavimentos

Fernandes Jr. (1996) destaca que os organismos rodoviários, mediante utilização de um sistema de gerência de pavimentos, podem avaliar a aplicação de várias estratégias de manutenção e reabilitação, simulando seus efeitos sobre a condição dos pavimentos e os custos associados (de construção, de manutenção e reabilitação e de operação dos veículos). Podem, dessa forma, escolher a melhor estratégia ("o que fazer"), selecionar a atividade mais indicada ("como fazer"), indicar as seções prioritárias ("onde fazer") e definir a melhor época para execução dos serviços de manutenção e reabilitação ("quando fazer").

Existem diferenças entre as atividades de manutenção e as atividades de reabilitação de pavimentos. A manutenção tem por objetivo preservar ou manter o período de projeto do pavimento, aumentando pouco o nível de serventia, mas evitando a deterioração precoce. A reabilitação, por sua vez, tem o propósito de prolongar a vida em serviço do pavimento, elevando o nível de serventia próximo ao valor máximo e criando condições para um novo ciclo de deterioração (FERNANDES JR., ODA e ZERBINI, 1999).

As atividades de manutenção podem ser divididas em duas categorias: preventivas e corretivas. A manutenção preventiva consiste no grupo de atividades realizadas para proteger o pavimento e reduzir a sua taxa de deterioração, enquanto as atividades corretivas têm como objetivo eliminar um determinado tipo de defeito e suas conseqüências sobre o desempenho do pavimento. Deve-se destacar que algumas atividades servem às duas categorias.

Embora as atividades de manutenção ajudem a prolongar a vida em serviço, os pavimentos precisam, mais cedo ou mais tarde, de atividades de reabilitação. Quando o período de projeto é excedido, seja na idade ou no número de repetições das solicitações do tráfego, há necessidade de atividades de reabilitação, que consistem de trabalhos mais efetivos, visando a recuperação, o reforço ou a adaptação de pavimentos deficientes.

Fernandes Jr., Oda e Zerbini (1999) e Severi (1997) apresentam um resumo das causas dos 31 tipos de defeitos em pavimentos flexíveis e rígidos considerados no Manual de Identificação de Defeitos do Programa SHRP e as principais atividades de M & R indicadas.

São consideradas, portanto, para os defeitos existentes nos pavimentos flexíveis, as seguintes causas e estratégias de manutenção e reabilitação:

1) *Trincas por Fadiga do Revestimento*

Causas:

- Problema estrutural (espessuras inadequadas);
- Enfraquecimento estrutural durante o período de chuvas.

Atividades de M & R:

- Manutenção: remendos (reparo permanente, no caso de problemas localizados) ou tratamento superficial e lama asfáltica (reparos temporários);
- Reabilitação: recapeamento (reforço estrutural, no caso de áreas extensas);
- Reconstrução: novos materiais ou reciclados.

Obs.: geralmente associadas à saturação do subleito, sub-base ou base, as trincas por fadiga podem exigir a remoção do material saturado e a instalação de drenagem.

2) *Trincas em Blocos*

Causas:

- Contração de origem térmica (revestimento formado por misturas asfálticas com agregados finos e alto teor de asfalto com baixa penetração) ou de variação do teor de umidade (camadas inferiores), ou ainda em razão do envelhecimento (perda de elasticidade do revestimento causada por oxidação em virtude de tempo de mistura muito longo, temperatura de mistura elevada ou período de armazenamento muito longo);
- Contração de bases tratadas com cimento ou com utilização de solos tropicais.

Atividades de M & R:

- Manutenção: aplicação de selante (emulsão asfáltica seguida por tratamento superficial, lama asfáltica ou recapeamento delgado);
- Reabilitação: reciclagem ou recapeamento (nos estágios avançados).

3) *Trincas nos Bordos*

Causas:

- Compactação insuficiente;
- Drenagem deficiente.

Atividades de M & R:

- Selante para evitar entrada de água e conseqüente enfraquecimento estrutural.

4) *Trincas Longitudinais*

Causas:

- Má execução de juntas longitudinais de separação entre duas faixas de tráfego (menor densidade e menor resistência à tração);
- Contração do revestimento.

Atividades de M & R:

- Manutenção: trincas com abertura menor que 3 mm não precisam ser preenchidas; trincas com abertura entre 3 e 20 mm devem ser limpas e receber aplicação de selante (asfalto modificado com borracha ou elastômeros) e lançamento de areia sobre o selante;
- Reabilitação: trincas com abertura maior que 20 mm devem ser reparadas com remendo ou, no caso de estar previsto um recapeamento, devem ser preenchidas com concreto asfáltico de granulometria fina.

5) *Trincas por Reflexão*

Causas:

- Movimentação de placas rígidas subjacentes (bases tratadas com cimento ou cal, bases de solos arenosos finos lateríticos).

Atividades de M & R:

- Manutenção: remendos e tratamento superficial ou lama asfáltica (reparos temporários);
- Reabilitação: recapeamento (reforço estrutural: têm sido utilizadas geomembranas entre o pavimento antigo e o reforço para absorção do movimento horizontal das camadas inferiores; outra técnica consiste na reciclagem das porções mais superficiais do pavimento antigo, de modo a eliminar o padrão das trincas e, dessa forma, ao menos retardar o aparecimento das trincas por reflexão).

Obs.: trincas com abertura menor que 3 mm não precisam ser preenchidas; trincas com abertura entre 3 e 20 mm devem ser limpas e receber aplicação de selante (asfalto modificado com borracha ou elastômeros) e lançamento de areia seca sobre o selante; trincas com abertura maior que 20 mm devem ser reparadas com remendo ou, no caso de estar previsto um recapeamento, devem ser preenchidas com concreto asfáltico de granulometria fina.

6) *Trincas Transversais*

Causas:

- Contração térmica do revestimento e hidráulica das outras camadas.

Atividades de M & R:

- Selante para evitar entrada de água e conseqüente enfraquecimento estrutural.

7) *Remendos*

Atividades de M & R:

- Obs.: o simples preenchimento de panelas é chamado de "tapa-buraco".

8) *Panelas*

Causas:

- Falha estrutural (revestimento com pequena espessura ou baixa capacidade de suporte das camadas inferiores);
- Segregação da mistura (falta de ligante asfáltico em pontos localizados);
- Problema construtivo (drenagem inadequada).

Atividades de M & R:

- Manutenção: remendos (reparos permanentes);
- Reabilitação: recapeamento (reforço estrutural) após a execução dos remendos.

Obs.: as atividades de M & R devem, sempre, ser precedidas de instalação ou correção de drenagem.

9) *Deformação Permanente*

Causas:

- Dimensionamento inadequado (espessuras insuficientes);
- Dosagem da mistura (falta de estabilidade, que resulta em deformação plástica em razão de elevado teor de ligante, excesso de material de preenchimento e uso de agregados arredondados;
- Compactação inadequada e posterior consolidação pelas cargas do tráfego ;
- Cisalhamento (fluência plástica) causado por enfraquecimento em razão de infiltração de água.

Atividades de M & R:

- Reabilitação: reciclagem, recapeamento delgado (nas fases iniciais, precedido pelo preenchimento das depressões com concreto asfáltico) ou recapeamento espesso (reforço estrutural);
- Reconstrução: novos materiais ou reciclados.

10) *Corrugação*

Causas:

- Falha estrutural;
- Dosagem da mistura (falta de estabilidade, em razão de excesso de asfalto, ligante asfáltico pouco viscoso, excesso de agregados finos, agregados arredondados, com textura lisa ou granulometria inadequada);
- Problema construtivo (fraca ligação entre base e revestimento).

Atividades de M & R:

- Manutenção: remendos;
- Reabilitação: reciclagem (fresagem dos revestimentos com espessura superior a 5 cm, seguida de aplicação de capa selante ou concreto asfáltico); recapeamento delgado (sobre superfície regularizada: escarificação e mistura com material da base e compactação antes do lançamento da nova camada de revestimento) ou recapeamento espesso (reforço estrutural);
- Reconstrução: novos materiais ou reciclados.

11) *Exsudação*

Causas:

- Excesso de ligante betuminoso;
- Baixo índice de vazios da mistura asfáltica ;
- Compactação pelo tráfego (má dosagem).

Atividades de M & R:

- Manutenção: tratamento superficial (reparo temporário) ou aplicação de areia quente, que deve ser imediatamente compactada e varrida após o resfriamento;
- Reabilitação: reciclagem.

12) *Agregados Polidos*

Causas:

- Ação abrasiva do tráfego, que elimina as asperezas e angularidades das partículas;
- Seleção dos materiais (agregados com pequena resistência à abrasão, como por exemplo, agregados de rochas calcárias).

Atividades de M & R:

- Manutenção: tratamento superficial ou lama asfáltica
- Reabilitação: reciclagem ou recapeamento delgado
- Reconstrução: novos materiais ou reciclados

13) *Desgaste*

Causas:

- Dosagem da mistura (falta de ligante);
- Problema construtivo (superaquecimento da mistura; falta de compactação, que resulta em envelhecimento precoce; agregados sujos, úmidos ou com pequena resistência à abrasão; segregação: com a ausência de agregados miúdos, há apenas poucos pontos de ligação entre partículas da matriz de agregados graúdos, facilitando a oxidação);
- Perda de adesividade ligante-agregado por ação de produtos químicos, água ou abrasão;
- Abertura ao tráfego antes de o ligante aderir ao agregado;
- Execução sob condições meteorológicas desfavoráveis.

Atividades de M & R:

- Manutenção: capa selante (reparo temporário), tratamento superficial ou lama asfáltica;
- Reabilitação: reciclagem ou recapeamento delgado.

14) *Desnível (Degrau) entre Pista e Acostamento*

Causas:

- Erosão do acostamento
- Consolidação do acostamento

Atividades de M & R:

- Recomposição do acostamento

15) *Bombeamento*

Causas:

- Existência de água nos vazios sob o revestimento;
- Pressão exercida pelas cargas do tráfego.

Atividades de M & R:

- Drenagem.

São consideradas, portanto, para os defeitos existentes nos pavimentos rígidos, as seguintes causas e estratégias de manutenção e reabilitação:

1) *Trincas de Canto*

Causas dos Defeitos:

- Transferência insuficiente de carga nas juntas;
- Recalques na fundação;
- Empenamento da placa;
- Bombeamento.

Atividades de M & R:

- Manutenção: selagem e injeção (reparos temporários);
- Reabilitação: recapeamento.

2) *Trincas Circulares*

Causas dos Defeitos:

- Pressões de expansão do ciclo gelo-degelo sobre o concreto com agregados susceptíveis à ação do congelamento.

Atividades de M & R:

- Manutenção: selagem e injeção (reparos temporários);
- Reabilitação: recapeamento (nos estágios avançados).

3) *Trincas Longitudinais*

Causas dos Defeitos:

- Empenamento térmico;
- Atraso na execução das juntas longitudinais;
- Fadiga;
- Perda de suporte da fundação.

Atividades de M & R:

- Manutenção: trincas com abertura menor que 3 mm não precisam ser preenchidas; trincas com abertura entre 3 e 20 mm devem ser limpas, com aplicação de selante (asfalto modificado com borracha ou elastômeros) e lançamento de areia sobre o selante;
- Reabilitação: trincas com abertura maior que 20 mm devem ser reparadas com remendo ou, no caso de estar previsto um recapeamento, devem ser preenchidas com concreto asfáltico de granulometria fina.

4) *Trincas Transversais*

Causas dos Defeitos:

- Retração volumétrica do concreto novo;
- Transferência insuficiente de carga nas juntas;
- Perda de suporte do subleito.

Atividades de M & R:

- Manutenção: selagem para evitar entrada de água e conseqüente enfraquecimento estrutural e injeção;
- Reabilitação: trincas com abertura maior que 20 mm devem ser reparadas com remendo ou, no caso de estar previsto um recapeamento, devem ser preenchidas com concreto asfáltico de granulometria fina.

5) *Deterioração do Selante*

Causas dos Defeitos:

- Selagem mal feita;
- Selante inadequado.

Atividades de M & R:

- Manutenção: substituição do selante.

6) – 7) *Eshorcinamento de Juntas*

Causas dos Defeitos:

- Tensão excessiva nas juntas devido às cargas de tráfego;
- Inexistência de selante nas juntas e trincas;
- Infiltração de material incompressível nas juntas ou trincas.

Atividades de M & R:

- Manutenção: selagem das juntas e/ou trincas, remendos com concreto;
- Reabilitação: recapeamento, reconstrução.

8) *Trincas Interligadas*

Causas dos Defeitos:

- Pressões de expansão do ciclo gelo-degelo sobre o concreto com agregados susceptíveis à ação do congelamento.

Atividades de M & R:

- Manutenção: selagem e injeção (reparos temporários);
- Reabilitação: recapeamento (nos estágios avançados).

9) *Agregados Polidos*

Causas dos Defeitos:

- Emprego de concreto de baixa qualidade;
- Ação abrasiva do tráfego, que elimina as asperezas e angularidades das partículas.

Atividades de M & R:

- Manutenção: estriagem, recapeamento delgado.

10) *Estilhaçamento*

Causas dos Defeitos:

- Excesso de vibração ou adição de água à massa;
- Grande quantidade de argamassa;
- Agregado de má qualidade;
- Cura inadequada.

Atividades de M & R:

- Manutenção: aplicação de um tratamento superficial ou recapeamento delgado.

11) *Alçamento Localizado*

Causas dos Defeitos:

- Restrições feitas à expansão linear do pavimento quando sujeito a temperaturas elevadas;
- Presença de material incompressível nas juntas e/ou trincas.

Atividades de M & R:

- Manutenção: remendo;
- Reabilitação: reconstrução.

12) *Desnível na Junta Transversal ou Trinca*

Causas dos Defeitos:

- Erosão do subleito ou sub-base;
- Bombeamento do subleito.

Atividades de M & R:

- Reabilitação: drenagem e recapeamento.

13) *Degrau Pista/ Acostamento*

Causas dos Defeitos:

- Erosão ou adensamento do acostamento.

Atividades de M & R:

- Reabilitação: recomposição do acostamento.

14) *Separação Pista/ Acostamento*

Causas dos Defeitos:

- Erosão do acostamento;
- Consolidação do acostamento.

Atividades de M & R:

- Reabilitação: recomposição do acostamento.

15) *Remendos*

16) *Bombeamento*

Causas dos Defeitos:

- Existência de água nos vazios sob o revestimento;
- Pressão exercida pelas cargas do tráfego.

Atividades de M & R:

- Reabilitação: drenagem.

4.1.4. Consideração das Atividades de M & R dos Pavimentos no HDM-4

A estrutura analítica do HDM-4 é baseada no conceito de análise do pavimento durante a vida em serviço, considerando:

- Deterioração da via;
- Efeitos durante a vida em serviço do pavimento;
- Efeitos dos usuários das vias;
- Efeitos ambientais e sócio-econômicos.

A taxa de deterioração do pavimento é diretamente afetada pelos padrões de manutenção e reabilitação aplicados para reparar os defeitos existentes no pavimento. A Figura 27 ilustra a tendência do desempenho de um pavimento, representado pela qualidade da superfície de rolamento, que é freqüentemente medida em termos do Índice Internacional de Irregularidade (International Roughness Index - IRI). Quando um padrão de manutenção e/ou reabilitação é definido, este impõe o limite mínimo que o nível de deterioração de um pavimento pode alcançar.

Figura 27 - Curva de Desempenho - análise de ciclos de vida durante o período de projeto.

Os benefícios econômicos dos investimentos na via são determinados pela comparação dos custos totais de várias estratégias de manutenção e reabilitação com uma alternativa base (sem manutenção ou com manutenção mínima). O HDM-4 foi desenvolvido para fazer comparações de estimativas de custos e análises econômicas de diferentes alternativas de investimentos.

O HDM-4, para cada atividade de manutenção e reabilitação, dispõe de dois critérios de intervenções no pavimento:

- Intervenção “programada”: é definido o intervalo de tempo entre as manutenções e/ou reabilitações no pavimento;
- Intervenção em função da evolução do defeito (“resposta”): é definido o critério de intervenção (taxa de deterioração do pavimento, com relação a um ou mais defeitos) para que se acione a atividade de manutenção ou reabilitação escolhida (por exemplo, para se executar um recapeamento opta-se por executá-lo sempre que o pavimento estiver com um $IRI \geq 5,0$). Portanto, toda vez que o pavimento, ao longo de sua vida em serviço, atingir o nível de deterioração pré-estabelecido, é executada a atividade de manutenção e/ou reabilitação escolhida.

a) Atividades de M & R nos Pavimentos Flexíveis Consideradas pelo HDM-4

Os defeitos considerados pelo HDM-4, para os pavimentos flexíveis, são divididos em três categorias:

- Defeitos no revestimento: trincas, desgaste, panelas e defeitos nos bordos (pavimento-acostamento);
- Deformações: deformação permanente nas trilhas de roda e irregularidade longitudinal;
- Textura Superficial: micro e macro texturas e resistência à derrapagem (coeficiente de atrito pneu - pavimento).

As atividades de manutenção e reabilitação, com os respectivos critérios para planejamento das intervenções consideradas pelo HDM-4, são:

a.1) Manutenção de Rotina

As atividades que compõem a manutenção de rotina são: recomposição de acostamento, selagem de trincas e remendos. A recomposição de acostamento tem como critério de intervenção a quantificação dos defeitos nos bordos do pavimento em m^2/km . Os critérios de intervenção da selagem de trincas são o número de trincas transversais por km e a porcentagem de trincas de severidade média e alta. O remendo tem os seguintes critérios: número de painéis por km, porcentagem de desgaste, porcentagem de área com deterioração acentuada e porcentagem de trincas com severidade média e alta.

a.2) Manutenção Preventiva

As atividades que compõem a manutenção preventiva são: impermeabilização asfáltica (banho de ligante asfáltico), rejuvenescimento, capa selante, tratamento superficial duplo, tratamento superficial simples e lama asfáltica.

A impermeabilização asfáltica e o rejuvenescimento têm como critérios de intervenção a porcentagem de desgaste e a porcentagem de área trincada. A lama asfáltica tem como critérios de intervenção a porcentagem de área trincada e a porcentagem de área deteriorada.

Para a execução da capa selante e dos tratamentos superficiais simples e duplo são feitas as seguintes manutenções preparatórias: remendo, reparo nos bordos do pavimento e selagem de trincas. A espessura do material utilizado tem que ser especificada de acordo com o material a ser utilizado. Os critérios de intervenção são porcentagem de desgaste, resistência à derrapagem, textura superficial, porcentagem de área trincada e porcentagem de área deteriorada.

a.3) Reabilitação

As atividades que compõem a reabilitação são: recapeamento com reciclagem, recapeamento com asfalto borracha, recapeamento com asfalto de graduação contínua, recapeamento com asfalto de graduação aberta e recapeamento delgado.

Os critérios de intervenção para a execução dos recapeamentos com reciclagem do pavimento, com asfalto borracha, com asfalto de graduação contínua e com asfalto de graduação aberta são: tráfego acumulado por faixa, número de painéis por km, porcentagem de desgaste, irregularidade longitudinal (IRI), profundidade da deformação permanente nas trilhas de roda, porcentagem de área trincada e porcentagem de área deteriorada. O recapeamento delgado, para a regularização do pavimento, possui os seguintes critérios de intervenção: número de painéis por km, porcentagem de desgaste, irregularidade longitudinal (IRI), profundidade da deformação permanente nas trilhas de roda, resistência à derrapagem, textura superficial, porcentagem de área trincada e porcentagem de área deteriorada.

Para a execução dos recapeamentos com asfalto borracha, com asfalto de graduação contínua e com asfalto de graduação aberta são feitos, previamente, remendos e reparos nos bordos do pavimento (atividades de manutenção preparatórias). A espessura do material utilizado tem que ser especificada de acordo com o material a ser utilizado.

a.4) Reconstrução

Os critérios de intervenção são: tráfego acumulado por faixa, número de painéis por km, porcentagem de desgaste, irregularidade longitudinal (IRI), profundidade da deformação permanente nas trilhas de roda, porcentagem de área trincada e porcentagem de área deteriorada.

b) Atividades de M&R nos Pavimentos Rígidos Consideradas pelo Programa HDM-4

Os defeitos considerados pelo HDM-4, para os pavimentos rígidos consistem:

- Trincas;
- Degraus nas juntas ou nas trincas;
- Esborcinamento;
- Ruptura do concreto - “painéis” (quebra do concreto e perda de material);
- Perda de Serventia;
- Irregularidade longitudinal.

As atividades de manutenção e reabilitação, com os respectivos critérios para planejamento das intervenções consideradas pelo HDM-4, são:

b.1) Manutenção Preventiva

As atividades que compõem a manutenção preventiva são: restauração da transferência de carga, recomposição do acostamento, restauração da drenagem e selagem de juntas. As manutenções preventivas só dispõem do critério de intervenção programada.

b.2) Restauração

As atividades que compõem a restauração são: recomposição de placas, reparo em estilhaçamento (“remendo”), reparo em alçamento localizado, estriagem (“desgaste com diamante”).

A recomposição de acostamento tem como critério de intervenção a porcentagem de área trincada. Os critérios de intervenção de reparos em estilhaçamentos (remendos de grandes áreas) são: porcentagem de juntas deterioradas, número de “painéis” por km e porcentagem de esborcinamento. Os reparos em alçamentos localizados (remendos de pequenas áreas) têm como critério de intervenção a porcentagem de esborcinamento. Para a estriagem do pavimento (“desgaste com diamante”) são relacionados os seguintes critérios de intervenção: altura dos degraus (diferença de altura em trincas e juntas) e porcentagem de esborcinamento.

b.3) Reabilitação

As atividades que compõem a reabilitação são: recapeamentos com concreto aderido e com concreto não aderido. Os recapeamentos com concreto aderido e não aderido têm como critérios de intervenção: porcentagem de juntas deterioradas, número de “painéis” por km, irregularidade longitudinal (IRI) e porcentagem de área trincada.

4.2. CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS

Os custos dos usuários compreendem: os custos de operação dos veículos, os custos de tempo de viagem (para passageiros e cargas) e os custos devido a acidentes na via (perda de vida, desconforto dos usuários, danos aos veículos e a outros objetos transportados). Dentre os custos que compõem os custos de operação dos veículos tem-se os custos com combustíveis, pneus, óleo, reparos mecânicos, depreciação, utilização do veículo etc.

Os impactos da condição da via sobre os usuários são medidos em termos de custos e de outros efeitos sociais e ambientais. As vias podem trazer benefícios para a população e podem também provocar efeitos danosos como emissões de gases dos veículos, consumo de combustível, barulho do tráfego etc.

Para a determinação do custo total da modalidade rodoviária é muito importante a utilização de métodos quantitativos para a previsão do desempenho dos pavimentos e dos custos de operação dos veículos correspondentes, sob diferentes condições de pavimento, tipos de veículos, políticas de investimento e estratégias de manutenção. Neste trabalho, utiliza-se o programa de gerência HDM-4 com o objetivo de minimizar o custo total da modalidade rodoviária, minimizando assim o custo de operação dos veículos (responsável pela maior parcela dos custos rodoviários), otimizando os recursos investidos e reduzindo o número de acidentes e o tempo de viagens.

Dentre os dados considerados no programa HDM-4 incluem-se as características físicas da estrutura inicial (tipo e resistência do pavimento), a geometria da rodovia (largura, curvas horizontais e curvas verticais), características dos veículos (volume de tráfego e cargas por eixo) e características ambientais (altitude e pluviosidade). Pode-se obter, a partir do programa HDM-4, as características da superfície do pavimento ao longo do período de análise (dados como defeitos no pavimento e irregularidade longitudinal), a velocidade de operação dos veículos, as estratégias de manutenção e reabilitação, os custos de M & R, os custos de operação dos veículos etc.

A inter-relação entre os dados de entrada e os resultados obtidos no HDM-4 é a seguinte: a geometria da via e a irregularidade longitudinal da superfície do pavimento influenciam a velocidade de operação dos veículos; as características da superfície do pavimento (particularmente a irregularidade longitudinal) afetam o consumo de combustível e pneus e o desgaste dos equipamentos, influenciando também o risco de acidentes. A operação dos veículos afeta o meio-ambiente através da poluição do ar e da poluição sonora, esta última dependente tanto do barulho dos motores como da interação pneu-pavimento (FERNANDES JR., 1996b).

A partir do programa HDM-4 podem ser obtidos os efeitos dos usuários das vias para qualquer transporte motorizado e não-motorizado. Para cada tipo de veículo pode-se obter o respectivo custo operacional, diretamente relacionado à irregularidade longitudinal dos pavimentos. A Figura 28 ilustra o impacto da condição da via (representado em termos de IRI) sobre os custos das diferentes modalidades de transporte.

Figura 28 – Efeito da condição da via sobre os custos de operação dos veículos (KERALI, 2000).

Deve-se destacar que a falta ou atraso nas atividades de manutenção e reabilitação acarreta danos aos pavimentos que vão exigir, posteriormente, um volume de recursos mais elevado que os previstos originalmente. Além disso, o tráfego sobre pavimentos deteriorados aumenta consideravelmente os custos operacionais dos veículos, tendo como consequência maior consumo de combustível, maior desgaste dos pneus, maior tempo de viagem, maior desgaste dos componentes dos veículos, número maior de acidentes, redução do conforto etc.

Portanto, a partir dos conceitos vistos neste capítulo e com a utilização do programa HDM-4 foram obtidas as estratégias de intervenção dos pavimentos flexíveis e rígidos. A partir das atividades de M & R utilizadas no HDM-4 foram obtidos os custos de manutenção e reabilitação dos pavimentos flexíveis e rígidos e os custos de operação dos veículos ao longo do período de análise. Os fatores utilizados para o cálculo destes custos e os resultados dos custos de M & R e dos custos de operação dos veículos são apresentados no capítulo 5.

CAPÍTULO 5 – CUSTOS TOTAIS DE PAVIMENTOS

As parcelas que compõem os custos totais de um pavimento são os custos de construção, os custos de manutenção e reabilitação e os custos de operação dos veículos. A seguir são apresentados todos fatores utilizados para obtenção dos dimensionamentos dos pavimentos e das parcelas dos custos totais e os resultados dos dimensionamentos e custos dos pavimentos.

5.1. FATORES CONSIDERADOS NO DIMENSIONAMENTO E NOS CUSTOS DOS PAVIMENTOS

Os fatores considerados no dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos foram:

- Solicitações e volume de tráfego (cinco níveis);
- Período de projeto (três níveis);
- Resistência do subleito (três níveis);
- Materiais e estruturas das camadas (dois tipos de sub-base nos pavimentos rígidos - granulares e de concreto rolado).

5.1.1. Características dos Tráfegos Considerados

Os tráfegos considerados foram baseados em pesquisas feitas nos bancos de dados do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (rodovias do Sistema Rodoviário Federal - DNER, 2001) e do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (regionais de São José do Rio Preto, Bauru e São Paulo).

Portanto, os tráfegos considerados, para efeito da determinação das espessuras das camadas dos pavimentos rígidos e flexíveis e dos custos de operação dos veículos, têm as seguintes características:

a) Tipos de veículos e pesos por eixo

Estão sendo considerados neste trabalho, para efeito de dimensionamento, os veículos tipo O2C, O3C, 2C, 3C, 2C2, 3C2, 2S1, 2S2, 2S3 e 3S3. Nas composições do tráfego utilizadas no trabalho, em função do observado nas rodovias analisadas, foi considerado que 90% dos veículos estão carregados (cargas por eixo iguais ao limite legal) e 10% estão vazios (apenas tara). A partir do Código Brasileiro de Trânsito (1997) tem-se os Limites Legais de Carga por Eixo (em kN) para os veículos considerados (Tabela 9).

TABELA 9 – Limites Legais de Carga por Eixo para os veículos considerados (Código Brasileiro de Trânsito, 1997).

Tipos de Veículo	Esquema	Limite Legal de Carga/Eixo (kN)			
Leves e Utilitários		60	60		
O2C		60 (1)	100 (2)		
O3C		60 (1)	170 (2/3)		
2C		60 (1)	100 (2)		
3C		60 (1)	170 (2/3)		
2C2		60 (1)	100 (2)	100 (3)	100 (4)
3C2		60 (1)	170 (2/3)	100 (4)	100 (5)
2S1		60 (1)	100 (2)	100 (3)	
2S2		60 (1)	100 (2)	170 (3/4)	
2S3		60 (1)	100 (2)	250 (3/4/5)	
3S3		60 (1)	170 (2/3)	250 (4/5/6)	

OBS: (n) – número de eixos de cada veículo-tipo.

b) Classificação e composição dos tráfegos considerados

A classificação e composição dos tráfegos utilizados são apresentadas na Tabela 10.

TABELA 10 - Classificação e composição dos tráfegos utilizados.

Tipo de Veículo	Tráfego 1 Muito Leve	Tráfego 2 Leve	Tráfego 3 Médio	Tráfego 4 Pesado	Tráfego 5 Muito Pesado
Leves	201	1.522	3.044	4.566	8.040
Utilitários	63	473	946	1.419	2.520
O2C	12	99	198	300	480
O3C	24	153	308	460	955
2C	26	233	468	702	1.070
3C	24	188	376	564	955
2C2	0	8	16	24	20
3C2	0	1	2	4	5
2S1	1	5	10	12	5
2S2	13	90	178	270	520
2S3	25	185	368	550	990
3S3	11	43	86	129	440
Veículos comerciais/dia/faixa	136	1.005	2.010	3.015	5.440
Veículos/dia/faixa	400	3.000	6.000	9.000	16.000

c) Taxa de crescimento do tráfego considerado

A taxa de crescimento do tráfego foi considerada de acordo com resultados de pesquisas que estão em andamento no Departamento de Transportes da EESC/USP, de acordo com Melo (2002) e com dados fornecidos pelo DER-SP (Regional de Bauru). Portanto, para efeito de dimensionamento, foi considerada uma taxa de crescimento com progressão geométrica de 2,5% ao ano.

5.1.2. Períodos de Projeto Considerados

Os períodos de projeto utilizados para dimensionar os pavimentos flexíveis e rígidos foram 10 anos, 20 anos e 30 anos.

5.1.3. Características dos Subleitos Considerados

Para efeito de dimensionamento foram considerados os seguintes valores de capacidade de suporte do subleito: Baixa (CBR = 3%), Média (CBR = 12%) e Alta (CBR = 20%).

5.1.4. Estruturas das Camadas dos Pavimentos Considerados

Para efeito de dimensionamento, foram consideradas as seguintes estruturas das camadas dos pavimentos:

Figura 29 - 1º Pavimento-Tipo: Pavimento Flexível com as respectivas camadas.

Figura 30 – 2º Pavimento-Tipo: Pavimento Rígido com as respectivas camadas (sub-base de brita graduada).

Figura 31 – 3º Pavimento-Tipo: Pavimento Rígido com as respectivas camadas (sub-base de concreto rolado).

5.2. DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS

5.2.1. Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis pelo Método da AASHTO (1993)

Os principais fatores utilizados no dimensionamento dos pavimentos flexíveis pelo método da AASHTO (1993) foram:

a) Módulo de Resiliência do Subleito (M_R): foram obtidos a partir dos valores dos Índices de Suporte Califórnia (CBR) utilizados:

- CBR= 3% $\rightarrow M_R = 1700 \cdot CBR = 5.100 \text{ psi}$;
- CBR= 12% $\rightarrow M_R = 800 \cdot CBR = 9.600 \text{ psi}$;
- CBR= 20% $\rightarrow M_R = 800 \cdot CBR = 16.000 \text{ psi}$.

b) Nível de confiabilidade do projeto (R): 90%.

c) Desvio padrão normal (Z_R): -1,282.

d) Desvio padrão combinado (S_0): 0,45.

e) *Diferença entre o índice de serventia inicial e o índice de serventia final de projeto (ΔPSI): 2,2 (p_0 igual a 4,2 e p_t igual a 2,0).*

f) Módulos de Elasticidade e Coeficientes Estruturais das Camadas

f.1) Revestimento de Concreto Asfáltico:

- O módulo de elasticidade para um revestimento de CBUQ (E_{AC}) é igual a 440.000 psi;
- O coeficiente estrutural da camada de revestimento de concreto asfáltico (a_1) é igual a 0,44 (Figura 5).

f.2) Base Granular:

- O módulo de elasticidade para uma base granular (E_{BS}) com CBR igual a 80% é de 28.000 psi;
- O coeficiente estrutural da camada de base (a_2) é igual a 0,13 (Figura 6). O coeficiente de drenagem da base (m_2) é igual a 1,0.

f.3) Sub-Base Granular:

- O módulo de elasticidade para uma sub-base granular (E_{SB}) com CBR igual a 40% é de 17.000 psi;
- O coeficiente estrutural da camada de sub-base (a_3) é igual a 0,12 (Figura 7). O coeficiente de drenagem da sub-base (m_3) é igual a 1,0.

Resumindo, foram utilizados os seguintes valores dos coeficientes estruturais das camadas:

- Revestimento de Concreto Asfáltico: $E_{AC} = 440.000 \text{ psi} \rightarrow a_1 = 0,44$;
- Base Granular $\rightarrow E_{BS} = 28.000 \text{ psi} \rightarrow a_2 = 0,13$;
- Sub-base Granular $\rightarrow E_{SB} = 17.000 \text{ psi} \rightarrow a_3 = 0,12$

g) Resultados Obtidos a partir do Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis pela AASHTO (1993)

Os resultados dos dimensionamentos dos pavimentos flexíveis segundo o método da AASHTO/93, para cada tráfego considerado, encontram-se nas Tabelas 11 a 15.

TABELA 11 – Dimensionamento Tráfego 1 – Pavimentos Flexíveis (Método da AASHTO/93).

TRÁFEGO 1 – PAVIMENTO FLEXÍVEL - MÉTODO DA AASHTO/93				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	8,00	8,00	8,00
	Base	25,00	25,00	26,00
	Sub-base	28,00	15,00	0,00
20 anos	Revestimento	9,00	9,00	9,00
	Base	28,00	28,00	29,00
	Sub-base	31,00	15,00	0,00
30 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	33,00	33,00	34,00
	Sub-base	33,00	15,00	0,00

TABELA 12 – Dimensionamento Tráfego 2 – Pavimentos Flexíveis (Método da AASHTO/93).

TRÁFEGO 2 – PAVIMENTO FLEXÍVEL - MÉTODO DA AASHTO/93				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	36,00	36,00	37,00
	Sub-base	35,00	15,00	0,00
20 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	45,00	45,00	46,00
	Sub-base	38,00	17,00	0,00
30 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	50,00	50,00	53,00
	Sub-base	40,00	18,00	0,00

TABELA 13 – Dimensionamento Tráfego 3 – Pavimentos Flexíveis (Método da AASHTO/93).

TRÁFEGO 3 – PAVIMENTO FLEXÍVEL - MÉTODO DA AASHTO/93				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	43,00	43,00	43,00
	Sub-base	38,00	17,00	0,00
20 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	53,00	53,00	54,00
	Sub-base	41,00	18,00	0,00
30 anos	Revestimento	12,50	12,50	12,50
	Base	51,00	51,00	53,00
	Sub-base	44,00	20,00	0,00

TABELA 14 – Dimensionamento Tráfego 4 – Pavimentos Flexíveis (Método da AASHTO/93).

TRÁFEGO 4 – PAVIMENTO FLEXÍVEL - MÉTODO DA AASHTO/93				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	10,00	10,00	10,00
	Base	48,00	48,00	49,00
	Sub-base	40,00	17,00	0,00
20 anos	Revestimento	12,50	12,50	12,50
	Base	49,00	49,00	51,00
	Sub-base	43,00	19,00	0,00
30 anos	Revestimento	12,50	12,50	12,50
	Base	56,00	56,00	58,00
	Sub-base	46,00	20,00	0,00

TABELA 15 – Dimensionamento Tráfego 5 – Pavimentos Flexíveis (Método da AASHTO/93).

TRÁFEGO 5 – PAVIMENTO FLEXÍVEL - MÉTODO DA AASHTO/93				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	12,50	12,50	12,50
	Base	47,00	47,00	48,00
	Sub-base	41,00	18,00	0,00
20 anos	Revestimento	12,50	12,50	12,50
	Base	57,00	57,00	59,00
	Sub-base	46,00	20,00	0,00
30 anos	Revestimento	12,50	12,50	12,50
	Base	64,00	64,00	66,00
	Sub-base	48,00	22,00	0,00

5.2.2. Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis pelo Método do DNER (1981)

Os principais fatores utilizados no dimensionamento dos pavimentos flexíveis pelo método do DNER (1981) foram:

a) *Coefficiente de Equivalência Estrutural (k)*: foram obtidos em função dos materiais das camadas:

- Revestimento de CBUQ → $k = 2,0$;
- Base Granular → CBR = 80% → $k = 1,0$;
- Sub-base Granular → CBR = 40% → $k = 1,0$;
- Reforço → CBR = 20% → $k = 1,0$.

b) *Espessuras Mínimas de Revestimento Betuminoso*: Foram obtidas em função dos tráfegos considerados.

c) *Espessuras Mínimas das Camadas Granulares:* Foi adotada uma espessura mínima de 15 cm para as camadas de base, sub-base e reforço.

d) *Resultados Obtidos a partir do Dimensionamento dos Pavimentos Flexíveis pelo DNER (1981)*

Os resultados dos dimensionamentos dos pavimentos flexíveis segundo o método do DNER (1981), para cada tráfego considerado, encontram-se nas Tabelas 16 a 20.

TABELA 16 – Dimensionamento Tráfego 1 – Pavimentos Flexíveis (Método do DNER/ 1981).

TRÁFEGO 1 – PAVIMENTO FLEXÍVEL – MÉTODO DO DNER/1981				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	5,0	5,0	5,0
	Base	17,0	17,0	17,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	34,0	15,0	0,0
20 anos	Revestimento	7,5	7,5	7,5
	Base	18,0	18,0	18,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	32,0	15,0	0,0
30 anos	Revestimento	10,0	10,0	10,0
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	33,0	15,0	0,0

TABELA 17 – Dimensionamento Tráfego 2 – Pavimentos Flexíveis (Método do DNER/ 1981).

TRÁFEGO 2 – PAVIMENTO FLEXÍVEL – MÉTODO DO DNER/1981				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	10,0	10,0	10,0
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	35,0	15,0	0,0
20 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	34,0	15,0	0,0
30 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	36,0	15,0	0,0

TABELA 18 – Dimensionamento Tráfego 3 – Pavimentos Flexíveis (Método do DNER/ 1981).

TRÁFEGO 3 – PAVIMENTO FLEXÍVEL – MÉTODO DO DNER/1981				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	33,0	15,0	0,0
20 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	37,0	15,0	0,0
30 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	40,0	15,0	0,0

TABELA 19 – Dimensionamento Tráfego 4 – Pavimentos Flexíveis (Método do DNER/ 1981).

TRÁFEGO 4 – PAVIMENTO FLEXÍVEL – MÉTODO DO DNER/1981				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	35,0	15,0	0,0
20 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	39,0	15,0	0,0
30 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	16,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	40,0	15,0	0,0

TABELA 20 – Dimensionamento Tráfego 5 – Pavimentos Flexíveis (Método do DNER/ 1981).

TRÁFEGO 5 – PAVIMENTO FLEXÍVEL – MÉTODO DO DNER/1981				
Período	Camadas (cm)	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	15,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	38,0	15,0	0,0
20 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	17,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	40,0	15,0	0,0
30 anos	Revestimento	12,5	12,5	12,5
	Base	19,0	15,0	15,0
	Sub-base	20,0	0,0	0,0
	Reforço	40,0	15,0	0,0

5.2.3. Dimensionamento dos Pavimentos Rígidos pelo Método da PCA (1984)

Os principais fatores utilizados no dimensionamento dos pavimentos rígidos pelo método do PCA (1984) foram:

a) Fator de Segurança de Carga: A partir dos tráfegos considerados, o fator de segurança para carga é igual a 1,2.

b) Resistência Característica do Concreto: Foi utilizada $f_{ctM,k}$ igual a 4,5 MPa.

c) Coeficiente de Recalque do Subleito ou do Sistema Subleito - Sub-base: foram obtidos a partir dos valores dos Índices de Suporte Califórnia (CBR) utilizados.

- CBR = 3% → $k = 24$ MPa/m;
- CBR = 12% → $k = 53$ MPa/m;
- CBR = 20% → $k = 63$ MPa/m.

Nos pavimentos rígidos foram considerados pavimentos com estruturas de camadas diferentes: com sub-base granular e com sub-base de concreto rolado.

c.1) Sub-bases Granulares

No caso de sub-bases granulares, considerando uma espessura de 15 cm, foram utilizados os seguintes coeficientes de recalque (k_{sist}):

- CBR = 3% $\rightarrow k = 24 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{sist} = 31 \text{ MPa/m}$;
- CBR = 12% $\rightarrow k = 53 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{sist} = 62 \text{ MPa/m}$;
- CBR = 20% $\rightarrow k = 63 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{sist} = 72 \text{ MPa/m}$.

Ao utilizar sub-bases, tem-se que considerar a perda de suporte do material utilizado na mesma. Para sub-bases granulares, a perda de suporte da sub-base (LS) pode variar de 1 a 3. Neste trabalho foi considerada uma perda de suporte das sub-bases granulares igual a 1, portanto:

- CBR= 3% $\rightarrow k = 24 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{sist} = 31 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{corrigido} = 16 \text{ MPa/m}$;
- CBR= 12% $\rightarrow k = 53 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{sist} = 62 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{corrigido} = 27 \text{ MPa/m}$;
- CBR= 20% $\rightarrow k = 63 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{sist} = 72 \text{ MPa/m} \rightarrow k_{corrigido} = 30 \text{ MPa/m}$.

Com os valores corrigidos do coeficiente de recalque (a partir da perda de suporte considerada) verificou-se que não ocorreu aumento do coeficiente com a utilização de 15 cm de sub-base granular. A partir daí, será utilizada uma sub-base granular de 10 cm, apenas com a função de uniformizar o suporte do subleito (camada sem função estrutural) e de evitar o bombeamento (para efeito de dimensionamento, foi considerado que a placa está diretamente apoiada no subleito).

c.2) Sub-bases de Concreto Rolado

Para o dimensionamento com sub-base de concreto rolado, foram considerados $f_{ctM,k}$ igual a 1,5 MPa e espessura do concreto rolado de 10 cm.

d) Tipo de Junta Transversal (com barra de transferência): No dimensionamento, foi considerada a utilização de pavimento rígido do tipo Pavimento de concreto simples, com barras de transferência de carga.

e) Tipo de Acostamento (se de concreto ou não): Foram considerados pavimentos com acostamento de concreto.

f) Resultados Obtidos a partir do Dimensionamento dos Pavimentos Rígidos pelo Método da PCA (1984)

Os resultados dos dimensionamentos dos pavimentos rígidos segundo o método da PCA (1984), para cada tráfego e sub-base considerados, encontram-se nas Tabelas 21 a 25. Sub-bases de concreto rolado só foram consideradas para baixa capacidade de suporte do subleito (CBR = 3%) e volumes de tráfego elevados.

TABELA 21 – Dimensionamento Tráfego 1 – Pavimentos Rígidos (Método da PCA/ 1984).

TRÁFEGO 1 – PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO DA PCA/84						
Período	Sub-base Granular – e = 10 cm			Sub-base de Concreto Rolado – e = 10 cm		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	20	18	18	-	-	-
20 anos	21	19	19	-	-	-
30 anos	22	19	19	-	-	-

TABELA 22 – Dimensionamento Tráfego 2 – Pavimentos Rígidos (Método da PCA/ 1984).

TRÁFEGO 2 – PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO DA PCA/84						
Período	Sub-base Granular – e = 10 cm			Sub-base de Concreto Rolado – e = 10 cm		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	22	20	19	-	-	-
20 anos	24	20	20	19	-	-
30 anos	25	21	21	20	-	-

TABELA 23 – Dimensionamento Tráfego 3 – Pavimentos Rígidos (Método da PCA/ 1984).

TRÁFEGO 3 – PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO DA PCA/84						
Período	Sub-base Granular – e = 10 cm			Sub-base de Concreto Rolado – e = 10 cm		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	23	20	20	18	-	-
20 anos	25	21	21	20	-	-
30 anos	27	21	21	22	-	-

TABELA 24 – Dimensionamento Tráfego 4 – Pavimentos Rígidos (Método da PCA/ 1984).

TRÁFEGO 4 – PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO DA PCA/84						
Período	Sub-base Granular – e = 10 cm			Sub-base de Concreto Rolado – e = 10 cm		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	24	21	20	19	-	-
20 anos	26	21	21	21	-	-
30 anos	28	22	22	23	-	-

TABELA 25 – Dimensionamento Tráfego 5 – Pavimentos Rígidos (Método da PCA/ 1984).

TRÁFEGO 5 – PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO DA PCA/84						
Período	Sub-base Granular – e = 10 cm			Sub-base de Concreto Rolado – e = 10 cm		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
10 anos	26	21	21	21	-	-
20 anos	28	22	22	23	-	-
30 anos	29	22	22	24	-	-

5.2.4. Dimensionamento dos Pavimentos Rígidos pelo Método da AASHTO (1993)

Os principais fatores utilizados no dimensionamento dos pavimentos rígidos pelo método do AASHTO (1993) foram:

a) Módulo de Resiliência (M_R) e Módulo de Reação do Subleito (k): foram obtidos a partir dos valores dos Índices de Suporte Califórnia (CBR):

- CBR = 3% $\rightarrow k = 24 \text{ MPa/m} \rightarrow M_R = 1.700 \cdot \text{CBR} = 5.100 \text{ psi} \rightarrow k = 88,42 \text{ pci}$;
- CBR = 12% $\rightarrow k = 53 \text{ MPa/m} \rightarrow M_R = 800 \cdot \text{CBR} = 9.600 \text{ psi} \rightarrow k = 195,25 \text{ pci}$;
- CBR = 20% $\rightarrow k = 63 \text{ MPa/m} \rightarrow M_R = 800 \cdot \text{CBR} = 16.000 \text{ psi} \rightarrow k = 232,09 \text{ pci}$.

O módulo de reação do subleito, utilizado para quantificar a capacidade de suporte dos solos, é função das condições locais. Ao utilizar sub-bases no dimensionamento, deve-se corrigir o valor do módulo de reação do subleito. Nos pavimentos rígidos foram considerados pavimentos com estruturas de camadas diferentes: com sub-base granular e com sub-base de concreto rolado.

a.1) Sub-bases Granulares

No caso de sub-bases granulares, considerando uma espessura de 15 cm e um módulo de elasticidade da sub-base granular (E_{SB}) de 40.000 psi, foram obtidos os seguintes valores de módulos de reação do sistema subleito-sub-base:

- CBR = 3% $\rightarrow k = 88,42 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 340 \text{ pci}$;
- CBR = 12% $\rightarrow k = 195,25 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 550 \text{ pci}$;
- CBR = 20% $\rightarrow k = 232,09 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 720 \text{ pci}$.

Considerando uma perda de suporte de 1,0, para sub-bases granulares, foram obtidos os seguintes valores corrigidos de módulos de reação:

- $\text{CBR} = 3\% \rightarrow k = 88,42 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 340 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{corrigido}} = 120 \text{ pci};$
- $\text{CBR} = 12\% \rightarrow k = 195,25 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 550 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{corrigido}} = 170 \text{ pci};$
- $\text{CBR} = 20\% \rightarrow k = 232,09 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 720 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{corrigido}} = 210 \text{ pci}.$

Com os valores corrigidos de coeficiente de recalque para $\text{CBR} = 12\%$ e $\text{CBR} = 20\%$, a partir da perda de suporte considerada, verificou-se que não ocorreu aumento do coeficiente com a utilização de 15 cm de sub-base granular. A partir daí, foi utilizada uma sub-base granular de 10 cm, apenas com a função de uniformizar o suporte do subleito (camada sem função estrutural) e de evitar o bombeamento (para efeito de dimensionamento foi considerado que a placa está diretamente apoiada no subleito).

a.2) Sub-bases de Concreto Rolado

No caso de sub-bases de concreto rolado, considerando-se uma espessura de 10 cm e um módulo de elasticidade da sub-base (E_{SB}) de 1.000.000 psi, foram obtidos os seguintes valores de módulos de reação do sistema subleito-sub-base:

- $\text{CBR} = 3\% \rightarrow k = 88,42 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 500 \text{ pci};$
- $\text{CBR} = 12\% \rightarrow k = 195,25 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 800 \text{ pci};$
- $\text{CBR} = 20\% \rightarrow k = 232,09 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 1.250 \text{ pci}.$

Considerando uma perda de suporte de zero, para sub-bases de concreto rolado, foram obtidos os seguintes valores corrigidos de módulos de reação:

- $\text{CBR} = 3\% \rightarrow k = 88,42 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 500 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{corrigido}} = 540 \text{ pci};$
- $\text{CBR} = 12\% \rightarrow k = 195,25 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 800 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{corrigido}} = 870 \text{ pci};$
- $\text{CBR} = 20\% \rightarrow k = 232,09 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{sist}} = 1.250 \text{ pci} \rightarrow k_{\text{corrigido}} = 1.300 \text{ pci}.$

b) Tipo de Pavimento considerado: Foi considerada a utilização de pavimento rígido do tipo Pavimento de concreto simples, com barras de transferência de carga.

c) Tipo de Acostamento (se de concreto ou não): Foram considerados pavimentos com acostamento de concreto.

5.3. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS PAVIMENTOS

Os fatores considerados no cálculo dos custos de construção dos pavimentos flexíveis e rígidos foram:

- Solicitações e volume de tráfego;
- Período de projeto;
- Resistência do Subleito;
- Materiais e estruturas das camadas (dois tipos de sub-base nos pavimentos rígidos - granulares e de concreto rolado);
- Espessuras das Camadas – de acordo com os métodos de dimensionamento dos pavimentos.

5.3.1. Custos Unitários de Construção de Pavimentos

O cálculo dos custos de construção foi feito a partir da Tabela de Preços Unitários do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 2001). Os custos com *serviços preliminares* (sondagens, levantamento topográfico, locações etc.), com *terraplenagem* (limpeza do terreno, escavação, transporte de material, compactação etc.), com *obras de arte*, com *obras de contenção geotécnica* e com *serviços complementares* (implantação de sinalização, colocação de gramas etc.) foram considerados comuns aos pavimentos rígidos e flexíveis. Portanto, não foram inseridos nos cálculos de custos de construção deste trabalho.

Na Tabela 31 apresentam-se os Preços Unitários do DER-SP utilizados para o cálculo dos custos de construção dos pavimentos flexíveis e rígidos. Os preços que constam nesta tabela são os preços totais para execução dos serviços.

Dentro do item reforço de subleito foram incluídos os custos de escavação do solo escolhido (R\$2,06/m³), de transporte do solo até 10km (R\$0,61/m³.km) e de compactação do solo na Energia Intermediária, GC = 100% (R\$1,46/m³). Dentro do item reforço de subleito (acostamento) estão incluídos os custos de escavação do solo escolhido (R\$2,06/m³), de transporte do solo até 5km (R\$0,73/m³.km) e de compactação do solo na Energia Intermediária, GC = 100% (R\$1,46/m³).

TABELA 31 – Preços Unitários utilizados para a composição dos custos de construção (DER-SP, 2001).

Descrição	Unidade	Preço Unitário (R\$)
Compactação de aterro maior/ igual a 95% PN	m ³	1,07
Transporte de 1ª/ 2ª categoria trator + pá carregadeira	m ³ × km	0,81
Escavação 1ª/ 2ª categoria trator + pá carregadeira	m ³	2,05
Reforço de Subleito	m ³	9,62
Reforço de Subleito (acostamento)	m ³	7,17
Sub-base de solo brita – 50% de brita (acostamento)	m ³	25,16
Sub-base de Concreto Pobre Rolado	m ³	96,04
Sub-base de brita graduada simples	m ³	53,40
Sub-base de solo brita – 60% de brita	m ³	26,51
Sub-base de solo brita – 70% de brita	m ³	33,34
Imprimadura Betuminosa Impermeabilizante	m ²	1,30
Imprimadura Betuminosa Ligante	m ²	0,63
Concreto Asfáltico Usinado à Quente - Binder	m ³	181,14
Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CBUQ)	m ³	219,12
Pavimento de Concreto Mecânico	m ³	255,05

5.3.2. Resultados dos Custos de Construção de Pavimentos

Para efeito de cálculo, estão sendo utilizados largura da pista de 7,20 m, acostamento de 2,8 m e extensão do trecho de 100 km. Nas Tabelas 32 e 33 constam os resultados dos custos de construção dos pavimentos flexíveis e nas Tabelas 34 e 35 constam os resultados dos custos de construção dos pavimentos rígidos, a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP. Os parâmetros relacionados a esses custos de construção são:

- Tipo de tráfego: tráfego 1 ao tráfego 5;
- Períodos de projeto: 10 anos, 20 anos e 30 anos;
- CBR do subleito: CBR = 3%, CBR = 12% e CBR = 20%.
- Métodos de dimensionamento de cada pavimento (dois métodos para cada pavimento);
- Materiais e estruturas das camadas (nos pavimentos rígidos, sub-bases granulares e de concreto rolado);

TABELA 32 - Resultados dos Custos de Construção (R\$ x 10⁶) dos Pavimentos Flexíveis a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP.
- Pavimentos dimensionados pelo Método do AASHTO (1993).

CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (R\$ x 10 ⁶) DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DA AASHTO (1993)									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	34,38	30,51	26,75	37,91	33,15	29,39	43,54	38,33	34,57
2	45,39	39,62	35,76	50,60	44,51	39,97	53,12	46,59	42,29
3	49,93	43,83	39,12	54,31	47,55	42,79	59,32	52,23	47,30
4	52,23	45,58	41,04	58,41	51,32	46,62	61,73	54,48	49,05
5	57,17	50,31	45,55	62,02	54,77	49,34	65,22	57,76	51,87

TABELA 33 - Resultados dos Custos de Construção (R\$ x 10⁶) dos Pavimentos Flexíveis a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP
- Pavimentos dimensionados pelo Método do DNER (1981).

CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (R\$ x 10 ⁶) DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DO DNER (1981)									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	31,28	23,17	21,60	35,36	27,62	26,05	37,29	29,45	27,88
2	37,49	29,56	27,99	40,72	33,04	31,47	43,44	35,13	33,56
3	40,61	33,04	31,47	43,55	35,13	33,56	43,87	35,13	33,56
4	40,82	33,04	31,47	43,77	35,13	33,56	44,26	35,24	33,67
5	43,65	35,13	33,56	44,54	35,24	33,67	47,85	37,97	36,40

TABELA 34 – Resultados dos Custos de Construção (R\$ x 10⁶) dos Pavimentos Rígidos a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP
- Pavimentos dimensionados pelo Método da PCA/84.

CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (R\$ x 10⁶) DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DA PCA (1984) – SUB-BASE DE BRITA GRADUADA									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	70,44	63,91	63,91	72,32	65,79	65,79	75,58	67,17	67,17
2	76,97	70,44	68,56	80,73	70,44	70,44	83,99	73,70	72,32
3	80,23	71,82	71,82	83,99	73,70	73,70	87,75	73,70	73,70
4	82,11	73,70	71,82	85,87	73,70	73,70	89,63	75,58	75,58
5	85,87	73,70	73,70	89,63	75,58	75,58	92,90	76,97	75,58
CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (R\$ x 10⁶) DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DA PCA (1984) – SUB-BASE DE CONCRETO ROLADO									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	78,74	-	-	82,01	-	-
3	78,25	-	-	82,01	-	-	85,77	-	-
4	80,13	-	-	83,89	-	-	87,65	-	-
5	83,89	-	-	87,65	-	-	90,91	-	-

TABELA 35 – Resultados dos Custos de Construção (R\$ x 10⁶) dos Pavimentos Rígidos a partir da Tabela de Preços Unitários do DER-SP
- Pavimentos dimensionados pelo Método da AASHTO/93.

CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (R\$ x 10⁶) DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DA AASHTO (1993) – SUB-BASE DE BRITA GRADUADA									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	59,34	49,57	48,19	63,10	53,33	51,95	68,25	61,25	59,86
2	76,16	69,16	69,16	81,80	76,68	74,80	88,83	81,83	81,83
3	81,65	74,97	74,97	87,26	82,45	80,58	94,26	87,58	87,58
4	84,92	80,10	80,10	92,39	87,58	85,71	99,39	92,71	92,71
5	91,92	88,50	85,24	99,39	95,98	94,58	107,79	102,98	102,98
CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (R\$ x 10⁶) DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DA AASHTO (1993) – SUB-BASE DE CONCRETO ROLADO									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	57,42	-	-	63,06	55,76	-	68,21	63,67	58,53
2	78,00	71,59	69,70	83,65	79,11	77,23	88,79	84,25	82,37
3	81,81	77,21	75,34	89,29	84,69	82,82	96,29	91,69	89,82
4	86,94	82,35	80,48	94,42	89,82	87,95	101,42	96,83	94,96
5	93,95	90,74	87,48	101,42	98,22	94,96	109,82	105,22	103,35

5.4. CUSTOS DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DOS PAVIMENTOS

5.4.1. Atividades de M & R dos Pavimentos

Inicialmente, para a escolha das atividades de M & R dos pavimentos flexíveis e rígidos, foram analisadas todas as atividades do programa HDM-4, sendo escolhidas as que tiveram melhor desempenho em cada pavimento (flexível e rígido).

Dentre as atividades de M & R consideradas pelo HDM-4, foram utilizadas neste trabalho, para os pavimentos flexíveis, as seguintes: não fazer nada, remendo, capa selante, recapeamento e reconstrução. Para os pavimentos rígidos foram consideradas as seguintes atividades de M & R: não fazer nada, selagem de juntas, reparos em alçamentos localizados (“remendos de pequenas áreas”), recapeamento e recomposição de placas.

Para a execução de algumas atividades de M & R nos pavimentos flexíveis, a partir do programa, é necessário que se executem algumas atividades prévias de manutenção. Portanto, para a execução de capa selante é necessário que sejam feitos previamente, remendos, reparos nos bordos do pavimento e selagem de trincas. Para a execução de recapeamento e reconstrução é necessário que sejam feitos previamente, remendos e reparos nos bordos do pavimento.

5.4.2. Critérios de Intervenção das Atividades de M & R dos Pavimentos

Definidas as estratégias de M & R, foram verificados os melhores critérios de intervenção para cada atividade de M & R. Dentre os critérios do programa HDM-4, de acordo com as atividades de M & R dos pavimentos flexíveis citadas anteriormente, foram utilizados os seguintes critérios de intervenção:

- Remendos: quando o pavimento atingir uma área com deterioração acentuada maior ou igual a 20% da área do pavimento;

- Capa selante (25 mm de espessura, para todos os tráfegos): quando o pavimento atingir uma área com deterioração acentuada maior ou igual a 15% da área do pavimento;
- Recapeamento (50 mm): quando o pavimento atingir um valor de irregularidade longitudinal maior ou igual a 4,5 IRI;
- Reconstrução: quando o pavimento atingir um valor de irregularidade longitudinal maior ou igual a 6,5 IRI. A espessura do recapeamento varia com o tráfego:
 - Tráfegos 1 e 2: espessura de 50 mm;
 - Tráfego 3: espessura de 75 mm;
 - Tráfegos 4 e 5: espessura de 100 mm.

De acordo com as atividades de M & R dos pavimentos rígidos, citadas anteriormente, foram utilizados os seguintes critérios de intervenção:

- Para a execução de selagem de juntas com silicone considera-se o critério de intervenção “programada”. O intervalo entre as manutenções varia com o tráfego:
 - Tráfego 1: intervalo de 8 anos;
 - Tráfego 2: intervalo de 7 anos;
 - Tráfego 3 e 4: intervalo de 4 anos;
 - Tráfego 5: intervalo de 3 anos;
- Reparos em alçamentos localizados (“remendos de pequenas áreas”): quando o pavimento atingir um esborcinamento variando de 0,5% a 4%;
- Recapeamento (50 mm): quando o pavimento atingir um valor de irregularidade longitudinal maior ou igual a 3,5 IRI;
- Recomposição de placas: quando o pavimento atingir uma área com trincas entre 0,5% e 15% da área do pavimento.

5.4.3. Custos Unitários das Atividades de M & R de Pavimentos

Os custos unitários das atividades de M & R utilizadas nos pavimentos flexíveis e rígidos foram obtidos a partir da Tabela de Preços Unitários do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 2001) (Tabela 36).

TABELA 36 – Custos unitários das atividades de M & R dos pavimentos flexíveis e rígidos (DER-SP, 2001).

M & R dos pavimentos flexíveis		
Descrição	Unidade	Preço Unitário (R\$)
Execução de Selagem de trincas	m ²	18,00
Execução de Remendos	m ²	30,00
Execução de Capa Selante	m ²	39,00
Execução de Reparo nos bordos do pavimento	m ²	42,00
Execução do Recapeamento	m ²	54,00
Execução de Reconstrução	m ²	108,00
M & R dos pavimentos rígidos		
Execução de Selagem de Juntas	m ²	1,20
Execução de Reparos em Alçamentos Localizados	m ²	13,70
Execução de Recapeamento	m ²	13,70
Execução de Recomposição de Placas	m ²	17,00

Para a análise dos pavimentos ao longo do tempo foram considerados períodos de vida em serviço de 40 anos. A partir das manutenções utilizadas para cada pavimento, verificou-se o menor custo total em função do tipo de pavimento, do tráfego e da capacidade de suporte do subleito. São apresentados nas Tabelas 37 a 42 os custos das atividades de M & R dos pavimentos flexíveis e rígidos (relacionados aos menores custos totais), em função do tráfego, capacidade de suporte do subleito, períodos de projeto e de análise.

TABELA 37 – Custo de Manutenção (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para o Período de Projeto de 10 anos e de Análise de 10 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 12%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 20%	0,00	0,00	0,00	0,00
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 12%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 20%	0,00	0,00	0,00	0,00
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 12%	0,00	0,01	0,00	0,00
	CBR = 20%	0,00	0,00	0,00	0,00
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 12%	0,00	0,01	0,00	0,00
	CBR = 20%	0,00	0,01	0,00	0,00
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	64,80	0,00	32,40	0,00
	CBR = 12%	64,80	0,02	32,40	0,00
	CBR = 20%	64,80	0,01	32,40	0,00

TABELA 38 – Custo de Manutenção (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para o Período de Projeto de 10 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	97,23	0,08	64,82	0,06
	CBR = 12%	77,76	0,06	64,82	0,06
	CBR = 20%	77,76	0,08	64,82	0,06
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	162,01	0,91	129,61	0,87
	CBR = 12%	162,01	0,93	129,61	0,33
	CBR = 20%	162,01	0,94	129,61	0,25
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	226,80	2,15	194,40	2,11
	CBR = 12%	226,80	3,41	194,40	0,13
	CBR = 20%	226,80	2,82	194,40	0,12
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	259,20	2,14	226,80	0,07
	CBR = 12%	259,20	3,01	226,80	0,09
	CBR = 20%	259,20	3,58	259,20	0,07
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	388,80	0,95	388,80	0,06
	CBR = 12%	388,80	4,13	388,80	0,07
	CBR = 20%	421,20	3,63	388,80	0,08

TABELA 39 – Custo de Manutenção (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para o Período de Projeto de 20 anos e de Análise de 20 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 12%	0,00	0,00	0,00	0,00
	CBR = 20%	0,00	0,00	0,00	0,00
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	32,41	0,00	32,41	0,00
	CBR = 12%	32,41	0,02	32,41	0,00
	CBR = 20%	32,41	0,02	32,41	0,00
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	64,80	0,00	64,80	0,00
	CBR = 12%	64,80	0,02	64,80	0,00
	CBR = 20%	64,80	0,02	64,80	0,00
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	97,20	1,86	97,20	1,86
	CBR = 12%	97,20	1,89	97,20	1,86
	CBR = 20%	97,20	1,88	97,20	1,86
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	129,60	3,04	129,60	3,04
	CBR = 12%	129,60	3,08	129,60	3,04
	CBR = 20%	129,60	3,07	129,60	3,04

TABELA 40 – Custo de Manutenção (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para o Período de Projeto de 20 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	64,82	0,74	64,82	0,08
	CBR = 12%	64,82	0,73	64,82	0,10
	CBR = 20%	64,82	0,73	64,82	0,73
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	129,61	0,90	129,61	0,87
	CBR = 12%	157,68	0,93	129,61	0,07
	CBR = 20%	157,68	1,50	129,61	0,09
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	226,80	2,13	194,40	2,11
	CBR = 12%	226,80	2,27	194,40	0,07
	CBR = 20%	226,80	1,81	194,40	0,07
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	259,20	2,13	259,20	2,11
	CBR = 12%	259,20	3,01	259,20	0,06
	CBR = 20%	259,20	2,49	259,20	0,07
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	388,80	0,23	388,80	0,06
	CBR = 12%	388,80	3,20	388,80	0,06
	CBR = 20%	421,20	2,74	388,80	0,06

TABELA 41 – Custo de Manutenção (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para o Período de Projeto de 30 anos e de Análise de 30 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	0,00	0,68	0,00	0,00
	CBR = 12%	0,00	0,09	0,00	0,68
	CBR = 20%	0,00	0,69	0,00	0,68
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	92,88	0,86	97,21	0,86
	CBR = 12%	92,88	0,89	97,21	0,86
	CBR = 20%	92,88	0,88	97,21	0,86
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	129,60	2,06	129,60	2,06
	CBR = 12%	129,60	2,09	129,60	2,06
	CBR = 20%	157,68	2,09	129,60	2,06
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	162,00	2,06	162,00	2,06
	CBR = 12%	162,00	2,09	162,00	2,06
	CBR = 20%	194,40	2,09	162,00	2,06
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	226,80	3,28	226,80	3,28
	CBR = 12%	226,80	3,34	226,80	3,28
	CBR = 20%	259,20	3,33	226,80	3,28

TABELA 42 – Custo de Manutenção (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para o Período de Projeto de 30 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	64,82	0,70	64,82	0,70
	CBR = 12%	64,82	0,73	64,82	0,70
	CBR = 20%	64,82	0,71	64,82	0,70
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	129,61	0,87	129,61	0,87
	CBR = 12%	157,68	0,91	129,61	0,06
	CBR = 20%	157,68	0,86	129,61	0,07
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	226,80	2,13	194,40	2,11
	CBR = 12%	226,80	2,27	194,40	0,06
	CBR = 20%	226,80	1,81	194,40	0,06
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	259,20	0,13	259,20	2,11
	CBR = 12%	259,20	1,95	259,20	0,06
	CBR = 20%	259,20	1,58	259,20	0,06
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	388,80	0,13	388,80	0,06
	CBR = 12%	388,80	3,20	388,80	0,06
	CBR = 20%	421,20	2,74	388,80	0,06

5.5. CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS

Os custos de operação dos veículos foram obtidos do HDM-4 em função das atividades de M & R consideradas no trabalho, para um período de análise de 40 anos. São apresentados nas Tabelas 43 a 48 os custos de operação dos veículos em função do tráfego, capacidade de suporte do subleito, períodos de projeto e de análise.

TABELA 43 – Custo dos Usuários (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 10 anos e de Análise de 10 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	132,89	130,86	132,90	130,85
	CBR = 12%	132,90	130,89	132,86	130,89
	CBR = 20%	132,94	130,89	132,87	130,90
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	963,82	946,63	962,97	946,25
	CBR = 12%	963,92	946,94	962,44	946,54
	CBR = 20%	965,06	947,06	962,87	946,65
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	1.941,46	1.891,61	1.935,24	1.891,13
	CBR = 12%	1.941,62	1.892,86	1.933,73	1.891,65
	CBR = 20%	1.944,68	1.893,09	1.935,35	1.891,87
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	2.928,71	2.830,81	2.913,26	2.830,05
	CBR = 12%	2.930,63	2.832,92	2.911,04	2.830,78
	CBR = 20%	2.937,56	2.833,32	2.913,62	2.831,10
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	5.368,77	5.188,22	5.364,52	5.186,88
	CBR = 12%	5.371,94	5.193,44	5.360,93	5.188,07
	CBR = 20%	5.382,36	5.194,07	5.365,01	5.188,68

TABELA 44 – Custo dos Usuários (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 10 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	810,56	788,39	810,94	790,37
	CBR = 12%	813,82	788,68	809,63	788,76
	CBR = 20%	813,98	788,87	810,44	788,85
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	5.873,46	5.702,61	5.868,60	5.705,70
	CBR = 12%	5.875,02	5.706,18	5.867,60	5.708,19
	CBR = 20%	5.874,39	5.706,76	5.871,79	5.706,37
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	11.741,76	11.368,94	11.741,91	11.376,16
	CBR = 12%	11.742,30	11.380,68	11.729,66	11.383,27
	CBR = 20%	11.735,99	11.381,21	11.742,48	11.379,73
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	17.618,41	17.016,05	17.610,19	17.025,73
	CBR = 12%	17.621,78	17.025,78	17.602,76	17.029,30
	CBR = 20%	17.611,53	17.027,95	17.605,42	17.030,84
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	32.552,86	31.303,56	32.503,21	31.306,78
	CBR = 12%	32.560,78	31.302,79	32.494,73	31.318,28
	CBR = 20%	32.563,49	31.302,60	32.504,78	31.312,42

TABELA 45 – Custo dos Usuários (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos e de Análise de 20 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	307,23	298,56	307,02	298,50
	CBR = 12%	307,23	298,65	306,34	298,59
	CBR = 20%	307,93	298,67	306,82	298,67
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	2.218,68	2.159,42	2.214,52	2.158,81
	CBR = 12%	2.219,08	2.160,43	2.211,01	2.159,50
	CBR = 20%	2.220,13	2.160,64	2.214,64	2.159,80
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	4.441,22	4.313,14	4.440,07	4.311,52
	CBR = 12%	4.434,07	4.315,99	4.435,86	4.312,92
	CBR = 20%	4.441,02	4.316,50	4.441,15	4.313,52
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	6.664,49	6.451,45	6.651,18	6.451,17
	CBR = 12%	6.668,71	6.457,15	6.667,06	6.453,21
	CBR = 20%	6.658,77	6.458,24	6.651,96	6.454,00
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	12.265,48	11.829,19	12.268,64	11.826,73
	CBR = 12%	12.276,23	11.843,18	12.265,72	11.830,37
	CBR = 20%	12.269,89	11.845,93	12.270,34	11.829,97

TABELA 46 – Custo dos Usuários (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	809,77	788,39	810,23	788,40
	CBR = 12%	809,76	788,50	809,58	789,13
	CBR = 20%	811,14	788,75	809,78	788,75
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	5.879,78	5.700,87	5.866,48	5.704,22
	CBR = 12%	5.881,44	5.706,18	5.866,96	5.708,58
	CBR = 20%	5.876,65	5.706,34	5.866,75	5.707,11
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	11.739,48	11.372,68	11.739,72	11.373,91
	CBR = 12%	11.742,30	11.381,08	11.731,82	11.378,73
	CBR = 20%	11.735,99	11.382,90	11.741,40	11.381,53
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	17.615,51	17.025,01	17.589,45	17.022,21
	CBR = 12%	17.621,78	17.025,78	17.618,12	17.027,25
	CBR = 20%	17.611,53	17.027,53	17.590,51	17.027,12
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	32.545,39	31.309,77	32.564,98	31.313,78
	CBR = 12%	32.560,78	31.308,03	32.560,79	31.307,52
	CBR = 20%	32.563,49	31.311,41	32.493,62	31.312,64

TABELA 47 – Custo dos Usuários (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 30 anos e de Análise de 30 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	552,76	513,26	551,77	513,69
	CBR = 12%	554,19	513,87	547,16	513,41
	CBR = 20%	558,43	513,51	557,26	513,39
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	3.824,59	3.712,55	3.820,80	3.711,21
	CBR = 12%	3.823,40	3.715,01	3.817,85	3.714,98
	CBR = 20%	3.825,91	3.715,71	3.817,46	3.713,69
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	7.641,61	7.408,23	7.648,59	7.407,15
	CBR = 12%	7.644,70	7.415,08	7.645,37	7.411,82
	CBR = 20%	7.648,13	7.417,46	7.649,52	7.411,04
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	11.464,00	11.085,43	11.453,75	11.082,20
	CBR = 12%	11.472,39	11.098,17	11.451,46	11.088,32
	CBR = 20%	11.477,00	11.102,27	11.455,67	11.088,15
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	21.118,81	20.349,88	21.111,64	20.338,84
	CBR = 12%	21.137,04	20.376,62	21.109,05	20.347,40
	CBR = 20%	21.143,94	20.386,25	21.114,06	20.349,05

TABELA 48 – Custo dos Usuários (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 30 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	809,82	788,62	809,32	788,26
	CBR = 12%	809,99	788,50	808,96	789,01
	CBR = 20%	810,52	789,20	809,33	788,96
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	5.879,01	5.704,86	5.869,53	5.701,60
	CBR = 12%	5.881,44	5.707,18	5.864,67	5.707,50
	CBR = 20%	5.876,65	5.708,03	5.865,27	5.708,35
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	11.738,01	11.376,12	11.744,79	11.371,81
	CBR = 12%	11.742,30	11.381,08	11.740,01	11.382,48
	CBR = 20%	11.735,99	11.382,90	11.745,85	11.384,24
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	17.612,40	17.027,66	17.617,40	17.018,80
	CBR = 12%	17.621,78	17.027,58	17.614,82	17.028,59
	CBR = 20%	17.611,53	17.030,64	17.619,54	17.031,14
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	32.540,93	31.305,42	32.559,80	31.307,64
	CBR = 12%	32.560,79	31.308,02	32.556,84	31.313,62
	CBR = 20%	32.563,49	31.311,41	32.562,53	31.305,59

5.6. CUSTOS TOTAIS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E RÍGIDOS

A partir da soma das parcelas que compõem os custos totais dos pavimentos (custos de construção, de M & R e custos de operação dos veículos) foram obtidos os custos dos pavimentos flexíveis e rígidos. Os custos totais estão em função dos métodos de dimensionamentos, dos períodos de projeto, dos períodos de análise, dos tráfegos e das capacidades de suporte do subleito (Tabelas 49 a 54). Nas tabelas foram considerados os menores custos obtidos, entre os pavimentos com sub-base de concreto rolado e com sub-base granular.

TABELA 49 – Custo Total (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 10 anos e de Análise de 10 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	164,17	201,30	167,28	188,27
	CBR = 12%	156,07	194,80	163,37	180,46
	CBR = 20%	154,54	194,80	159,62	179,09
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	1001,31	1023,60	1008,36	1022,41
	CBR = 12%	993,48	1017,38	1002,06	1015,70
	CBR = 20%	993,05	1015,62	998,63	1015,81
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	1982,07	1969,86	1985,17	1972,78
	CBR = 12%	1974,66	1964,69	1977,56	1966,62
	CBR = 20%	1976,15	1964,91	1974,47	1966,84
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	2969,53	2910,94	2965,49	2914,97
	CBR = 12%	2963,67	2906,63	2956,62	2910,88
	CBR = 20%	2969,03	2905,15	2954,66	2911,20
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	5477,22	5272,11	5454,09	5278,80
	CBR = 12%	5471,87	5267,16	5443,64	5276,57
	CBR = 20%	5480,72	5267,78	5442,96	5273,92

TABELA 50 – Custo Total (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 10 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	939,07	858,91	910,14	847,85
	CBR = 12%	914,75	852,65	904,96	838,39
	CBR = 20%	913,34	852,86	902,01	837,10
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	6.072,96	5.780,49	6.043,60	5.782,73
	CBR = 12%	6.066,59	5.777,55	6.036,83	5.777,68
	CBR = 20%	6.064,39	5.776,26	6.037,16	5.775,78
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	12.009,17	11.449,34	11.986,24	11.459,92
	CBR = 12%	12.002,14	11.455,91	11.967,89	11.458,37
	CBR = 20%	11.994,26	11.455,85	11.976,00	11.454,82
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	17.918,43	17.098,32	17.889,22	17.110,72
	CBR = 12%	17.914,02	17.102,49	17.875,14	17.109,49
	CBR = 20%	17.902,20	17.103,35	17.905,66	17.111,01
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	32.985,31	31.388,40	32.949,18	31.398,76
	CBR = 12%	32.984,71	31.380,62	32.933,84	31.406,85
	CBR = 20%	33.018,25	31.379,93	32.939,13	31.397,74

TABELA 51 – Custo Total (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos e de Análise de 20 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	342,59	370,88	344,93	361,60
	CBR = 12%	334,85	364,44	339,49	351,92
	CBR = 20%	333,98	364,46	336,21	350,62
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	2.291,81	2.238,16	2.297,53	2.240,61
	CBR = 12%	2.284,53	2.230,89	2.287,93	2.236,18
	CBR = 20%	2.284,01	2.231,10	2.287,02	2.234,60
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	4.549,57	4.395,15	4.559,18	4.398,78
	CBR = 12%	4.534,00	4.389,71	4.548,21	4.395,37
	CBR = 20%	4.539,38	4.390,22	4.548,74	4.394,10
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	6.805,46	6.537,20	6.806,79	6.545,42
	CBR = 12%	6.801,04	6.532,74	6.815,58	6.542,65
	CBR = 20%	6.789,53	6.533,82	6.795,78	6.541,57
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	12.439,62	11.919,88	12.460,26	11.929,16
	CBR = 12%	12.441,07	11.921,84	12.450,09	11.929,39
	CBR = 20%	12.433,16	11.924,58	12.449,28	11.927,59

TABELA 52 – Custo Total (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	909,95	861,45	912,96	851,58
	CBR = 12%	902,20	855,02	907,55	842,56
	CBR = 20%	902,01	855,27	903,99	841,43
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	6.050,11	5.780,51	6.046,69	5.786,89
	CBR = 12%	6.072,16	5.777,55	6.041,08	5.785,33
	CBR = 20%	6.065,80	5.778,28	6.036,33	5.782,00
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	12.009,83	11.456,82	11.988,43	11.463,28
	CBR = 12%	12.004,23	11.457,05	11.973,77	11.461,25
	CBR = 20%	11.996,35	11.458,41	11.978,59	11.462,18
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	17.918,48	17.111,03	17.907,06	17.116,71
	CBR = 12%	17.916,11	17.102,49	17.928,64	17.114,89
	CBR = 20%	17.904,29	17.103,72	17.896,33	17.112,90
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	32.978,73	31.397,65	33.015,80	31.413,23
	CBR = 12%	32.984,82	31.386,81	33.004,36	31.403,56
	CBR = 20%	33.018,36	31.389,73	32.931,76	31.407,28

TABELA 53 – Custo Total (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 30 anos e de Análise de 30 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	590,05	589,52	595,31	581,90
	CBR = 12%	583,64	581,13	585,49	575,34
	CBR = 20%	586,31	581,37	591,83	572,60
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	3.960,91	3.795,42	3.971,13	3.800,86
	CBR = 12%	3.951,41	3.789,60	3.961,65	3.797,67
	CBR = 20%	3.952,35	3.788,91	3.956,96	3.796,38
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	7.815,08	7.496,06	7.837,51	7.503,47
	CBR = 12%	7.809,43	7.490,87	7.827,20	7.501,46
	CBR = 20%	7.839,37	7.493,25	7.826,42	7.500,68
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	11.670,26	11.175,14	11.677,48	11.183,65
	CBR = 12%	11.669,63	11.175,84	11.667,94	11.183,09
	CBR = 20%	11.705,07	11.179,94	11.666,72	11.182,92
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	21.393,46	20.444,07	21.403,66	20.449,91
	CBR = 12%	21.401,81	20.456,93	21.393,61	20.453,66
	CBR = 20%	21.439,54	20.465,16	21.392,73	20.455,31

TABELA 54 – Custo Total (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 30 anos e de Análise de 40 anos.

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	911,93	864,90	917,68	857,17
	CBR = 12%	904,26	856,40	912,11	850,96
	CBR = 20%	903,22	857,08	908,72	848,19
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	6.052,06	5.787,74	6.052,26	5.791,26
	CBR = 12%	6.074,25	5.781,79	6.040,87	5.789,39
	CBR = 20%	6.067,89	5.781,21	6.037,17	5.790,25
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	12.008,68	11.464,02	11.998,51	11.468,18
	CBR = 12%	12.004,23	11.457,05	11.986,64	11.470,12
	CBR = 20%	11.996,35	11.458,41	11.987,55	11.471,88
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	17.915,86	17.115,44	17.938,33	17.120,30
	CBR = 12%	17.916,22	17.105,11	17.928,50	17.121,36
	CBR = 20%	17.904,40	17.107,80	17.927,79	17.123,91
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	32.977,58	31.396,46	33.013,82	31.415,49
	CBR = 12%	32.987,56	31.388,19	33.003,40	31.416,66
	CBR = 20%	33.021,09	31.389,73	33.003,20	31.408,63

5.7. CUSTOS TOTAIS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E RÍGIDOS SEM ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO

Para verificar o efeito da utilização das estratégias de M & R, foram obtidos, a partir do HDM-4, os custos de operação dos veículos e os custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos, ao longo de um período de tempo, sem nenhuma atividade de manutenção e reabilitação e em função do tráfego, da capacidade de suporte do subleito e dos períodos de projeto e de análise.

Os custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos sem nenhuma atividade de M & R são apresentados nas Tabelas 55 a 60.

TABELA 55 – Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 10 anos (programado para 10 anos).

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	164,17	201,30	167,28	188,27
	CBR = 12%	156,07	194,80	163,37	180,46
	CBR = 20%	154,54	194,80	159,62	179,09
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	1001,31	1023,60	1008,36	1022,41
	CBR = 12%	993,48	1017,38	1002,06	1015,70
	CBR = 20%	993,05	1015,62	998,63	1015,81
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	1982,07	1.969,86	1985,17	1972,78
	CBR = 12%	1974,66	1.966,64	1977,56	1966,62
	CBR = 20%	1976,15	1.964,91	1974,47	1966,84
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	2969,53	2.910,94	2965,49	2914,97
	CBR = 12%	2963,67	2.906,70	2956,62	2910,88
	CBR = 20%	2969,03	2.907,19	2954,66	2911,20
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	5.663,70	5.272,11	5.533,76	5278,80
	CBR = 12%	5.682,77	5.269,64	5.512,57	5276,57
	CBR = 20%	5.873,80	5.270,19	5.523,10	5273,92

TABELA 56 – Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 10 anos (programado para 40 anos).

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	1.122,63	864,52	1.078,23	851,29
	CBR = 12%	1.114,70	859,38	1.059,58	845,51
	CBR = 20%	1.115,47	859,62	1.059,84	844,26
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	8.650,72	5.842,79	8.584,50	5.824,77
	CBR = 12%	8.643,66	5.854,90	8.504,65	5.832,49
	CBR = 20%	8.686,52	5.862,84	8.573,87	5.836,15
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	17.893,81	11.583,42	17.853,14	11.556,91
	CBR = 12%	17.929,61	11.675,57	17.705,42	11.579,03
	CBR = 20%	17.943,97	11.671,57	17.842,93	11.588,43
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	27.706,87	17.312,03	27.431,32	17.269,69
	CBR = 12%	27.801,30	17.465,53	27.294,42	17.306,71
	CBR = 20%	27.881,05	17.515,80	27.421,86	17.322,02
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	54.922,05	31.834,67	54.425,88	31.747,06
	CBR = 12%	54.959,39	32.401,86	54.039,65	31.830,17
	CBR = 20%	55.222,31	32.390,17	54.416,15	31.861,59

TABELA 57 – Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos (programado para 20 anos).

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	342,59	370,88	344,93	361,60
	CBR = 12%	334,85	364,44	339,49	351,92
	CBR = 20%	333,98	364,46	336,21	350,62
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	2.492,24	2.238,16	2.466,92	2.240,61
	CBR = 12%	2.485,33	2.232,14	2.381,44	2.236,18
	CBR = 20%	2.560,93	2.232,42	2.456,50	2.234,60
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	5.459,63	4.395,15	5.366,61	4.398,78
	CBR = 12%	5.585,18	4.392,79	5.212,76	4.395,37
	CBR = 20%	5.599,54	4.393,53	5.357,34	4.394,10
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	8.748,94	6.537,92	8.242,96	6.545,82
	CBR = 12%	8.867,18	6.539,76	8.223,22	6.543,29
	CBR = 20%	8.946,92	6.540,95	8.234,23	6.542,34
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	17.635,89	11.922,20	16.853,25	11.930,73
	CBR = 12%	17.770,39	11.943,79	16.479,29	11.931,51
	CBR = 20%	18.033,31	11.946,65	16.846,53	11.929,99

TABELA 58 – Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos (programado para 40 anos).

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	1.076,19	866,24	1.054,75	856,19
	CBR = 12%	1.068,45	860,99	1.035,83	848,54
	CBR = 20%	1.077,28	861,25	1.044,66	847,41
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	8.539,99	5.830,60	8.514,67	5.826,69
	CBR = 12%	8.533,08	5.854,90	8.429,19	5.832,12
	CBR = 20%	8.608,67	5.856,14	8.504,25	5.834,36
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	17.806,15	11.571,92	17.713,12	11.554,34
	CBR = 12%	17.931,70	11.648,24	17.559,28	11.571,32
	CBR = 20%	17.946,06	11.650,35	17.703,86	11.578,15
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	27.685,15	17.294,36	27.179,17	17.262,39
	CBR = 12%	27.803,39	17.465,53	27.159,43	17.291,91
	CBR = 20%	27.883,14	17.463,12	27.170,44	17.303,47
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	54.825,01	31.804,69	54.042,36	31.726,53
	CBR = 12%	54.959,50	32.266,24	53.668,40	31.795,04
	CBR = 20%	55.222,42	32.263,50	54.035,64	31.819,46

TABELA 59 – Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 30 anos (programado para 30 anos).

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	590,05	589,56	595,31	581,90
	CBR = 12%	583,64	581,62	585,49	575,55
	CBR = 20%	586,31	581,71	591,83	572,78
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	5.141,10	3.801,28	5.113,49	3.805,23
	CBR = 12%	5.134,27	3.804,38	5.028,28	3.803,55
	CBR = 20%	5.209,87	3.804,27	5.027,08	3.802,95
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	10.841,70	7.510,71	10.555,38	7.513,91
	CBR = 12%	10.968,84	7.534,64	10.404,07	7.515,38
	CBR = 20%	10.983,20	7.536,99	10.544,88	7.516,12
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	16.895,35	11.200,65	16.261,77	11.201,65
	CBR = 12%	17.094,55	11.248,81	16.246,61	11.206,83
	CBR = 20%	17.174,30	11.253,47	16.455,58	11.209,06
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	33.607,70	20.505,12	32.461,28	20.491,20
	CBR = 12%	33.748,29	20.676,31	32.102,26	20.507,84
	CBR = 20%	34.011,21	20.677,59	32.459,94	20.514,64

TABELA 60 – Custos Totais (sem manutenção) (R\$ x 10⁶) em Função do Tipo de Pavimento, do Método de Dimensionamento, do Volume de Tráfego e da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 30 anos (programado para 40 anos).

		DNER (F) e PCA (R)		AASHTO (F e R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO	FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	1.035,71	869,38	1.039,91	860,99
	CBR = 12%	1.031,73	862,38	1.021,81	856,05
	CBR = 20%	1.039,20	862,63	1.047,96	853,20
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	8.542,00	5.831,96	8.514,39	5.829,83
	CBR = 12%	8.535,17	5.852,65	8.429,18	5.834,27
	CBR = 20%	8.610,76	5.853,80	8.427,98	5.836,03
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	17.804,56	11.567,51	17.518,24	11.555,68
	CBR = 12%	17.931,70	11.648,24	17.366,93	11.569,85
	CBR = 20%	17.946,06	11.650,35	17.507,74	11.575,28
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	27.604,30	17.285,38	26.970,72	17.260,98
	CBR = 12%	27.803,50	17.425,39	26.955,56	17.286,15
	CBR = 20%	27.883,25	17.431,57	27.164,53	17.295,76
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	54.821,65	31.794,68	53.675,23	31.718,61
	CBR = 12%	54.962,24	32.267,63	53.316,22	31.777,22
	CBR = 20%	55.225,16	32.263,50	53.673,89	31.799,31

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresenta-se, a seguir, a análise da influência dos fatores considerados sobre os custos de construção, de M & R e de operação dos veículos, tanto para pavimentos flexíveis como para pavimentos rígidos, com base nos resultados apresentados no Capítulo 5.

6.1. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS PAVIMENTOS

6.1.1. Efeito dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos

a) Pavimentos Flexíveis

A partir do dimensionamento dos pavimentos flexíveis pelos métodos de dimensionamento do DNER (1981) e da AASHTO (1993) tem-se que, para todas as combinações de tráfego, tipo de subleito e período de projeto, os pavimentos dimensionados pelo método do DNER resultam em menores espessuras e, portanto, menores custos de construção (até 36% menores). Verifica-se também que o método da AASHTO é mais sensível à variação do tráfego que o método do DNER, ou seja, quanto maior o tráfego maior é a diferença de custos de construção entre os métodos de dimensionamento (Figura 32).

b) Pavimentos Rígidos

Os custos de construção dos pavimentos rígidos, dimensionados pelos métodos da PCA (1984) e da AASHTO (1993), dependem do tipo de sub-base adotada:

- Sub-bases de concreto rolado: o Método da PCA resulta sempre em menores custos de construção (até 17% menores);

- Sub-bases granulares: com o menor volume de tráfego considerado (Tráfego 1) tem-se que o Método da AASHTO resulta em menores espessuras e, portanto, menores custos de construção (até 25% menores). Com os demais tráfegos o Método da PCA resulta em menores custos de construção (até 36% menores).

FIGURA 32 – Custos de construção de pavimentos flexíveis em função do método de dimensionamento e do período de projeto (P), para capacidade de suporte do subleito igual a 12%.

Verifica-se, também, que o Método da AASHTO é mais sensível à variação do período de projeto e do tráfego e, portanto, a diferença de custos de construção aumenta para maiores períodos de projeto e maiores volumes de tráfego (Figuras 33 e 34).

Quanto aos efeitos do tipo de sub-base, tem-se:

- No dimensionamento pelo método da PCA, a sub-base de concreto rolado resulta em custos menores que a sub-base granular (até 2,5% menor);
- No dimensionamento pelo método da AASHTO, na maioria dos casos, a sub-base granular resulta em custos menores que a sub-base de concreto rolado (até 4,5% menor).

FIGURA 33 – Custos de construção de pavimentos rígidos em função do método de dimensionamento e do tipo de sub-base, para capacidade de suporte do subleito igual a 12% e período de projeto (P) igual a 20 anos.

FIGURA 34 – Custos de construção de pavimentos rígidos em função do método de dimensionamento e do tipo de sub-base, para capacidade de suporte do subleito igual a 12% e período de projeto (P) igual a 30 anos.

6.1.2. Efeito dos Tipos de Subleito

A capacidade de suporte do subleito é um fator significativo, chegando a acarretar diferenças de até 30% nos custos de construção de pavimentos flexíveis (Método do DNER) e de até 17% nos custos de construção de pavimentos rígidos (Método da PCA), conforme apresentado nas Figuras 35 e 36.

FIGURA 35 – Custos de construção de pavimentos flexíveis em função do método de dimensionamento e da capacidade de suporte do subleito, para período de projeto (P) igual a 30 anos.

FIGURA 36 – Custos de construção de pavimentos rígidos em função do método de dimensionamento e da capacidade de suporte do subleito, para período de projeto (P) igual a 30 anos.

6.1.3. Efeito dos Períodos de Projeto

O período de projeto tem maior influência no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER, com até 17% de diferença nos custos de construção, e no método de dimensionamento de pavimentos rígidos da AASHTO, chegando a acarretar diferenças de até 13% nos custos de construção.

6.1.4. Comparação dos Custos de Construção dos Pavimentos Flexíveis e Rígidos

Os custos de construção dos pavimentos flexíveis, para todas as combinações de tráfego, tipo de subleito e período de projeto, resultaram menores que os custos de construção de pavimentos rígidos, entre 44% e 60%, conforme exemplificado na Figura 37.

FIGURA 37 – Custos de Construção de Pavimentos Flexíveis e Rígidos em função da Capacidade de Suporte do Subleito, para um Período de Projeto de 20 anos.

6.2. CUSTOS DE M & R DOS PAVIMENTOS

Os custos de M & R dos pavimentos rígidos ficaram muito abaixo dos custos de M & R dos pavimentos flexíveis (custos de M & R dos pavimentos rígidos de no máximo 2,5% dos custos dos flexíveis) para todas as combinações de tráfego, tipo de subleito e período de projeto.

As Figuras 38, 39 e 40 mostram os efeitos das atividades de M & R de pavimentos rígidos sobre a irregularidade longitudinal. Pode-se observar a pequena variação da irregularidade longitudinal ao longo do tempo, o que resulta em pequena necessidade de M & R.

FIGURA 38 – Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA, para o menor volume de tráfego (Tráfego 1), capacidade de suporte do subleito igual a 3% e período de projeto de 10 anos.

Quanto aos pavimentos flexíveis, para os diferentes tráfegos, tipos de subleito e períodos de projeto, os pavimentos dimensionados pelo método da AASHTO, que têm maiores espessuras, resultam em menores custos de M & R (até 50% menores). Nota-se, também, que os custos de M & R são praticamente iguais para os pavimentos flexíveis com diferentes tipos de subleito (CBR de 3%, 12% e 20%), ou seja, os custos de M & R dos pavimentos flexíveis são pouco sensíveis à capacidade de suporte do subleito.

FIGURA 39 – Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA, para o menor volume de tráfego (Tráfego 3), capacidade de suporte do subleito igual a 3% e período de projeto de 10 anos.

FIGURA 40 – Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA, para o menor volume de tráfego (Tráfego 5), capacidade de suporte do subleito igual a 3% e período de projeto de 10 anos.

As Figuras 41, 42 e 43 exemplificam os efeitos das atividades de M & R sobre a irregularidade longitudinal dos pavimentos flexíveis, observando-se sua importância para o bom desempenho dos pavimentos.

FIGURA 41 – Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da DNER, para o menor volume de tráfego (Tráfego 1), capacidade de suporte do subleito igual a 3% e período de projeto de 10 anos.

FIGURA 42 – Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da DNER, para o menor volume de tráfego (Tráfego 3), capacidade de suporte do subleito igual a 3% e período de projeto de 10 anos.

FIGURA 43 – Curva de desempenho de pavimentos rígidos dimensionados pelo método da DNER, para o menor volume de tráfego (Tráfego 5), capacidade de suporte do subleito igual a 3% e período de projeto de 10 anos.

6.3. CUSTOS DE OPERAÇÃO DOS VEÍCULOS

6.3.1. Efeito dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos

Tanto para pavimentos flexíveis como para pavimentos rígidos não há diferença significativa dos custos de operação dos veículos em função dos métodos de dimensionamento. A maior diferença ocorre entre os Métodos DNER e AASHTO, para pavimentos flexíveis, mas não ultrapassa 1,5%.

6.3.2. Efeito dos Tipos de Subleito

Os custos de operação dos veículos são pouco afetados pelo tipo de subleito, com a maior variação de custos de operação ocorrendo para pavimentos flexíveis (1,85%). Isto porque os efeitos do tipo de subleito já são considerados no dimensionamento, ou seja, afetam principalmente os custos de construção.

6.3.3. Comparação dos Custos de Operação dos Veículos dos Pavimentos Flexíveis e Rígidos

Para todas as combinações de tráfego, tipo de subleito e período de projeto, os pavimentos rígidos resultam em menores custos de operação dos veículos, ficando entre 1,5% e 8% menores que os custos de operação dos veículos em pavimentos flexíveis (Figura 44).

FIGURA 44 – Custos dos usuários de pavimentos flexíveis e rígidos, para períodos de projeto (P) de 20 e 30 anos.

6.4. CUSTOS TOTAIS DOS PAVIMENTOS

6.4.1. Efeito dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos

a) Pavimentos Flexíveis

Os custos totais dos pavimentos flexíveis são influenciados pelo método de dimensionamento apenas para o menor volume de tráfego, em que a diferença atinge 4,68%. Para os outros volumes de tráfego, a diferença de custos totais em função do método de dimensionamento não ultrapassa 0,86%.

b) Pavimentos Rígidos

Os custos totais dos pavimentos rígidos dimensionados pelo método da PCA e da AASHTO diferem do seguinte modo:

- Tráfego 1: AASHTO resulta em custos menores (até 8,10% menor);
- Tráfegos 2 a 5: PCA e AASHTO resultam em custos totais praticamente iguais.
- Sub-base: custos totais para sub-bases granulares e de concreto rolado diferem de no máximo 1%.

6.4.2. Comparação dos Custos Totais dos Pavimentos Flexíveis e Rígidos

Como há enorme preponderância dos custos dos usuários sobre as outras parcelas do custo total, a análise comparativa entre pavimentos rígidos e flexíveis segue, de uma maneira geral, o mesmo que foi observado em termos de custos de operação dos veículos.

Exceto para menores volumes de tráfego e períodos de projeto mais curto (Tráfego 1 com períodos de projeto de 10 e 20 anos e Tráfego 2 com período de projeto de 10 anos), para todas as outras combinações de tráfegos, tipos de subleito e períodos de projeto, os pavimentos rígidos resultam em menores custos totais, sendo que a diferença varia entre 0,5 e 8%.

6.4.3. Efeito das Atividades de Manutenção e Reabilitação

A análise comparativa de situações com e sem atividades de M & R (Figura 45) mostra que os custos totais dos pavimentos rígidos são pouco sensíveis à política de manutenção e reabilitação, enquanto os pavimentos flexíveis dependem sobremaneira de uma adequada programação das atividades de M & R.

FIGURA 45 – Comparação dos custos totais dos pavimentos flexíveis e rígidos, para período de projeto de 20 anos.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho mostram que o custo inicial (custo de construção) de pavimentos rígidos é maior que o custo inicial de pavimentos flexíveis, conforme amplamente citado na literatura consultada e conhecido no meio técnico da pavimentação. Com base na Tabela de Preços Unitários do DER-SP, utilizada para comparação dos custos de construção, a diferença entre pavimentos rígidos e flexíveis ficou entre 40 e 60%.

Dentre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos, verifica-se que o método da AASHTO (1993) resulta em custos de construção bem maiores, tanto em relação ao método do DNER (1981) para pavimentos flexíveis como em relação ao método da PCA (1964) para pavimentos rígidos.

A capacidade de suporte do subleito teve grande influência nos custos de construção, mais acentuada quando do dimensionamento pelos métodos do DNER (pavimentos flexíveis) e da PCA (pavimentos rígidos), em que as diferenças chegaram a 30%. Nas outras parcelas do custo total, o efeito da capacidade de suporte foi irrelevante.

Comparando-se os custos de M & R dos pavimentos flexíveis e rígidos, obtidos a partir das estratégias de intervenção consideradas pelo programa HDM-4 e que resultam em custo total mínimo, constata-se que os custos de M & R dos pavimentos rígidos são muito inferiores aos dos pavimentos flexíveis. A variação da irregularidade longitudinal, principal parâmetro considerado pelo HDM-4 como deflagrador das atividades de M & R, é muito mais acentuada nos pavimentos flexíveis, evidenciando a necessidade de intervenções muito mais frequentes e onerosas, que se não executadas resultariam em aumento nos custos operacionais dos veículos.

Mesmo com as necessárias intervenções, os resultados do HDM-4 mostram que os custos de operação dos veículos em pavimentos flexíveis são maiores que os custos de operação dos veículos em pavimentos rígidos (até 8% maiores). A importância relativa dos custos de operação dos veículos, para pavimentos flexíveis e rígidos, aumenta com o crescimento do volume de tráfego, chegando a ultrapassar 95% dos custos totais.

Dada a importância dos custos de operação dos veículos, eles condicionam a análise comparativa dos custos totais. Desta forma, exceto para os menores volumes de tráfego e períodos de projeto mais curtos considerados nas análises com o programa HDM-4, os custos totais dos pavimentos flexíveis foram superiores aos custos totais dos pavimentos rígidos, em até 8%.

Estudos visando a calibração dos modelos de desempenho dos pavimentos rígidos, a exemplo do que tem ocorrido com os pavimentos flexíveis, poderão ser desenvolvidos mediante o acompanhamento de pavimentos rígidos em serviço. Sugere-se, também, estudo sobre as atividades de M & R bem como dos efeitos das estratégias de intervenção nos pavimentos consideradas pelo programa HDM-4.

O programa HDM-4 deve continuar a ser investigado detalhadamente, mediante análise de sensibilidade dos principais parâmetros (custos unitários, características do tráfego, tipos de pavimentos, atividades de M & R, taxa de desconto, custos dos atrasos e custos dos acidentes, dentre outros). Sugere-se, finalmente, estudos visando quantificar os efeitos dos acidentes, congestionamentos e impactos ambientais sobre os custos totais dos pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1972). *AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.

_____. (1993). _____. Washington, D.C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1975). *Execução de pavimentos de Concreto*. ABCP. São Paulo.

_____. (1991). *Pavimentação de Vias Urbanas com Concreto Pré-Misturado - Prática Recomendada*. BT 123-. ABCP. São Paulo.

_____. (1998a). *Concreto rolado: Aplicações em Pavimentação*. ET – 10. ABCP. São Paulo.

_____. (1998b). *Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/1984*. ET – 97. ABCP. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO RODOVIÁRIA BRASILEIRA (1978). *Catálogo dos Defeitos dos Revestimentos dos Pavimentos*. Tradução de Hugo Alves Pequeno. São Paulo.

ASTM C39-96. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

ASTM D1196/87. *ENSAIO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA*.

BASÍLIO, F.A. (1971). *Pavimentos de Concreto*. Conferência de Engenharia Civil da UFB. ABCP. São Paulo.

BENNETT, C.R.; PATERSON, W.D.O. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 5 - A Guide to Calibration and Adaption*. The Highway Development and Management Series.

CASTEDO, H. et al. (1990). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies. SHRP 87-P001.

CÓDIGO BRASILEIRO DE TRÂNSITO (1997) – Lei 9503 – 23 de Setembro de 1997.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991). *Manual de Normas de Pavimentação*. DER - SP.

_____. (2001). Tabela de Preços Unitários. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br>>. Acesso em: 13 ago. 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1975) *Reabilitação de Pavimentos - Materiais e Métodos* - Programa Editorial 601 - DNER - IPR. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis* - Programa Editorial 667 - MT-DNER – IPR, Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1989). *Manual de Pavimentos Rígidos – Projeto e Dimensionamento, Operação e Conservação*. Vol.2. MT-DNER - IPR. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, R.J.

_____. (2001). Relação das Rodovias do Sistema Rodoviário Federal. Disponível em: <http://www.dner.gov.br/rodovias/relacao_rodovias.htm>. DNER, Rio de Janeiro, R.J. Acesso em: 17 jul. 2001.

_____. (1978) Norma rodoviária com as terminologias de defeitos de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. DNER - TER 01/78. Rio de Janeiro, R.J.

_____. Norma rodoviária com as terminologias de defeitos de pavimentos rígidos. DNER - TER 49. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1994) Norma rodoviária para Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos. DNER - PRO 008/94. Rio de Janeiro, R.J.

_____. Norma rodoviária para Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Rígidos. DNER – PRO 50. Rio de Janeiro, R.J.

_____. Norma rodoviária para Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Rígidos. DNER – PRO 51. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1983) Norma para Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede. DNER – ES 128/83. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1986) Norma para Controle da Qualidade de Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede. DNER – ES 169/86. Rio de Janeiro, R.J.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (2002) SICRO II – Sistema de Custos Rodoviários. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. DNIT, Brasília. Acesso em 02 maio 2002.

DOMINGUES, F.A.A. (1993a). *MID - Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos*. São Paulo. LDIT/PTR/EPUSP.

_____. (1996). *Comparação econômica entre um trecho de pavimento asfáltico e um trecho de pavimento rígido da Rodovia dos Imigrantes, levando-se em conta os seus desempenhos durante 20 anos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 30., 1996, Salvador, BA, p. 1840 – 1872.

FERNANDES JR., J.L. (1996a). *Curso de Atualização em Sistemas de Gerência de Pavimentos*. Notas de Aula. FIPAI. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos. Jul. 1996.

_____. (1996b). *Considerações sobre a Importância de Treinamento e Pesquisa para a Implementação de Sistemas de Gerência de Pavimentos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 30., 1996, Salvador, BA.

FERNANDES JR., J.L.; ODA, S.; ZERBINI, L.F. (1999). *Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos*. Notas de Aula. FIPAI. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.

HAAS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. (1994). *Modern Pavement Management*. Krieger Publishing Co. Malamar, Florida.

HEUKELOM, W. e KLOMP, A.J.G. (1962) *Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction*. Proceedings of the First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Universidade de Michigan.

KERALI, H.G.R. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 1 – Overview of HDM-4*. The Highway Development and Management Series.

KERALI, H.G.R.; McMULLEN, D.; ODOKI, J.B. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 2 – Applications Guide*. The Highway Development and Management Series.

MELO, R.A. (2002). *Faixas adicionais para acluses de rodovias brasileiras*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

MOTTA, L.M.G. e RABELLO NETO, M.P. (1994). *Considerações a respeito do dimensionamento de pavimentos rígidos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 28., 1994, Belo Horizonte, M.G, p. 980 - 1012.

ODOKI, J.B.; KERALI, H.G.R. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 4 – Analytical Framework and Model Descriptions*. The Highway Development and Management Series.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1984) *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Canadian Edition, PCA, Ottawa, 1984.

SEVERI, A.A. (1997) *Considerações sobre os Custos dos Pavimentos Rígidos com Base em Conceitos de Gerência de Pavimentos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (1993). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. National Academy of Science. SHRP-H-348. Washington, D.C.

SMITH, R. E. et al. (1987). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. Federal Highway Administration. DTFH61-85-C-0095.

WIGHTMAN, D.C.; STANNARD, E.E.; DAKIN, J.M. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 3 – Software User Guide*. The Highway Development and Management Series.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975). *Principles of Pavement Design*. Second Edition. John Wiley & Sons. New York. P.17.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

AGUIAR, J. E. de (1987). *Construção de pavimentos de concreto com equipamento de fôrmas deslizantes*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 36 - 80.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1972). *AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.

_____. (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.

_____. (1993). _____. Washington, D.C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1975). *Execução de pavimentos de Concreto*. ABCP. São Paulo.

_____. (1977). *Dimensionamento dos Pavimentos Rodoviários de Concreto*. ET – 13. ABCP. São Paulo.

_____. (1989a). *Construção de Pavimentos de Concreto Simples*. ET – 81. ABCP. São Paulo.

_____. (1989b). *Execução de Pavimento de Concreto com Equipamento Reduzido – Prática Recomendada*. BT – 98. ABCP. São Paulo.

_____. (1991). *Pavimentação de Vias Urbanas com Concreto Pré-Misturado - Prática Recomendada*. BT 123-. ABCP. São Paulo.

_____. (1998a). *Concreto rolado: Aplicações em Pavimentação*. ET – 10. ABCP. São Paulo.

_____. (1998b). *Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/1984*. ET – 97. ABCP. São Paulo.

_____. (1999). Curso: Pavimento de Concreto/ Caderno do Aluno. ABCP. São Paulo.

_____. (2003) O mais econômico “estudo canadense mostra uma economia de combustível de 11%, ou mais, nas vias pavimentadas com concreto”. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cimento_hoje/ch_41/pavimentacao.htm>. ABCP. São Paulo. Acesso em 10 jan. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO (1991). *Manual de Pavimentação Urbana - Serviços de Pavimentação*. Volume III, Fascículo 2.

ASSOCIAÇÃO RODOVIÁRIA BRASILEIRA (1978). *Catálogo dos Defeitos dos Revestimentos dos Pavimentos*. Tradução de Hugo Alves Pequeno. São Paulo.

ASTM D1196/87. *ENSAIO DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA*.

ASTM C39-96. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

ASTM C78-94. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.

BALBO, J.T. (1997). *Pavimentos Asfálticos – Patologias e Manutenção*. Editora Plêiade. São Paulo.

BASÍLIO, F.A. (1971). *Pavimentos de Concreto*. Conferência de Engenharia Civil da UFB. ABCP. São Paulo.

BENNETT, C.R.; PATERSON, W.D.O. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 5 - A Guide to Calibration and Adaption*. The Highway Development and Management Series.

BERTOLLO, S.A.M. (1997) *Considerações sobre Gerência de Pavimentos Urbanos em Nível de Rede*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

BROKAW, M.P (1973). *Effect of serviceability and roughness of transverse joints on performance and design of plain concrete pavement*. In: Estados Unidos. Highway Research Record. *Evaluation of pavement surface properties and vehicle interaction*. Washington, D.C (HRR 471).

CARVALHO, M.D.; HALLACK, A. e DOMINGUES, F.A.A. (1994). *A questão da irregularidade longitudinal nos pavimentos rígidos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 28., 1994, Belo Horizonte, M.G, p. 830 – 978.

CARVALHO, M.D.; GROSSI, L.C.; IGNATTI, M.B. (1994). *Custos comparativos de pavimentos rígidos e flexíveis em áreas críticas de solicitação de tráfego*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 28., 1994, Belo Horizonte, M.G, p. 1146 – 1173.

CARVALHO, M.D.; HALLACK, A. e SILVA, E.L.S. (1996). *O Projeto HDM-IV/FICEM*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 30., 1996, Salvador, BA, p. 2089 - 2114.

CARVALHO, M.V.G.S.A. (1999). *Uma análise crítica de alguns processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis*. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, 1999.

CASTEDO, H. et al. (1990). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. SHRP 87-P001.

CASTRO NETO, A.M. et al. (1987). *A execução do pavimento rígido na duplicação da Pedro Taques*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 83 - 103.

CASTRO NETO, A.M.; GUAZZELLI, J.L.C.; GODINHO, D.P. (1987). *Dimensionamento e projeto do pavimento rígido na duplicação da Pedro Taques*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 104 -117.

CASTRO NETO, A.M. et al. (1987). *Controle tecnológico do pavimento rígido na duplicação da Pedro Taques*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 118 - 136.

CÓDIGO BRASILEIRO DE TRÂNSITO (1997) – Lei 9503 – 23 de Setembro de 1997.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991). *Manual de Normas de Pavimentação*. DER - SP.

_____. (2001). Tabela de Preços Unitários. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br>>. Acesso em: 13 ago. 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1975) *Reabilitação de Pavimentos - Materiais e Métodos* - Programa Editorial 601 - DNER - IPR. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis* - Programa Editorial 667 - MT-DNER - IPR, Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1989). *Manual de Pavimentos Rígidos - Projeto e Dimensionamento, Operação e Conservação*. Vol.2. MT-DNER - IPR. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, R.J.

_____. (2001). Relação das Rodovias do Sistema Rodoviário Federal. Disponível em: <http://www.dner.gov.br/rodovias/relacao_rodovias.htm>. DNER, Rio de Janeiro, R.J. Acesso em: 17 jul. 2001.

_____. (1978) Norma rodoviária com as terminologias de defeitos de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. DNER - TER 01/78. Rio de Janeiro, R.J.

_____. Norma rodoviária com as terminologias de defeitos de pavimentos rígidos. DNER - TER 49. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1994) Norma rodoviária para Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos. DNER - PRO 008/94. Rio de Janeiro, R.J.

_____. Norma rodoviária para Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Rígidos. DNER - PRO 50. Rio de Janeiro, R.J.

_____. Norma rodoviária para Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Rígidos. DNER - PRO 51. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1983) Norma para Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede. DNER - ES 128/83. Rio de Janeiro, R.J.

_____. (1986) Norma para Controle da Qualidade de Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede. DNER - ES 169/86. Rio de Janeiro, R.J.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (2002) SICRO II - Sistema de Custos Rodoviários. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. DNIT, Brasília. Acesso em 02 maio 2002.

DOMINGUES, F.A.A. (1993a). *MID - Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos de Pavimentos*. São Paulo. LDTT/PTR/EPUSP.

_____. (1993b). *Sobre a gerência de pavimentos e o uso do modelo HDM-III*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 27., 1993, Teresina, PI, p.363 - 390.

_____. (1994a). *Fissuras, Trincas e Esborcinamentos em Pavimentos de Concreto de Cimento Portland*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 28., 1994, Belo Horizonte, M.G, p. 751 – 784.

_____. (1994b). *MID - Nossos Equipamentos para Medição de Irregularidade dos Pavimentos*. São Paulo, SP.

_____. (1996). *Comparação econômica entre um trecho de pavimento asfáltico e um trecho de pavimento rígido da Rodovia dos Imigrantes, levando-se em conta os seus desempenhos durante 20 anos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 30., 1996, Salvador, BA, p. 1840 – 1872.

FERNANDES JR., J.L. (1994). *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

_____. (1996). *Curso de Atualização em Sistemas de Gerência de Pavimentos*. Notas de Aula. FIPAI. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos. Jul. 1996.

_____. (1996). *Considerações sobre a Importância de Treinamento e Pesquisa para a Implementação de Sistemas de Gerência de Pavimentos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 30., 1996, Salvador, BA.

FERNANDES JR, J.L.; ODA, S.; ZERBINI; L.F. (1999). *Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos*. Notas de Aula. FIPAI. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1989). *Road Surface Management for Local Governments*. Course Workbook. U. S. Department of Transportation. FHWA, Austin, Texas, dec.

HAAS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. (1994). *Modern Pavement Management*. Krieger Publishing Co. Malamar, Florida.

HALL, K.T. e DARTER, M.I. (1994). *Development of k – Value Concepts and Procedures*. 3º Workshop on Design and Evaluation of Concrete Pavements. Illinois.

HEUKELOM, W. e KLOMP, A.J.G. (1962) *Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction*. Proceedings of the First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Universidade de Michigan.

HUDSON, W.R. e FERNANDES JR., J.L. (1993). *Pesquisas prioritárias em sistemas de gerência de pavimentos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 27., 1993, Teresina, PI – p. 175 - 187.

IBP/ABNT-P-EB-651. *Especificação de Asfaltos Diluídos (Tipo Cura Média)*. IBP/ Comissão de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo/ Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1973.

_____. *Especificação de Asfaltos Diluídos (Tipo Cura Rápida)*. IBP/ Comissão de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo/ Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1973.

IBP (1990). *Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos*. IBP/ Comissão de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo/ Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

INSTITUTO DO ASFALTO. (1989). *The Asphalt Handbook*. MS – 4.

KERALI, H.G.R. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 1 – Overview of HDM-4*. The Highway Development and Management Series.

KERALI, H.G.R.; McMULLEN, D.; ODOKI, J.B. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 2 – Applications Guide*. The Highway Development and Management Series.

LARSEN, J. (1985). *Tratamento Superficial na Construção e Conservação de Rodovias*, São Paulo. SP.

MELO, R.A. (2002). *Faixas adicionais para aclives de rodovias brasileiras*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

MINER, M.A. (1964). *Cumulative damage in fatigue*. American Society of Mechanical Engineers, New York.

MOREIRA, M.L.T. e MENDES, P.T.C. (1993). *Alternativa para o dimensionamento dos pavimentos rodoviários de concreto*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 27., 1993, Teresina, PI, p. 371 – 378.

MOTTA, L.M.G. e RABELLO NETO, M.P. (1994). *Considerações a respeito do dimensionamento de pavimentos rígidos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 28., 1994, Belo Horizonte, M.G, p. 980 - 1012.

MOURA, J.C. (1999). *Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos*. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, 1999.

ODOKI, J.B.; KERALI, H.G.R. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 4 – Analytical Framework and Model Descriptions*. The Highway Development and Management Series.

PACKARD, R.G. (1973). *Design of concrete airport pavement*. Portland Cement Association (PCA), Engineering Bulletin.

PACKARD, R.G. (1977). *Design considerations for control of joint faulting of undoweled pavements*. In: International Conference on Concrete Pavement Design, Purdue University.

PICKETT, G. e RAY, G.K. (1950) *Influence Charts Concrete Pavements*. American Society of Civil Engineers (ASCE); New York.

PINTO, J. A.V. (1993). *O dimensionamento das estruturas de pavimentos e as políticas de gestão rodoviária*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 27., 1993, Teresina, PI, p. 340 – 356.

PITTA, M.R. (1987). *Dimensionamento de pavimentos rígidos pela consideração dos efeitos de fadiga por erosão*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 36 - 80.

_____. (1987). *Novos conceitos no dimensionamento de pavimentos rígidos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 19-35.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1966) *Thickness Design for Concrete Pavements*. PCA, Chicago (HB-35).

_____. (1984) *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Canadian Edition, PCA, Ottawa, 1984.

SEVERI, A.A. (1997) *Considerações sobre os Custos dos Pavimentos Rígidos com Base em Conceitos de Gerência de Pavimentos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

SOUZA, A.C.V. (1987). *Custos de conservação para gerência de pavimentos de concreto asfáltico*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 22., 1987, Maceió, AL. p. 186 - 216.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (1993). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. National Academy of Science. SHRP-H-348. Washington, D.C.

SMITH, R. E. et al. (1987). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. Federal Highway Administration. DTFH61-85-C-0095.

TAYABJI, S.D., COLLEY, B.E. (1981). *Analysis of jointed concrete pavements*. Skokie: PCA.

TARAGIN, A. (1958). *Lateral Displacement of Truck on Two-Lane Highways and Four-Lane Divided Highways*. Public Roads. Washington, D. C.

TONDO, C.M.M.; BALBO, J.T.; BERNUCCI, L.B. (1994). *Alguns enfoques sobre a otimização de recursos orçamentários para gerência de manutenção de pavimentos*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 28., 1994, Belo Horizonte, M.G, p. 1195 – 1203.

THOMAZ, C.A. (1977). *Pavimento rígido, otimização técnica e econômica dos equipamentos de construção*. ET – 17, ABCP. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 13., 1977, Curitiba, PR.

VASCONCELOS, J.F. (1993). *Uma reflexão sobre o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - ABPv, 27., 1993, Teresina, PI, p. 357 – 370.

WESTERGAARD, H.M. (1925). *Theory of Stress in Roads Slabs*. Proc. Of Annual Meeting. HRB. National Research Council. Washington, D.C.

WIGHTMAN, D.C.; STANNARD, E.E.; DAKIN, J.M. (2000). *Applications Guide HDM-4, Volume 3 – Software User Guide*. The Highway Development and Management Series.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975). *Principles of Pavement Design*. Second Edition. John Wiley & Sons. New York. P.17.