Campus de São Carlos

**CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CUSTOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS
COM BASE EM CONCEITOS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**

ANDRÉA ARANTES SEVERI

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ LEOMAR FERNANDES JÚNIOR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CUSTOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS COM BASE EM CONCEITOS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS

ANDRÉA ARANTES SEVERI

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

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036400

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior

São Carlos

1997

Class.	TC.58-088
Cutt.	5362
Tombo	199194

st 0934379

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

S498c Severi, Andréa Arantes
Considerações sobre os custos de pavimentos
rígidos com base em conceitos de gerência de
pavimentos / Andréa Arantes Severi. -- São Carlos,
1997.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes
Júnior
Área: Transportes

1. Pavimento rígido. 2. Custos. 3. Manutenção e
reabilitação. 4. Sistema de gerência de
pavimentos. I. Título.

Dedicatória

Aos meus pais e
ao meu irmão.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior, orientador deste trabalho, pela amizade, bom humor e especialmente pela oportunidade de trabalharmos juntos;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida;

Ao grupo Leão e Leão, por permitir o acompanhamento da obra do Aeroporto “Leite Lopes” de Ribeirão Preto, S.P.;

Ao Fábio, pelo amor, incentivo e muita paciência;

À amiga Sandra e a seu marido Júlio, pelo auxílio na revisão do trabalho e todo o apoio;

À amiga Marcia Aps, pelo companheirismo e principalmente pela amizade;

Ao Eng^o Caio, pela atenção desprendida durante o acompanhamento da obra do Aeroporto Leite Lopes;

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP pela colaboração;

Aos funcionários do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, em especial à Heloísa H. M. Belo, à Antônia Magali Bruno Marcondes Cesar, ao Sr. Vicente Daló e ao Antônio Carlos Mariano;

A todos os amigos com quem tenho convivido durante esses anos, em especial a Érika A. P. de Carvalho, a Farayde Matta Farouri, o Fábio R. M. Borges, a Patrícia Bolsonaro, a Adriana Lunari, o Roberto T. Aramaki, o Cássio A. Teoro do Carmo, a Sandra Oda, a Sandra Fabiana Rodgher e o Attus Pereira Moreira.

Resumo

Este trabalho apresenta considerações sobre os custos de pavimentos rígidos, abordando os custos de construção, os custos de manutenção e reabilitação e os custos de operação dos veículos. Apresenta, inicialmente, uma revisão dos fatores intervenientes no dimensionamento de pavimentos rígidos, particularmente os métodos adotados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pela American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), e os procedimentos construtivos mais utilizados no Brasil. As atividades de manutenção e reabilitação são associadas às principais formas de deterioração dos pavimentos rígidos, tomando-se como referência, neste trabalho, o Manual de Identificação de Defeitos do Programa SHRP. Quanto aos custos que incidem sobre os usuários e que dependem, principalmente, da condição da superfície de rolamento, são analisadas a influência da curva de desempenho e a estimativa dos custos de operação dos veículos a partir da irregularidade longitudinal dos pavimentos. Desenvolve-se uma programação fatorial de simulações que tem como fatores o método de dimensionamento, o módulo de reação do subleito e o volume de tráfego. Analisam-se, ao final, a importância relativa desses fatores sobre cada uma das parcelas que compõem o custo total de um pavimento rígido.

Palavras-chave: pavimentos rígidos; custos; manutenção e reabilitação; gerência de pavimentos.

Abstract

This work analyses the costs of rigid pavements, that are compound by construction, maintenance and rehabilitation, and user costs. It is presented the basic concepts of rigid pavement design, mainly the Brazilian Association of Portland Cement (ABCP) and the American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) methods, and the construction procedures most used in Brazil. The maintenance and rehabilitation activities are related to rigid pavement distresses, and in this work the reference is the Distress Identification Manual developed by the SHRP Program. In terms of user costs, which are due to pavement rolling condition, it is analyzed the importance of performance trends and the estimation of user costs from pavement roughness. It is developed a factorial simulation program considering the following factors: rigid pavement design method, modulus of subgrade reaction, and traffic volume. It is analyzed the relative effects of each factor on the rigid pavements total cost.

Key-words: rigid pavements; costs; maintenance and rehabilitation; pavement management system.

Lista de Figuras

Figura nº.....	Página
2.1 - Empenamento de placas de pavimento rígido (YODER e WITCZAC, 1975).....	11
2.2 - Tipos de juntas em pavimentos rígidos (YODER e WITCZAC, 1975).....	15
2.3 - Depósito de selante.	16
2.4 - Equipamento para determinação do módulo de reação do subleito (SUZUKI, 1997).....	22
2.5 - Relação entre CBR e módulo de reação do subleito (k) (PITTA, 1977).....	23
2.6 - Aumento de k devido à presença de sub-base granular(PITTA, 1977).....	28
2.7 - Aumento de k devido à presença de sub-base tratada com cimento (PITTA, 1977).....	29
3.1 - Trinca de canto com severidade média.	39
3.2 - Trincas circulares com severidade alta	40
3.3 - Trinca longitudinal com severidade alta.....	41
3.4 - Trinca transversal com severidade alta	42
3.5 - Junta com selante deteriorado com severidade média	43
3.6 - Esborcinamento de junta longitudinal com severidade alta	44
3.7 - Esborcinamento de junta transversal com severidade média	45
3.8 - Trincas interligadas	45
3.9 - Escamação	46
3.10 - Agregados polidos.....	46
3.11 - Alçamento localizado	47
3.12 - Degrau na trinca transversal	48

3.13 - Desnível pista/acostamento	49
3.14 - Separação pista/acostamento com selante em boas condições.....	49
3.15 - Remendo pequeno em concreto asfáltico com severidade baixa	50
3.16 - Bombeamento	51
3.17 - Exemplo de inter-relação entre desempenho dos pavimentos, estratégias de intervenção, data de manutenção e custos (FHWA, 1989)	56
3.18 - Curva de desempenho para dimensionamento pelo método da PCA/66: espessura de 27 cm, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$	58
3.19 - Curva de desempenho para dimensionamento pelo método da AASHTO/86: espessura de 28 cm, $k = 2,76$ MPa/m e $N = 10^8$	59
4.1 - Parcelas que compõem o custo total da modalidade rodoviária.....	64
4.2 - Conceito de serventia – desempenho (CAREY&IRICK, 1960)	70
4.3 - Relação entre o índice de serventia (IS) e a irregularidade longitudinal (IRI).....	73
4.4 – Curva de desempenho pelo método da PCA/66, espessura de 27 cm, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$	74
4.5 – Evolução da irregularidade longitudinal (IRI) no tempo (PCA/66, espessura de 27 cm. $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$	74
4.6 - Relação entre a irregularidade longitudinal (IRI) e o custo de operação unitário (R\$/veículo/ano)	76
4.7 - Evolução dos custos operacionais em função da irregularidade longitudinal: método da PCA/66, espessura de 27 cm, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$	77
5.1 – Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 13$ cm), $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^6$	82
5.2 – Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 11$ cm), $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^6$	83

5.3 – Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 14$ cm), $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^6$	84
5.4 – Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 13$ cm), $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^6$	85
5.5 – Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 18$ cm), $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^7$	86
5.6 – Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 17$ cm), $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^7$	87
5.7 – Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 20$ cm), $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^7$	88
5.8 – Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 19$ cm), $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^7$	89
5.9 – Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 27$ cm), $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^8$	90
5.10 – Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 25$ cm), $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^8$	91
5.11 – Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 28$ cm), $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^8$	92
5.12 – Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 27$ cm), $k = 13,8$ MPa/m, $N = 10^8$	93

Lista de Tabelas

Tabela nº	Página
2.1 - Modelo de planilha para cálculo do custo inicial unitário	34
3.1 - Causas dos principais defeitos dos pavimentos rígidos (adaptada de AASHTO, 1986)	37
3.2 - Resumo das causas dos defeitos considerados no programa SHRP e principais atividades de manutenção e reabilitação (SHRP - 1993, INSTITUTO DO ASFALTO - 1989, DNER - 1989)	53
3.3 - Custos de manutenção e reabilitação, inclusive Valor Presente Líquido (VPL), para o método de dimensionamento da PCA/66.....	58
3.4 - Custos de manutenção e reabilitação, inclusive Valor Presente Líquido (VPL), para o método de dimensionamento da AASHTO/86.....	59
4.1 - Estimativa do IRI a partir de avaliações qualitativas da condição do pavimento (ARCHONDO-CALLAO&FAIZ, 1993)	72
4.2 - Estimativa do IRI a partir da condição do pavimento (OECD, 1989)..	73
4.3 - Custo Operacional e valor presente líquido (VPL): método da PCA/66, espessura de 27 cm, $k = 41,40 \text{ MPa/m}$ e $N = 10^8$	77
5.1 - Dimensionamento pelos métodos da AASHTO/86 e PCA/66 em função do volume de tráfego e do tipo de subleito (espessuras em cm).	79
5.2 - Custos de construção unitários em função da	80
5.3 - Custos de construção totais para cada uma das espessuras.....	81
5.4 - Custos de M&R: PCA/66, $k = 41,40 \text{ MPa/m}$, $N = 10^6$	82
5.5 - Custos de M&R: PCA/66, $k = 138,0 \text{ MPa/m}$, $N = 10^6$	83

5.6 - Custos de M&R: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^6$	84
5.7 - Custos de M&R: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^6$	85
5.8 - Custos de M&R: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^7$	86
5.9 - Custos de M&R: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^7$	87
5.10 - Custos de M&R: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^7$	88
5.11 - Custos de M&R: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^7$	89
5.12 - Custos de M&R: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^8$	90
5.13 - Custos de M&R: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^8$	91
5.14 - Custos de M&R: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^8$	92
5.15 - Custos de M&R: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^8$	93
5.16 – Volume de tráfego acumulado (N , número de solicitações equivalentes do eixo padrão de 80 kN).....	94
5.17 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^6$	95
5.18 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^6$	96
5.19 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^6$	97
5.20 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^6$	98
5.21 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^7$	99
5.22 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^7$	100
5.23 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^7$	101
5.24 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^7$	102
5.25 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^8$	103
5.26 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^8$	104
5.27 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^8$	105
5.28 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^8$	106
5.29 - Custos totais considerando-se o dimensionamento pelo método da PCA/66.....	107
5.30 - Custos totais considerando-se o dimensionamento pelo método da AASHTO/86.....	107
5.31 - Matriz fatorial: custo de construção (10^6 R\$)	108
5.32 - Matriz fatorial: custo de M & R (10^6 R\$)	108

5.33 - Matriz fatorial: custo de operacional (10^6 R\$)	109
5.34 - Matriz fatorial: custo total (10^6 R\$)	109
5.35 – Custos (10^6 R\$) para volume de tráfego igual a 10^6	111
5.36 – Custos (10^6 R\$) para volume de tráfego igual a 10^7	111
5.35 – Custos (10^6 R\$) para volume de tráfego igual a 10^8	112

Lista de Abreviaturas e Siglas

AASHTO	- <i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABPv	- Associação Brasileira de Pavimentação
a/c	- Relação Água /Cimento
BGTC	- Brita Graduada Tratada com Cimento
BI	- <i>Bump Integrator</i>
CBR	- Índice de Suporte Califórnia
COV	- Custo Operacional dos Veículos
CRCP	- <i>Continuously reinforced Concrete Paviment</i>
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
E	- Módulo de Elasticidade
E_c	- Módulo de Elasticidade do Concreto
ESRD	- Eixo Simples de Rodas Duplas
$f_{ctM,k}$	- Resistência à Tração por Flexão – Módulo de Ruptura
$f_{ctM,j}$	- Resistência de dosagem do concreto à Tração por Flexão
FHWA	- <i>Federal Highway Administration</i>
FICEM	- Federação Americana de Cimento
HDM	- <i>Highway Design and Maintenance Standards Model</i>
HDMSS	- <i>Highway Design and Maintenance Standards Study</i>
ISA	- Índice de Serventia Atual
IRI	- <i>International Roughness Index</i>
IS	- Índice de Serventia
JPCP	- <i>Jointed Plain Concrete Paviment</i>
JRCP	- <i>Jointed Reinforced Concrete Paviment</i>
k	- Módulo de Reação do Subleito
k_{sist}	- Módulo de Reação no Topo do Sistema

LCPC	- <i>Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussees</i>
MIT	- <i>Massachusetts Institute of technology</i>
M & R	- Manutenção e Reabilitação
M _R	- Módulo de Resiliência
N	- Volume de Tráfego
PCA	- <i>Portland Cement Association</i>
PSI	- <i>Present Serviceability Index</i>
RDME	- <i>Road Deterioration and Maintenance</i>
SGP	- Sistema de Gerência de Pavimentos
SHRP	- <i>Strategic Highway Research Program</i>
VLP	- Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
 1 - INTRODUÇÃO.....	 1
 2 - CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	 6
2.1 - Pavimentos Rígidos.....	6
2.2 - Execução de Pavimentos Rígidos	8
2.2.1 - Empenamento	10
2.2.2 - Juntas em Pavimentos Rígidos	12
2.2.3 - Selagem de juntas.....	16
2.2.4 - Especificações para os Materiais e Mão-de-Obra Utilizada.....	16
2.2.5 - Acompanhamento da Execução de um Pavimento Rígido.....	19
2.3 - Métodos de Dimensionamento	20
2.3.1 - Módulo de Reação do Subleito.....	21
2.3.2 - Método de Dimensionamento da PCA/66.....	26
2.3.3 - Método de Dimensionamento da AASHTO/86.....	31
2.4 - Custos Iniciais.....	34

3 - CUSTOS DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS	35
3.1 - Introdução	35
3.2 - Tipos de defeitos dos Pavimentos Rígidos.....	36
3.2.1 - Defeitos do Programa SHRP para Pavimentos Rígidos	38
3.3 - Estratégias de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos rígidos.....	52
3.4 - Custos de Manutenção e Reabilitação	56
4 - CUSTOS DE OPERAÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS	60
4.1 - Introdução	60
4.2 - Modelo HDM-III.....	63
4.2.1 - Estrutura Conceitual	63
4.2.2 - Estrutura Lógica	64
4.2.3 - Limitações.....	67
4.2.4 - Modelo HDM-IV.....	68
4.3 - Custos de Operação dos Veículos.....	69
4.3.1 - Relação entre Índice de Serventia e Irregularidade Longitudinal.....	70
4.3.2 - Relação entre Irregularidade Longitudinal e Custos Operacionais	75
5 – CUSTO TOTAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS: ANÁLISE FATORIAL	78
5.1 - Introdução	78
5.2 - Custos de Construção	79
5.3 - Custos de Manutenção e Reabilitação	81
5.4 - Custos de Operação dos Veículos.....	94
5.5 - Custos de Totais.....	107
5.6 - Análise dos Resultados.....	108
5.6.1 - Método de Dimensionamento	109
5.6.2 - Tipo de Subleito.....	110
5.6.3 – Volume de Tráfego	110

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXO A - FOTOS DO ACOMPANHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DO PÁTIO DE TAXIAMENTO DO AEROPORTO LEITE LOPES DE RIBEIRÃO PRETO.....	119
ANEXO B - FOTOS DOS DEFEITOS NO PAVIMENTO DO PÁTIO DE TAXIAMENTO DO AEROPORTO LEITE LOPES DE RIBEIRÃO PRETO.....	133

1 - Introdução

Ao termo “pavimento” são associadas muitas definições. Neste trabalho, pavimento é considerado a porção superior de uma rodovia, aeroporto ou estacionamento, incluindo todas as camadas assentes sobre o subleito (solo de fundação). Apesar da terminologia rodoviária apresentar muitos tipos de pavimentos, neste trabalho, a exemplo do apresentado por HAAS et al. (1994), haverá a distinção em apenas dois tipos básicos: pavimentos flexíveis, que normalmente apresentam uma mistura asfáltica como camada de revestimento, e pavimentos rígidos, que têm como principal camada estrutural o concreto de cimento Portland.

O principal objeto de estudo deste trabalho, o pavimento rígido, surgiu em 1891 na cidade de Bellefontaine, Estado de Ohio. A expansão do uso da pavimentação de concreto se deu em razão de sua maior durabilidade, baixas despesas de manutenção e boas condições de rolamento, segurança de tráfego e visibilidade (PALAZZO, 1993).

O pavimento de concreto, devido à sua rigidez e elevado módulo de elasticidade, distribui as cargas do tráfego ao subleito sobre uma área relativamente ampla do solo, sendo menos susceptível a variações na capacidade de suporte do subleito do que os pavimentos flexíveis (YODER e WICTZAC, 1975).

Os custos de construção dos pavimentos rígidos e flexíveis, principal fator considerado quando da tomada de decisão dos organismos rodoviários sobre que tipo de pavimento adotar, sofreram algumas alterações ao longo do tempo. Segundo THOMAZ (1977), os baixos preços dos derivados de petróleo fizeram com que a construção de pavimentos rígidos fosse bastante limitada entre 1946 (fim da Segunda Guerra Mundial) e 1973 (início da “crise do petróleo”).

Logo após 1973 este quadro se alterou, principalmente nos países importadores de petróleo, em razão do drástico aumento dos preços dos pavimentos asfálticos. Passada a segunda crise do petróleo de 1978, a tendência que se tem observado desde então é de uma queda relativa dos preços do petróleo em todo o mundo, excetuando-se, no entanto, períodos curtos de instabilidade econômica e política (Guerra do Golfo, por exemplo).

Além dos fatores acima, no Brasil também devem ser considerados outros aspectos. A partir dos anos 50, a construção civil passou a absorver toda a produção de cimento e assim, com o aumento da demanda, praticamente não houve disponibilidade de cimento para pavimentação. Atualmente, a indústria cimenteira tem capacidade para fornecer cimento tanto para a construção civil quanto para pavimentação (PALAZZO, 1993).

No Brasil, tem-se utilizado basicamente pavimentos com revestimento de concreto asfáltico (aqui englobando também os tratamentos superficiais). No passado recente, poucas são as experiências com pavimentos rígidos nas rodovias brasileiras. Podem ser citadas a utilização de pavimentos rígidos em aeroportos, pátios de indústrias, pontos de parada e corredores de ônibus urbanos, pátios de pedágios e apenas alguns trechos rodoviários (interligação Anchieta-Imigrantes, trechos da Rodovia dos Bandeirantes, algumas avenidas de grandes capitais e pavimento em túneis).

Com o início do processo de financiamento privado de rodovias, houve um súbito interesse por pavimentos rígidos por parte das empresas que pretendem participar ou já estão participando dos processos licitatórios, a maciça maioria composta por empreiteiras com grande tradição na execução de serviços de pavimentação (até hoje, quase que exclusivamente de pavimentos flexíveis). A convite de universidades e empresas, especialistas e professores de universidades estrangeiras têm vindo ao Brasil para palestras e cursos, e revistas técnicas têm dado muito mais espaço aos pavimentos rígidos.

Uma eventual mudança nos rumos da pavimentação rodoviária no Brasil, com participação considerável dos pavimentos rígidos, deve ser precedida por estudos que considerem todos os fatores intervenientes. Para dar subsídio aos organismos rodoviários, estudos devem contemplar não só os custos iniciais, mas também os custos de manutenção e reabilitação e, principalmente, os custos de operação dos veículos e a condição dos pavimentos ao final do período de concessão.

Muitos são os fatores intervenientes nos custos de pavimentação, dificultando a escolha do tipo de pavimento mais econômico, ou seja, aquele que, durante a vida em serviço, resulta em custo total mínimo. No presente trabalho, são apresentadas considerações sobre as parcelas que compõem os custos dos pavimentos rígidos.

Os custos de construção são apresentados no capítulo 2, que faz uma revisão bibliográfica dos tipos de pavimentos rígidos e os procedimentos construtivos mais utilizados no Brasil, incluindo-se a execução e selagem de juntas. São considerados os métodos de dimensionamento adotados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pela American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 1986).

O custos de manutenção e reabilitação (M & R), associados às principais formas de deterioração dos pavimentos rígidos, são apresentados no capítulo 3. Neste trabalho, toma-se como referência o Manual de Identificação de Defeitos do Programa SHRP (1993), que fornece a descrição, os níveis de severidade e as formas de quantificação de cada um dos dezesseis defeitos relacionados. É feito, também, um breve relato das causas e possíveis atividades de manutenção e reabilitação desses defeitos.

Os custos de operação dos veículos, que incidem diretamente sobre os usuários e dependem, principalmente, da condição da superfície de rolamento, são apresentados no capítulo 4. Analisam-se a influência da curva de desempenho e a estimativa dos custos de operação dos veículos a partir da irregularidade longitudinal dos pavimentos. Toma-se por base a relação entre custos operacionais e irregularidade longitudinal considerada no programa computacional de gerência de pavimentos HDM-III (ARCHONDO-CALLAO & FAIZ, 1993), pois os poucos estudos existentes sobre os custos de operação dos veículos em pavimentos rígidos ainda necessitam de trabalhos experimentais complementares, semelhantes aos desenvolvidos pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT) e pelo Banco Mundial quando da Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos Rodoviários (GEIPOT, 1982).

Desenvolve-se, no capítulo 5, uma programação fatorial de simulações que permitem a determinação de todas as parcelas que compõem o custo total de pavimentos rígidos e que têm como fatores o método de dimensionamento, o módulo de reação do subleito e o volume de tráfego. São apresentadas, em detalhes, todas as seqüências para a determinação dos custos de construção, de manutenção e reabilitação e de operação dos veículos, incluindo, neste caso, as curvas de desempenho e a relação destas com a irregularidade longitudinal.

A análise dos resultados obtidos com as simulações é apresentada ainda no capítulo 5, que destaca a importância relativa desses fatores sobre cada uma das parcelas que compõem o custo total de um pavimento rígido. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas complementares sobre o tema principal e também sobre assuntos a ele relacionados.

2 - Custos de Construção de Pavimentos Rígidos

2.1 – Pavimentos Rígidos

O pavimento rígido é uma estrutura que distribui as cargas ao subleito, tendo como camada de revestimento placas de concreto de cimento Portland de relativamente alta resistência à flexão (AASHTO, 1986).

Segundo YODER e WITCZAC (1975), a maior diferença entre um pavimento rígido e o flexível é a maneira como eles distribuem as cargas ao subleito. O pavimento de concreto, devido à sua rigidez e elevado módulo de elasticidade, tende a distribuir a carga sobre uma área relativamente ampla do solo, pois a maior parte da capacidade estrutural é suprida pela própria placa e variações nas propriedades do subleito pouco influenciam a capacidade estrutural do pavimento.

Camadas de sub-base, apesar de pouco contribuírem para a distribuição de cargas, são utilizadas por várias razões, tais como: controle de bombeamento, drenagem, controle da retração e dilatação do subleito e controle da ação de congelamento (onde necessário).

Segundo PITTA (1991), as propriedades dos pavimentos rígidos favoráveis à sua utilização 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 necessidade de manutenção: devido à sua maior durabilidade os defeitos ocorrem com menor frequência e, geralmente, são de pequena monta, necessitando apenas de manutenção de rotina. Manutenção pesada só é necessária após intervalos de tempo maiores, sem envolver necessariamente a reconstrução total das pistas;
- melhor atendimento ao usuário: as vias de concreto sofrem interrupções de tráfego menos frequentes ao longo do tempo e, desta maneira, o usuário sofre menos transtornos;
- absorção de mão-de-obra local: em razão do pavimento de concreto ser constituído de materiais manipulados à temperatura ambiente e utilizar equipamento reduzido, pode-se utilizar pessoal não especializado da própria região.

YODER e WITCZAC (1975) classificam os pavimentos rígidos da seguinte maneira:

1. *JPCP: Jointed Plain Concrete Pavement* - pavimento de concreto simples, sem barras de transferência de carga. Este tipo de pavimento é utilizado em vias de baixo volume de tráfego e geralmente é executado sobre uma sub-base tratada com cimento;

2. *JRCP: Jointed Reinforced Concrete Pavement* - pavimento de concreto simples, com barras de transferência de cargas. Este tipo é executado para vias com tráfego pesado;
3. *CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement* - pavimento de concreto continuamente armado. Este tipo de pavimento, sem juntas, a não ser as de construção, nunca foi executado no Brasil.

Os pavimentos rígidos utilizados no Brasil, segundo a ABCP (PITTA, 1991), são pavimentos de concreto simples onde as tensões solicitantes são combatidas tão somente pelo próprio concreto, que não contém nenhum tipo de armadura distribuída, não se considerando como tal eventuais sistemas de ligação ou transferência de carga entre placas formadas pelas juntas longitudinais e transversais, nem armaduras de retração, eventualmente exigidas pelo projeto e aplicadas em poucas placas isoladas.

2.2 - Execução de Pavimentos Rígidos

Nos períodos anteriores à Segunda Guerra Mundial, as placas de pavimentos de concreto eram construídas diretamente sobre o subleito, sem a consideração do tipo e condições de drenagem. Com o aumento do tráfego de caminhões, passou-se a considerar a influência do tipo de subleito no desempenho do pavimento. Nesta época, pavimentos com bordos espessados começaram a ser construídos para aumentar a resistência em estados de tensão elevados nos bordos do pavimento e também passou-se a adotar o uso de bases granulares com espessuras variadas para proteger o pavimento do baixo suporte do subleito e, principalmente, para evitar o bombeamento (YODER e WITCZAC, 1975).

Um pavimento rígido é uma estrutura sujeita a ações mecânicas de grande intensidade, ligadas às cargas do tráfego e também aos efeitos ambientais, resultantes das variações de temperatura e umidade do meio, que 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 permita 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 (PITTA, 1989a):

- 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, PITTA (1989a) faz extensas considerações. Por exemplo, um pavimento rígido só deve ser aberto ao tráfego quando sua resistência efetiva for igual, no mínimo, à resistência característica indicada no dimensionamento ($f_{clM,k}$), sendo viável 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 graúdo 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 graúdo, 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.

2.2.1 - Empenamento

Segundo YODER e WICTZAC (1975), tensões no concreto podem resultar, além de carregamentos do tráfego, de empenamento (causado por gradiente térmico nas placas de concreto) e de variações volumétricas do sistema subleito/sub-base.

O empenamento (Figura 2.1) é um efeito de curvatura produzido pelas diferenças de temperatura entre as faces superior e inferior da placa. Durante o dia, o topo do pavimento é mais quente que a face inferior, tendendo a placa a expandir-se na parte de cima e curvar, ou empenar, os bordos para baixo. Esta tendência é restringida pelas reações de atrito com a camada subjacente, produzindo, então, compressão no topo e tração na face inferior da placa. À noite ocorre o inverso, o fundo da placa perde calor mais lentamente do que o topo, resultando em contração deste por estar mais frio, enquanto a base se expande.

Figura 2.1 – Empenamento de placas de pavimento rígido (YODER e WITCZAC, 1975).

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.

2.2.2 - Juntas em Pavimentos Rígidos

As trincas influem na durabilidade e no aspecto estético da superfície de rolamento de um pavimento. Sob a ação do tráfego e das condições ambientais, tendem a aumentar de tamanho e, no caso de pavimentos rígidos, causar a deterioração dos bordos, refletindo na qualidade de rolamento e na capacidade estrutural do concreto, aumentando as despesas de conservação e diminuindo a vida útil do pavimento. Podem permitir também a infiltração de água e materiais incompressíveis, prejudicando a uniformidade do suporte através de bombeamento e provocando danosas concentrações de tensões de compressão ao longo do bordo transversal.

Segundo BASÍLO (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. 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 (PITTA, 1987) são:

1. **Juntas transversais:** executadas perpendicularmente ao eixo longitudinal do pavimento, são subdivididas em:

- de retração: tem por função controlar as trincas devidas à 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 2.2, a; Fotos 19 e 20, Anexo A). Sua profundidade varia de $1/4$ a $1/6$ da espessura da placa, com um mínimo de 4 cm, devendo sua abertura ser de no mínimo 3 mm (valor usual igual a 6 mm). O espaçamento deve atender às necessidades de controle não só das trincas devidas à variação inicial de volume como das adicionais de empenamento. Para determinação do espaçamento devemos 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 6 m;
- de retração com barras de transferência: controlam as trincas de retração do concreto e propiciam uma transferência de carga de uma placa para outra através da junta (Figura 2.2, b; Foto 22, Anexo A). 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 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 tomadas 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.

2. **Juntas longitudinais:** executadas perpendicularmente ao eixo transversal do pavimento, são subdivididas em dois tipos:

- de articulação: empregadas para controlar trincas devidas ao empenamento, 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 2.2, e), quando for de construção, ou de seção enfraquecida (serrada, Figura 2.2, 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 2.2, f; Fotos 3 e 17, Anexo A), quando for de construção, ou de seção enfraquecida (serrada, Figura 2.2, c).

3. **Juntas de expansão:** controlam a movimentação longitudinal por dilatação do concreto em função da temperatura elevada e são executadas especialmente em locais ou situações especiais, como encontro do pavimento com outro tipo de estrutura (viadutos, pontes).
4. **Juntas de construção:** são coincidentes com as juntas longitudinais de articulação, quando uma faixa de rolamento é construída de cada vez, coincidentes com uma junta transversal de contração, quando o ciclo de trabalho termina onde esta ocorreria (junta de construção planejada, Figura 2.2, d, e), e quando há um imprevisto e a obra precisa parar (junta de construção de emergência, Figura 2.2, d).

Figura 2.2 – Tipos de juntas em pavimentos rígidos (YODER e WITCZAC, 1975).

2.2.3 - Selagem de Juntas

A selagem de juntas tem como função impedir a infiltração de água e intrusão de material sólido nas mesmas (Foto 23, Anexo A). A infiltração de água nas juntas pode causar sérios danos à camada de fundação devido a expulsão de 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.

FIGURA 2.3 – Depósito de selante.

2.2.4 – Especificações para os Materiais e Mão-de-Obra Utilizada

A execução das placas de um pavimento rígido segue a seguinte ordem:

- assentamento das formas;
- lançamento do concreto;
- adensamento;

- acabamento;
- juntas;
- cura;
- desmoldagem (aproximadamente 12 h do acabamento).

Os materiais utilizados devem atender aos seguintes itens (PITTA, 1989b):

a) concreto:

- resistência mecânica referida no projeto;
- abatimento compatível com o equipamento de execução (reduzido, formas-trilho ou formas deslizantes);
- consumo mínimo de cimento requerido pela norma (320 Kg/m^3).

b) aço:

- barras de transferência ou ligação segundo a NBR 7480 (1982);
- barras de transferência lisas e retas, com aço CA-25, obrigatoriamente;
- barras de ligação de aço CA-50 ou CA-25.

c) material para enchimento das juntas:

- retração/articulação: emulsões asfálticas catiônicas e cimento asfáltico de petróleo de alta viscosidade, pastas à base de resinas epóxicas e silicones;
- expansão: elastômeros pré-moldados, em toda a espessura da placa, sem a selagem final;

d) película isolante e impermeabilizante: utilizada entre a placa e a sub-base, pode ser uma membrana plástica e flexível, com espessura entre 0,2 mm e 0,3 mm ou um papel tipo *Kraft* impregnado com betume, com gramatura mínima de 200 g/m^2 . O encontro das películas deverá ter um recobrimento mínimo de 20 cm.

e) material para cura:

- Fase 1 (de 24 a 72 h): aplica-se um produto químico apropriado, gerador de uma película plástica, ou cobre-se a superfície com tecido de juta molhado (Foto 16, Anexo A) ou lençol plástico;
- fase 2 (até 7 dias): coloca-se uma camada de areia de 5 cm, palha com espessura de 10 cm ou qualquer outro material saturado por irrigação durante todo o período.

f) equipamento de execução:

- distribuidora de concreto (opcional);
- régua vibratória;
- vibradores de imersão (Foto 6, Anexo A);
- régua acabadora (opcional);
- conjunto de formas (Foto 2, Anexo A);
- serra de disco diamantado (Fotos 19 e 20, Anexo A);

h) equipamentos complementares:

- desempenadeiras de cabo longo (Foto 10, Anexo A);
- rodos de cabo longo;
- réguas de 4 m comprimento para nivelamento;
- pontes de serviço de madeira (Foto 14, Anexo A);
- ferramentas de pedreiro e carpinteiro.

i) laboratório móvel para controle tecnológico:

- conjunto de formas para corpos de prova;
- umidímetro;
- fogareiro de pressão;
- balança para 10 kg.

j) pessoal:

- encarregado;
- pedreiros;
- serventes;
- operador de serra;
- operador de régua vibratória;
- operador de distribuidora.

2.2.5 – Acompanhamento da Execução de um Pavimento Rígido

Visando complementar a revisão bibliográfica sobre a execução de pavimentos rígidos, acompanhou-se as obras de ampliação, construção e reconstrução do pátio de taxiamento do aeroporto Leite Lopes, da cidade de Ribeirão Preto – SP. No Anexo A apresenta-se o relatório fotográfico das fases de execução desta obra.

O pátio existente, com idade aproximada de 20 anos, apresentava sérios problemas de trincas e afundamentos de placas em virtude de ter sido assentado diretamente sobre o subleito, sem nenhum tratamento (Fotos 5, 6, 7 e 8, Anexo B). Estando ainda em serviço, em virtude dos problemas decorrentes do bombeamento, não restou outra alternativa a não ser a reconstrução.

As características técnicas de projeto foram as mesmas para todas as etapas. Executou-se o preparo do subleito, seguido por uma camada de sub-base de solo local (15 cm de espessura), impermeabilizada antes de receber a base de brita graduada tratada com cimento (BGTC, 15 cm de espessura), também impermeabilizada (Foto 1, Anexo A) antes de receber a camada de revestimento em concreto de cimento Portland ($f_{ctM,k} = 4,5$ MPa).

As placas dos bordos de entrada da pista foram armadas (armadura sem função estrutural, Foto 4, Anexo A), as juntas transversais de retração, dotadas de barras de transferência de carga (Fotos 11, 12 e 13, Anexo A), foram serradas (Foto 22, Anexo A) e as juntas longitudinais apresentavam-se serradas e de encaixe tipo macho/fêmea. O equipamento utilizado para execução (Fotos 5, 7, 8 e 9, Anexo A) era do tipo reduzido, sobre trilhos.

2.3 – Métodos de Dimensionamento

O dimensionamento de pavimentos rígidos visa determinar a espessura da placa de concreto, com uma certa resistência à tração na flexão e apoiada em um solo com módulo de reação do subleito k , capaz de suportar as cargas repetidas do tráfego pelo período de projeto.

Os trabalhos desenvolvidos por WESTERGAARD (1925), que apresentaram várias fórmulas analíticas para o cálculo da espessura das placas, foram precursores dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos.

Em suas equações para determinação da deflexão em uma placa de concreto, apoiada em um líquido denso, para condições de carregamento no canto, bordos e interior, Westergaard introduziu o termo *módulo de reação do subleito* (k) e o conceito de *raio de rigidez relativa* (φ) para descrever a rigidez da placa de concreto em relação à rigidez do subleito.

Anteriormente, o conceito de placa suportada por um líquido denso havia sido apresentado por WINKLER (1867), apud HALL e DARTER (1994), segundo o qual uma fundação sofre deflexão, sob uma força vertical aplicada, em

proporção direta a esta força, sem transmissão para as áreas adjacentes da fundação que não estão sob a área carregada.

O modelo de líquido denso simplifica o cálculo de tensões e deflexões nas camadas de subleito em solo natural ou base granular, permitindo a determinação exata das respostas estruturais nos bordos e cantos da placa.

2.3.1 - Módulo de Reação do Subleito

O módulo de reação do subleito (k) é a pressão da placa sobre o subleito dividida pela deslocamento que a placa causou (MPa/m). Seu valor pode ser determinado através do ensaio de carga em placa (Figura 2.4), válido somente para placas em total contato com o subleito, ou através de correlações com outras propriedades que caracterizam a capacidade de suporte do subleito (por exemplo, o Índice de Suporte Califórnia, CBR – Figura 2.5).

Altos valores de k são atribuídos a camadas de base granular e base estabilizada, baseando-se em testes no topo da base, enquanto os valores de k de solos coesivos são substancialmente mais altos sob carregamento dinâmico (movimento dos veículos), embora os modelos de desempenho de pavimentos rígidos sejam baseados em testes de carga estático.

Originalmente o módulo de reação do subleito (k) era considerado como sendo apenas um simples parâmetro para caracterização do suporte de solos naturais de baixa resistência. Como os solos reais não são verdadeiros líquidos densos, cada pesquisa desenvolvida posteriormente padronizou métodos de ensaio para determinação do módulo de reação do subleito, conforme apresentado a seguir.

FIGURA 2.4 – Equipamento para determinação do módulo de reação do subleito (SUZUKI, 1997).

FIGURA 2.5 – Relação entre CBR e módulo de reação do subleito (k) (PITTA, 1977).

- a) *Arlington Road Test*: desenvolvido na década de 30, investigou vários aspectos do comportamento de pavimentos rígidos. Um dos objetivos principais foi a verificação das equações de Westergaard, obtendo-se, no entanto, muitos outros resultados importantes, entre os quais um método de ensaio para determinação do valor de k (repetição de carga em uma placa de 76 cm de diâmetro, com deflexão de 1,25 mm), a observação do efeito da variação sazonal sobre o valor de k (a redução do teor de umidade no verão corresponde a um aumento no valor de k), o efeito do empenamento no canto da placa sobre o valor k e o efeito da melhoria do subleito sobre o valor de k (para cargas distribuídas em uma área da placa, o aumento aparente de k pela melhoria do subleito tende a desaparecer). A tensão produzida em placas pela combinação de carga de roda e variação de temperatura podem ser maiores que as prescritas nas equações de Westergaard para carga de roda e placa curta;
- b) ensaios de campo do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos: na década de 40 foram conduzidos testes de carga no subleito e os valores de k obtidos foram comparados com os resultados obtidos no *Arlington Road Test*. O procedimento do ensaio de suporte de placas do Corpo de Engenheiros não envolveu as repetições de carregamento e descarregamento, com o valor de k correspondendo ao k estático. Os resultados permitiram a consideração das camadas de base como alternativa para melhoria dos valores de k do subleito, sendo esta melhoria função da espessura e material da base;
- c) *AASHTO Road Test*: realizado entre 1955 e 1962, investigou detalhadamente as propriedades da base e do subleito e suas variações sazonais. Relatou as tendências do aumento do CBR e do valor de k com a diminuição do teor de umidade. Como os ensaios de placa não estavam padronizados, foram utilizados procedimentos diferentes dos padrões do

Corpo de Engenheiros ou da American Society for Testing and Materials (ASTM). O procedimento utilizado foi similar ao do *Arlington Road Test* e o valor médio do k estático foi obtido através da divisão de cada carga individual pela deformação que elas produziram (sem deformação permanente), determinando-se um k total para cada nível de carga através da divisão da carga pela deformação total produzida. O valor de k total resultou o mais representativo das características de resistência do subleito, sendo utilizado nas equações de dimensionamento;

- d) Portland Cement Association (PCA): foram realizados experimentos de laboratório e testes de carga em placa em subleito de solo preparado, bases granulares e sub-bases tratadas com cimento. Os testes de placa no topo da base granular resultaram em valores de k mais altos que os testes de placa no subleito. Testes em base tratadas com cimento resultaram em valores de k que aumentavam linearmente com a espessura da base, mostrando, portanto, um decréscimo na deflexão da borda e interior com o aumento da espessura da mesma. A PCA utilizou estes resultados para desenvolver curvas de correlação dos valores de k no topo da base em função da existência de bases granulares, solo-cimento ou tratadas com cimento (apresentadas a seguir, junto com o método de dimensionamento da PCA);
- e) AASHTO 1972: recomendou que o valor de k nas diferentes estações do ano fosse determinado a partir do grau de saturação a uma profundidade de 0,30 a 1,50 m do solo. Apresentou, também, correlações para determinação do valor de k a partir do módulo de resiliência (M_R), do módulo de elasticidade (E) e do grau de saturação do subleito, obtidos em campo e em laboratório;
- f) AASHTO 1986: propôs algumas modificações para obtenção do valor de k :

- equação ($k = M_R/19,4$) para subleito desprotegido, desenvolvida a partir de simulações em camadas elásticas;
- ábacos para determinação do valor de k no topo da base, desenvolvidos por simulações em camadas elásticas considerando-se camadas de bases e sub-bases;
- procedimento para ajuste do k sazonal, através de um método para determinação de um k de projeto que represente a média dos k esperados nas várias estações do ano, ponderando os danos do pavimento nestas estações;
- ajuste do k , através de um ábaco, devido à depreciação do suporte que ocorre em pavimentos erodíveis.

2.3.2 - Método de Dimensionamento da PCA/66

O método de dimensionamento da PCA/66 é um método semi-teórico, baseado em análise das tensões em placas desenvolvidas por PICKETT e RAY (1951).

O método da PCA analisa três fatores, do ponto de vista das tensões atuantes e da resistência dos materiais utilizados (PITTA, 1977):

- a) propriedades do concreto: a espessura da placa está diretamente ligada às tensões de tração na flexão produzidas pelas cargas solicitantes e a relação entre elas e a resistência do concreto à tração na flexão. Uma peça submetida a ciclos reiterados de carregamento pode vir a romper após um

certo número de repetições de carga, ainda que a tensão máxima produzida seja inferior à resistência do material ao esforço. Este fenômeno, conhecido como fadiga, é aplicável ao caso de pavimentos de concreto sujeitos ao tráfego de veículos. Pesquisas desenvolvidas pela PCA sobre o fenômeno de fadiga em placas de concreto sob o efeito de cargas repetidas definiram o índice “relação de tensões” (R_t) que é a relação entre a tensão aplicada na placa e o módulo de ruptura do concreto. Através de ensaios e análises verificou-se que o concreto suporta um número ilimitado de repetições de carga desde que R_t seja inferior a 0,51;

- b) suporte da fundação: admite-se que a pressão exercida em qualquer ponto da fundação seja diretamente proporcional à deflexão da placa naquele ponto, isto é, o subleito trabalha como uma fundação de Winkler. Desta maneira, para pavimentos rígidos, a hipótese de Winkler equivale a uma situação em que a placa é suportada por um conjunto de molas dispostas verticalmente, para as quais é válida a lei de Hooke. O módulo de reação do subleito varia com o tipo de solo, com a sua densidade de campo e com seu teor de umidade. Como a determinação do módulo de reação do subleito através do ensaio de carga em placa é demorada e necessita de equipamento muitas vezes não disponível, utilizam-se ábacos para correlacionar k com os valores de CBR (Figura 2.5) e também ábacos para determinação do valor de k no topo do sistema subleito/sub-base (Figuras 2.6 e 2.7). A utilização de uma camada delgada de base, sem função estrutural, para dar suporte uniforme e constante e eliminar a ocorrência de bombeamento de finos do subleito, aumenta o módulo de reação do sistema subleito/sub-base e este aumento acarreta uma economia na espessura da placa;

FIGURA 2.6 - Aumento de k devido à presença de sub-base granular (PITTA, 1977)

FIGURA 2.7 – Aumento de k devido à presença de sub-base tratada com cimento (PITTA, 1977).

c) tráfego: para a adoção de um critério de cálculo de tensões a PCA baseou-se nos estudos realizados por TARAGIN (1958) sobre os efeitos devido à posição das cargas na placa de concreto. São consideradas três situações para faixas de tráfego de 3,75 m e tráfego no interior da placa:

1. quando as cargas tangenciam a junta transversal e as tensões de tração máximas na flexão ocorrem na parte inferior da placa e paralela à junta;
2. quando os eixos estão perpendiculares ao bordo longitudinal externo e as rodas o tangenciam ocorrendo tensões máximas de tração na flexão na parte inferior da placa e paralelamente ao bordo longitudinal externo;
3. quando as rodas externas dos eixos estão afastadas de 15 cm do bordo longitudinal.

Calculando-se as tensões máximas de tração na flexão, para cada um dos três casos, através das cartas de influência de PICKETT e RAY (1951), chega-se à seguinte conclusão:

- no caso 1, as tensões de tração na flexão são maiores que as derivadas do caso 2;
- o caso 3 é muito mais favorável do que os dois anteriores pois determinar as tensões para eixos simples em 1 é mais desfavorável que em 2 quando o eixo estiver a mais de 7,5 cm do bordo do pavimento;
- para eixos em tandem, ocorre o mesmo fato quando o eixo estiver a mais de 2,5 cm do bordo e desta forma o caso 1 é o mais desfavorável.

O método de dimensionamento da PCA/66, adotado pela ABCP, admite um fator de segurança para compensar as possíveis deficiências de avaliação das cargas solicitantes e da projeção do tráfego. O cálculo da espessura é realizado pelo processo de consumo de resistência à fadiga e pelo processo de carga máxima legal.

2.3.3 - Método de dimensionamento da AASHTO/86

O método da AASHTO (1986) é um método empírico, desenvolvido após o *AASHTO Road Test*, que utiliza equações de desempenho e relaciona o critério de ruptura com este desempenho, definido como a variação da serventia (medida de quão bem um dado pavimento serve ao tráfego de usuários 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.

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

$$\log_{10}(N) = Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times p_t) \times \log_{10} \left[\frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c / k)^{0.25}} \right]} \right] \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde:

- N: número de repetições de carga do eixo padrão de 80 kN;
- D: espessura da placa de concreto;
- ΔPSI : diferença entre o índice de serventia inicial e o final;
- p_t : índice de serventia final;
- S'_c : módulo de ruptura do concreto utilizado no projeto;
- J: coeficiente de transferência de carga;

- C_d : coeficiente de drenagem;
- E_c : módulo de elasticidade do concreto;
- k : módulo de reação do subleito;
- R : nível de confiança de projeto;
- Z_R : desvio padrão normal;
- S_o : erro padrão combinado do tráfego e do desempenho.

No método de dimensionamento da AASHTO, o número de passagens dos eixos solicitantes é transformado em um número equivalente de passagens do eixo padrão (ESRD, 80 kN). Desta forma, utilizando-se fatores de equivalência de cargas, que dependem da carga solicitante, da espessura da placa e do índice de serventia final do pavimento, os efeitos destrutivos das diferentes cargas do tráfego podem ser expressos pelo número de repetições do eixo padrão (N).

O módulo de reação do subleito, utilizado para quantificar a capacidade de suporte dos solos, é função das condições locais. Deve-se corrigir o valor de k devido à presença de sub-base (k do sistema subleito/sub-base, k_{sist}) e corrigir este k_{sist} devido a variações sazonais e perda de suporte.

O nível de confiança (R) de projeto é a probabilidade de que ele tenha um comportamento real igual ou melhor que o previsto durante a vida útil adotada.

As características do concreto aqui consideradas são a resistência média à tração na flexão aos 28 dias e o módulo de elasticidade (E_c) estático à compressão, médio, medido em corpos de prova cilíndricos.

A resistência utilizada no dimensionamento é uma resistência equivalente : resistência média corrigida por um coeficiente de drenagem (C_d) e por um coeficiente de transferência de carga (J).

O coeficiente de drenagem representa a eficiência drenante da sub-base. Seus valores variam entre 0,70 e 1,25, dependendo da porcentagem de tempo em que a estrutura esteja exposta a níveis de umidade próximos da saturação.

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 em aumento da resistência equivalente. Analogamente, sub-bases tratadas tem menores valores de J quando comparadas com as granulares, o que também resulta em um aumento da resistência equivalente.

De todos estes parâmetros, os que mais influenciam na espessura da placa são a resistência à flexão e o número de repetições de carga. No caso de não ser fornecido o valor do módulo de reação do subleito e sim o módulo de elasticidade, o manual da AASHTO apresenta ábacos e equações que permitem a conversão.

2.4 – Custos Iniciais

O custo inicial é função da espessura do revestimento, cuja determinação no presente trabalho, para todas as condições apresentadas no capítulo que faz a análise dos fatores que influenciam o custo total de um pavimento rígido, é feita através dos métodos de dimensionamento acima mencionados.

O custo inicial unitário, para cada espessura (função do método de dimensionamento, do volume de tráfego e do tipo de subleito), é determinado a partir de uma planilha para cálculo deste custo apresentada na Tabela 2.1 (CARVALHO et al., 1994).

TABELA 2.1 – Modelo de planilha para cálculo do custo inicial unitário.

Concreto Simples			Espessura = 0,11 m			
Equipamento	Quantidade	Utilização		Operação		Custo Horário (R\$/h)
		Produtivo	Improdutivo	Produtivo	Improdutivo	
Usina de Concreto*	1	0,20	0,80	17,42	12,12	13,18
Régua Vibratória	1	1,00	0,00	4,15	3,85	4,15
Caminhão Betoneira*	2	0,31	0,69	68,79	28,58	82,09
Serra de Disco	1	0,20	0,80	3,29	2,33	2,52
Vibrador de Imersão	1	0,42	0,58	1,96	1,76	1,84
Pá Carregadeira	1	0,53	0,47	44,56	18,69	32,31
Total						136,09
espessura 11						
Mão de Obra (R\$/h)				21,48		
Custo Unitário de Mão de Obra e Equipamento				3,94		
Materiais	Unidade	Custo	Consumo	Custo Unitário		
Cimento*	kg	0,11	42,90	4,72		
Areia*	m3	15,43	0,06	0,87		
Brita*	m3	18,50	0,09	1,67		
aditivo*	kg	1,77	0,13	0,23		
Produto de Cura	kg	2,63	0,25	0,67		
Aço*	kg	0,62	0,77	0,48		
Selante	kg	12,13	0,03	0,39		
Isolante	m2	0,27	1,00	0,27		
Disco de Serra	un.	195,00	0,00	0,08		
Fôrma	m	1,48	0,29	0,42		
TOTAL				9,79		
Custo Unitário Total (R\$/m²)				13,73		
* variam de acordo com a espessura						

Fonte: CARVALHO et al (1994)

3 - Custos de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos Rígidos

3.1 - Introdução

Os materiais utilizados em pavimentação apresentam, durante a vida em serviço, alguma forma de deterioração, 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. A manifestação, à superfície, desses diferentes mecanismos de deterioração da estrutura do pavimento resultam em defeitos capazes de diminuir ou contribuir para a diminuição da serventia (BERTOLLO, 1997).

O aparecimento de defeitos nos pavimentos não deve ser encarado como algo alarmante, a menos que eles ocorram precocemente, mas o reconhecimento do tipo de defeito, a quantificação de sua *extensão* e identificação do nível de *severidade* (definidas, respectivamente, como a frequência de ocorrência ou quantidade de superfície de rolamento sujeita a um determinado tipo de defeito e o grau de deterioração associado aos vários tipos de defeitos, normalmente classificados em três níveis: baixo, médio e alto) e a determinação das causas dos defeitos são de vital importância para seleção das estratégias de intervenção e definição das atividades de manutenção e reabilitação.

O reconhecimento de que pavimentos diferentes apresentam diferentes taxas de deterioração é importante para a escolha do momento mais indicado para a realização das atividades de manutenção e reabilitação (M & R). Qualquer pavimento, entre eles o pavimento rígido, deve ser projetado e construído de maneira que seja garantida, economicamente, a qualidade de rolamento. Quando o pavimento deixa de atender satisfatoriamente à segurança e conforto ou quando sua estrutura está ameaçada, algum tipo de reparo deve ser empreendido para que ele volte a ser seguro e de rolamento suave.

O conhecimento da condição de suporte de um pavimento fornece informações para o projeto das atividades de M & R, permitindo a seleção de alternativas corretas de gerência. Para a obtenção destas informações são feitas avaliações da condição da superfície do pavimento, para as quais deve-se dispor de um método de identificação de defeitos que determine o tipo, classe, severidade, magnitude e localização dos defeitos (DOMINGUES, 1994).

O levantamento de defeitos no campo, quando utilizado para a gerência em nível de projeto, permite a seleção de atividades de manutenção e reabilitação mais apropriadas, com as quais pode-se estimar os custos correspondentes ao longo da vida em serviço.

3.2 - Tipos de Defeitos dos Pavimentos Rígidos

As formas de deterioração de pavimentos rígidos consideradas neste trabalho são as apresentadas no Manual de Identificação de Defeitos do Programa SHRP (1993). Pode-se fazer uma adaptação, a partir do manual da AASHTO (1986), e distinguir suas causas principais (Tabela 3.1).

TABELA 3.1 - 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

O SHRP (*Strategic Highway Research Program*) é um programa de pesquisa rodoviária que teve início em 1987 e terá, no total, uma duração de 20 anos, incluindo o acompanhamento do desempenho das seções-teste a longo prazo (LTPP, *Long-Term Pavement Performance*). Os dados coletados incluem a condição do pavimento, o clima, o volume e as cargas de tráfego.

Desenvolvido pelos Estados Unidos e mais 15 países (SHRP, 1993), tem por objetivo principal a obtenção de pavimentos melhores e mais duradouros. Particularmente, o Manual de Identificação de Defeitos proposto descreve os tipos de defeitos, o nível de severidade e forma de medição, tanto para pavimentos rígidos quanto para flexíveis.

3.2.1 – Defeitos do Programa SHRP para Pavimentos Rígidos

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. O Manual oferece, para cada tipo de defeito, a sua descrição, o seu nível de severidade (fotos) e o método para sua medição.

Estes defeitos são agrupados com base em suas causas, e podem ser assim classificados:

- trincas: de canto, circulares, longitudinais e transversais;
- deficiências em juntas: selante deteriorado e esborcinamento de juntas;
- defeitos superficiais: trincas interligadas, escamação, agregados polidos e estilhaçamento;
- defeitos diversos: alçamento localizado, degrau na junta transversal ou na trinca, desnível entre a pista e o acostamento, separação entre a pista e o acostamento, remendos e bombeamento.

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(Figura 3.1) .

Níveis de severidade:

- baixo: pedaço do canto não quebrado, sem desnível entre os bordos;
- médio: desnível entre os bordos menor que 13 mm e ocorrência de esborcinamento;
- alto: desnível maior que 13 mm e ocorrência de esborcinamento.

Como medir: registrar o número de cantos trincados, para cada nível de severidade.

FIGURA 3.1 - Trinca de canto com severidade média.

2. **Trincas Circulares:** ocorrem adjacentes à junta, trinca ou bordos livres, começando no canto da placa e com formato de meia-lua (Figura 3.2).

Níveis de severidade:

- baixo: trincas com pequena abertura e sem perda de material;
- médio: trincas bem definidas, com perda ou deslocamento de alguns pequenos pedaços;
- alto: padrão bem definido, com significativa perda de material.

Como medir: registrar o número de placas com trinca circular e a área afetada, para cada nível de severidade.

FIGURA 3.2 - Trincas circulares com severidade alta.

3. **Trincas Longitudinais:** placa com trincas paralelas ao eixo da pista (Figura 3.3).

Níveis de severidade:

- baixo: sem perda de material, abertura inferior a 3 mm e sem desnível entre os bordos;

- médio: perda de material, abertura entre 3 e 13 mm, e desnível de até 13 mm;
- alto: perda de material e esborcinamento, abertura superior a 13 mm e desnível maior que 13 mm.

Como medir: registrar a extensão das trincas longitudinais e os níveis de severidade correspondentes.

FIGURA 3.3 - Trinca longitudinal com severidade alta.

4. **Trincas Transversais:** ocorrem perpendicularmente à linha de centro do pavimento (Figura 3.4).

Níveis de severidade:

- baixo: sem perda de material, abertura inferior a 3 mm e sem desnível entre os bordos;
- médio: perda de material, abertura entre 3 e 6 mm e desnível inferior a 6 mm;

- alto: perda de material e esborcinamento, abertura superior a 6 mm e desnível maior que 6 mm.

Como medir: registrar o número de trincas, a extensão e os níveis de severidade correspondentes.

FIGURA 3.4 - Trinca transversal com severidade alta.

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 (Figura 3.5).

5a. junta transversal

5b. junta longitudinal

Níveis de severidade:

- baixo: descrição acima ocorrendo em menos de 10% da junta;
- médio: descrição acima ocorrendo entre 10 e 50% da junta;
- alto: descrição acima ocorrendo em 50% ou mais da junta.

Como medir: indicar se a junta transversal/longitudinal foi selada e registrar o número de juntas transversais/longitudinais seladas, para cada nível de severidade.

FIGURA 3.5 - Junta com selante deteriorado com severidade média.

6. **Esborcimento de Junta Longitudinal:** trinca, fratura, lascamento ou desgaste do bordo da placa dentro de um limite de 0,6 m da junta (Figura 3.6).

Níveis de severidade:

- baixo: lascamento com largura menor que 75 mm, medido em direção ao centro da junta, com perda de material e sem remendo;
- médio: lascamento com largura entre 75 e 150 mm, medido em direção ao centro da junta, com perda de material;
- alto: lascamento com largura maior que 150 mm, medido em direção ao centro da junta, com perda de material.

Como medir: registrar o comprimento (em metros) do esborcinamento nas juntas longitudinais, para cada nível de severidade.

FIGURA 3.6 - Esborcinamento de junta longitudinal com severidade alta.

7. Esborcinamento de Junta Transversal: trinca, fratura, lascamento ou desgaste do bordo da placa dentro de um limite de 0,6 m da junta (Figura 3.7).

Níveis de severidade:

- baixo: lascamento com largura menor que 75 mm, medido em direção ao centro da junta, com perda de material e sem remendo;
- médio: lascamento com largura entre 75 e 150 mm, medido em direção ao centro da junta, com perda de material;
- alto: lascamento com largura maior que 150 mm, medido em direção ao centro da junta, com perda de material.

Como medir: registrar o número de juntas afetadas, para cada nível de severidade, avaliando toda junta transversal no nível de severidade mais alto, desde que sua extensão corresponda a pelo menos 10% do comprimento total da junta.

FIGURA 3.7 - Esborcinamento da junta transversal com severidade média.

8a. 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 (Figura 3.8).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar o número de ocorrências e a área afetada.

FIGURA 3.8 - Trincas interligadas.

8b. Escamação: deterioração do concreto da superfície da placa, normalmente entre 3 e 13 mm, podendo ocorrer em qualquer lugar da superfície do pavimento (Figura 3.9).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar o número de ocorrências e a área afetada.

FIGURA 3.9 – Escamação.

9. Agregados Polidos: a argamassa da superfície e a textura usada são perdidas e o agregado fica exposto (Figura 3.10).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar a área da superfície afetada.

FIGURA 3.10 - Agregados polidos.

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.

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar o número de ocorrências por metro quadrado.

11. **Alçamento Localizado:** movimentos ascendentes localizados na superfície do pavimento na junta transversal ou trinca, muitas vezes acompanhados de quebra do concreto naquela área (Figura 3.11).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar o número de placas alçadas.

FIGURA 3.11 - Alçamento localizado.

12. **Degrau na Junta Transversal ou na Trinca:** diferença na elevação transversal de uma junta ou trinca (Figura 3.12).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar o desnível em milímetros.

FIGURA 3.12 - Degrau na trinca transversal.

13. **Desnível Pista/Acostamento:** diferença na elevação entre o bordo da placa e o acostamento, ocorre principalmente quando o exterior do acostamento se adensa (Figura 3.13).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: medir o desnível, em milímetros, na junta longitudinal entre o bordo da faixa de tráfego e o acostamento, a cada 15 m.

FIGURA 3.13 - Desnível pista/acostamento.

14. **Separação Pista/Acostamento:** alargamento da junta entre o bordo da placa e o acostamento (Figura 3.14).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: medir a separação, em milímetros, ao longo da junta longitudinal entre o bordo da pista e o acostamento, em intervalos de 15 m.

FIGURA 3.14 - Separação pista/acostamento, selante em boas condições.

15. **Remendos:** área do pavimento original, maior que de $0,1 \text{ m}^2$, removida e substituída, ou material adicional aplicado ao pavimento após a construção (Figura 3.15).

Níveis de severidade:

- baixo: remendo apresentando defeitos com severidade baixa, sem desnível ou adensamento;
- médio: remendo apresentando defeitos com severidade média ou desnível e adensamento de até 6 mm no perímetro do remendo;
- alto: remendo apresentando defeitos com severidade alta ou desnível e adensamento superior a 6 mm no perímetro do remendo.

Como medir: registrar o número de remendos e a área afetada, para cada nível de severidade, registrando em separado o tipo de material (rígido ou flexível).

FIGURA 3.15 - Remendo pequeno em concreto asfáltico com severidade baixa.

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 (Figura 3.16).

Níveis de severidade: não se aplicam.

Como medir: registrar o número de ocorrências e o comprimento do pavimento afetado.

FIGURA 3.16 – Bombeamento.

3.3 – Estratégias de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos Rígidos

À medida em que o pavimento se deteriora, aumenta a necessidade de medidas para restabelecer o conforto do rolamento e a segurança. A presença de um defeito na superfície do pavimento deve, portanto, ser descrita e caracterizada adequadamente, permitindo a tomada de decisão sobre a estratégia de manutenção mais apropriada.

Conforme discutido por FERNANDES JR. (1996), dada uma condição atual de um pavimento, existe uma estratégia (conjunto de atividades, seja de manutenção ou de reabilitação) mais apropriada, capaz de resultar em uma vida em serviço mais longa e em maior capacidade de suporte das cargas do tráfego. Para tanto, a análise de estratégias deve garantir que a atividade de manutenção mais adequada seja aplicada no devido momento.

As atividades de manutenção consistem, geralmente, de selagem, injeção, estriagem, remendos, tratamento superficial e recapeamento delgado, enquanto as atividades de reabilitação mais utilizadas em pavimentos rígidos são drenagem, recapeamento estrutural (espesso) e reconstrução.

Apresenta-se, na Tabela 3.2, um resumo das principais atividades de M&R indicadas para os dezesseis tipos de defeitos considerados no Manual de Identificação de Defeitos dos Pavimentos do Programa SHRP.

TABELA 3.2 - Resumo das causas dos defeitos considerados no Programa SHRP e principais atividades de manutenção e reabilitação (SHRP - 1993, INSTITUTO DO ASFALTO – 1989, DNER - 1989).

DEFEITO	CAUSAS DOS DEFEITOS	ATIVIDADES DE M&R
1 TRINCAS DE CANTO	<ul style="list-style-type: none"> • Transferência insuficiente de carga nas juntas • Recalques da fundação • Empenamento da placa • Bombeamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção: selagem e injeção (reparos temporários) • Reabilitação: recapeamento
2 TRINCAS CIRCULARES	<ul style="list-style-type: none"> • Pressões de expansão do ciclo gelo-degelo sobre o concreto com agregados susceptíveis à ação do congelamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção: selagem e injeção (reparos temporários) • Reabilitação: recapeamento (nos estágios avançados)
3 TRINCAS LONGITUDINAIS	<ul style="list-style-type: none"> • Empenamento térmico • Atraso na execução das juntas longitudinais • Fadiga • Perda de suporte da fundação 	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • Retração volumétrica do concreto novo • Transferência insuficiente de carga nas juntas • Perda de suporte do subleito 	<ul style="list-style-type: none"> • 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

TABELA 3.2 - Resumo das causas dos defeitos considerados no Programa SHRP e principais atividades de manutenção e reabilitação (continuação).

DEFEITO	CAUSAS DOS DEFEITOS	ATIVIDADES DE M&R
5 DETERIORAÇÃO DO SELANTE	<ul style="list-style-type: none"> Selagem mal feita Selante inadequado 	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção: substituição do selante
6 – 7 ESBORCINAMENTO DE JUNTAS	<ul style="list-style-type: none"> Tensão excessiva nas juntas devido às cargas de tráfego Inexistência de selante nas juntas e trincas Infiltração de material incompressível nas juntas ou trincas 	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção: selagem das juntas e/ou trincas, remendos com concreto Reabilitação: recapeamento, reconstrução
8 TRINCAS INTERLIGADAS	<ul style="list-style-type: none"> Pressões de expansão do ciclo gelo-degelo sobre o concreto com agregados susceptíveis à ação do congelamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção: selagem e injeção (reparos temporários) Reabilitação: recapeamento (nos estágios avançados)
9 AGREGADOS POLIDOS	<ul style="list-style-type: none"> Emprego de concreto de baixa qualidade Ação abrasiva do tráfego, que elimina as asperezas e angularidades das partículas 	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção: estriagem, recapeamento delgado
10 ESTILHAÇAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> Excesso de vibração ou adição de água à massa Grande quantidade de argamassa Agregado de má qualidade Cura inadequada. 	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção: aplicação de um tratamento superficial ou recapeamento delgado
11 ALÇAMENTO LOCALIZADO	<ul style="list-style-type: none"> Restrições feitas à expansão linear do pavimento quando sujeito a temperaturas elevadas Presença de material incompressível nas juntas e/ou trincas 	<ul style="list-style-type: none"> Manutenção: remendo Reabilitação: reconstrução

TABELA 3.2 - Resumo das causas dos defeitos considerados no Programa SHRP e principais atividades de manutenção e reabilitação (continuação).

DEFEITO	CAUSAS DOS DEFEITOS	ATIVIDADES DE M&R
12 DESNÍVEL NA JUNTA TRANSVERSAL OU TRINCA	<ul style="list-style-type: none"> Erosão ou adensamento do acostamento 	<ul style="list-style-type: none"> Reabilitação: recomposição do acostamento
13 DEGRAU PISTA/ACOSTAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> Erosão do subleito ou sub-base Bombeamento do subleito 	<ul style="list-style-type: none"> Reabilitação: drenagem e recapeamento
14 SEPARAÇÃO PISTA/ACOSTAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> Erosão do acostamento Consolidação do acostamento 	<ul style="list-style-type: none"> Reabilitação: recomposição do acostamento
15 REMENDOS		
16 BOMBEAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> Existência de água nos vazios sob o revestimento Pressão exercida pelas cargas do tráfego 	<ul style="list-style-type: none"> Reabilitação: Drenagem

3.4 – Custos de Manutenção e Reabilitação

Toda estrutura sofre um processo de deterioração ao longo do tempo e estradas e ruas não constituem exceção. Os pavimentos deterioram-se mais lentamente nos anos iniciais de sua vida em serviço, mas à medida em que se aproximam do final da vida de projeto a taxa de deterioração aumenta. Quase sempre, atividades de manutenção e reabilitação têm de ser efetuadas para corrigir os defeitos e, dessa forma, proteger os investimentos e proporcionar aos usuários conforto, segurança e tráfego com economia (FERNANDES JR., 1996).

Existe íntima relação entre o desempenho dos pavimentos, as estratégias de intervenção, as datas de realização das atividades de manutenção e os custos. A Figura 3.17 é um exemplo de que atrasos nas atividades de manutenção e reabilitação quase sempre resultam em gastos adicionais quando a manutenção é finalmente executada, pois as estruturas dos pavimentos sofrem deterioração acelerada à medida em que as intervenções são adiadas.

FIGURA 3.17 - Exemplo de inter-relação entre desempenho dos pavimentos, estratégia de intervenção, data da manutenção e custos (FHWA, 1989).

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 M & R (“quando fazer”).

Este trabalho, no capítulo que desenvolve a análise dos fatores que influenciam os custos dos pavimentos rígidos, apresenta os custos de M & R para as estruturas dimensionadas pelos métodos da PCA/66 e da AASHTO/86, considerando os fatores módulo de reação do subleito e volume de tráfego.

Determinam-se as curvas de desempenho, segundo o método da AASHTO/86, para todas as estruturas consideradas, através das quais são determinadas as datas em que os pavimentos atingem o nível de serventia mínimo admissível (ano da reconstrução). O custo de reconstrução considerado neste trabalho é de 70% do custo inicial. Quanto aos custos de M & R, adotam-se as intervenções e custos recomendados pela ABCP (CARVALHO et al., 1994):

- manutenção de rotina (todos os anos): 0,30% do custo inicial, com acréscimo de 10% ao ano;
- resselagem de juntas e trincas (a cada cinco anos, incluindo material e mão-de-obra): R\$ 0,65 / m².

Apresentam-se, nas Figuras 3.18 e 3.19, exemplos das curvas de desempenho, e nas Tabelas 3.3 e 3.4 exemplos de cálculo dos custos de M & R correspondentes.

FIGURA 3.18 – Curva de desempenho para dimensionamento pelo método da PCA/66: espessura de 27 cm, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$.

TABELA 3.3 – Custos de M & R, inclusive Valor Presente Líquido (VPL), para dimensionamento pelo método da PCA/66.

Método de Dimensionamento: PCA/66			N = 10 ⁸	k = 41,40 MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 27 cm		Custo Inicial de R\$ 18.943.200,00	
Ano	Manutenção de Rotina (R\$)	Resselação (R\$)	Reconstrução (R\$)	Custo Total (M&R) (R\$)	VPL (R\$)
1	56.829,60			56.829,60	50.740,71
2	62.512,56			62.512,56	49.834,63
3	68.763,82			68.763,82	48.944,73
4	75.640,20			75.640,20	48.070,71
5	83.204,22	468.000,00		551.204,22	312.768,08
6	91.524,64			91.524,64	46.369,23
7	100.677,10			100.677,10	45.541,21
8	110.744,81			110.744,81	44.727,97
9	121.819,29			121.819,29	43.929,26
10	134.001,22	468.000,00		602.001,22	193.828,28
11	147.401,35			147.401,35	42.374,36
12	162.141,48			162.141,48	41.617,68
13	178.355,63			178.355,63	40.874,51
14	196.191,19			196.191,19	40.144,60
15	215.810,31	468.000,00		683.810,31	124.929,59
16	237.391,34			237.391,34	38.723,67
17	261.130,48			261.130,48	38.032,18
18	287.243,52			287.243,52	37.353,03
19	315.967,88		13.260.240,00	13.576.207,88	1.576.289,74
20	347.564,66	468.000,00		815.564,66	84.546,95
21	382.321,13			382.321,13	35.387,50
22	420.553,24			420.553,24	34.755,58
23	462.608,57			462.608,57	34.134,94
24	508.869,43			508.869,43	33.525,39
25	559.756,37	468.000,00		1.027.756,37	60.456,03
26	615.732,00			615.732,00	32.338,74
27	677.305,21			677.305,21	31.761,27
28	745.035,73			745.035,73	31.194,10
29	819.539,30			819.539,30	30.637,06
30	901.493,23	468.000,00		1.369.493,23	45.710,84
Total				25.416.369,51	3.319.542,56

FIGURA 3.19 – Curva de desempenho para dimensionamento pelo método da AASHTO/86: espessura de 28 cm, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^8$.

TABELA 3.4 – Custos de M & R, inclusive Valor Presente Líquido (VPL), para dimensionamento pelo método da AASHTO/86.

Método de Dimensionamento: AASHTO/86			$N = 10^8$	$k = 2,76$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m			Espessura = 28 cm	Custo Inicial de R\$ 19.512.000,00	
Ano	Manutenção de Rotina (R\$)	Resselação (R\$)	Reconstrução (R\$)	Custo Total (M&R) (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	58.536,00			58.536,00	52.264,29
2	64.389,60			64.389,60	51.330,99
3	70.828,56			70.828,56	50.414,37
4	77.911,42			77.911,42	49.514,11
5	85.702,56	468.000,00		553.702,56	314.185,70
6	94.272,81			94.272,81	47.761,54
7	103.700,09			103.700,09	46.908,66
8	114.070,10			114.070,10	46.071,00
9	125.477,11			125.477,11	45.248,31
10	138.024,83	468.000,00		606.024,83	195.123,77
11	151.827,31			151.827,31	43.646,72
12	167.010,04			167.010,04	42.867,32
13	183.711,04			183.711,04	42.101,83
14	202.082,15			202.082,15	41.350,01
15	222.290,36	468.000,00		690.290,36	126.113,47
16	244.519,40			244.519,40	39.886,41
17	268.971,34			268.971,34	39.174,15
18	295.868,47			295.868,47	38.474,61
19	325.455,32			325.455,32	37.787,57
20	358.000,85	468.000,00		826.000,85	85.628,84
21	393.800,94			393.800,94	36.450,06
22	433.181,03			433.181,03	35.799,17
23	476.499,13			476.499,13	35.159,90
24	524.149,05			524.149,05	34.532,04
25	576.563,95	468.000,00		1.044.563,95	61.444,71
26	634.220,35			634.220,35	33.309,77
27	697.642,38			697.642,38	32.714,95
28	767.406,62			767.406,62	32.130,75
29	844.147,28			844.147,28	31.556,99
30	928.562,01	468.000,00		1.396.562,01	46.614,34
Total				12.436.822,11	1.815.566,35

4 - Custos de Operação dos Veículos em Pavimentos Rígidos

4.1 - Introdução

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 e em virtude da depreciação são ainda maiores.

Para a determinação do custo total da modalidade rodoviária, portanto, são de vital importância os 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, toma-se por base para a análise dos custos de operação dos veículos em pavimentos rígidos as pesquisas desenvolvidas pelo Banco Mundial no “Estudo de Normas de Projeto e de Manutenção de Rodovias” (HDMSS – *Highway Design and Maintenance Standards Study*), que resultaram o modelo HDM (*Highway Design and Maintenance Standards Model*), capaz de fornecer os custos e benefícios ao longo da vida em serviço

da rodovia e, dessa forma, permitir a análise técnico-econômica dos investimentos rodoviários.

Conforme apresentado por FERNANDES JR. (1994), 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 Chaussees*). 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 sã, havia falta de evidências empíricas para o inter-relacionamento das diferentes parcelas que compõem os custos rodoviários. Por exemplo, a deterioração das rodovias só podia ser baseada nos resultados do *AASHO Road Test*, desenvolvido sob condições particulares de estrutura de pavimentos, clima e tráfego acelerado, e os custos de operação dos veículos existentes não podiam ser relacionados às condições das rodovias. Conseqüentemente, 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 subtropical e para rodovias não pavimentadas. Forneceu, também, a primeira relação quantitativa entre os custos de operação dos veículos e as condições da rodovia, mostrando pela primeira vez 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*).

No estudo realizado no Quênia foi limitada a consideração de diferentes estruturas, materiais, volumes de tráfego, climas, traçados geométricos e tipos de veículos. Assim, um estudo muito mais amplo foi conduzido no Brasil de 1976 a 1981, com participação de equipes técnicas brasileira e internacional, sob a coordenação do Prof. Dr. W. Ronald Hudson, da Universidade do Texas em Austin. 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, para previsão da evolução da deterioração das rodovias e dos efeitos da manutenção, e para previsão 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 modelo HDM (HDM-III), lançada em 1987 (a versão para microcomputadores foi lançada em 1989). O modelo HDM-III tem sido utilizado em aproximadamente 40 países em desenvolvimento para avaliação 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).

4.2 – Modelo HDM-III

4.2.1- Estrutura Conceitual

O objetivo da metodologia técnico-econômica utilizada pelo modelo HDM-III é minimizar o custo total da modalidade rodoviária. Os dados considerados incluem 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).

Resumidamente, a inter-relação entre os fatores 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) afeta 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.

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 4.1.

Figura 4.1 – Parcelas que compõem o custo total da modalidade rodoviária.

4.2.2 – Estrutura Lógica

O modelo HDM-III compara estimativas de custos e faz avaliações econômicas de diferentes alternativas de construção e manutenção, incluindo diferentes estratégias de intervenções ao longo do tempo. O HDM-III 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 usuário também pode obter a taxa interna de retorno, o valor presente líquido ou os benefícios no primeiro ano. O modelo 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, custo dos atrasos e custos dos acidentes, dentre outros).

São necessários os seguintes dados de entrada:

- características da rodovia existente e fatores ambientais;
- construção e custos correspondentes;
- manutenção e custos unitários: critérios de intervenção e tipos de atividades;
- características dos veículos e custos unitários;
- volume de tráfego, distribuição e taxa de crescimento;
- custos e benefícios exógenos;
- alternativas de intervenção;
- estudos, comparações econômicas e análises de sensibilidade.

O período de análise, a moeda, a unidade da irregularidade longitudinal e os tipos de relatórios também são definidos pelo usuário. Embora o número total de dados de entrada seja elevado, uma vez estabelecidos os arquivos básicos, pouco esforço é requerido para a análise de diferentes combinações.

O programa computacional que contém as equações do modelo HDM-III estima, para cada segmento e estratégia de intervenção, ano a ano, o tráfego, a condição da rodovia e os recursos utilizados, as velocidades e os recursos consumidos pelos veículos, e os custos correspondentes aos recursos utilizados e à operação dos veículos. A lógica computacional é estruturada em cinco sub-modelos:

1. Tráfego (dados de entrada: tipos de veículos, volume, taxa de crescimento, cargas, parâmetros físicos): calcula, para cada classe de veículos, a evolução do volume do tráfego e o número de solicitações equivalentes do eixo-padrão;
2. Construção (dados de entrada: terreno, materiais, pluviosidade, geometria, espessura, custos unitários): estima as quantidades e os custos da estratégia de construção especificada, bem como a condição logo após a construção;
3. Deterioração da Rodovia e Manutenção (dados de entrada: tipo de pavimento e resistência, número de aplicações do eixo-padrão, idade, condição, estratégia de manutenção): calcula as variações na condição do pavimento para vários modos de deterioração (trincas, deformação permanente nas trilhas das rodas, irregularidade longitudinal), em função do tipo e resistência do pavimento, volume do tráfego e cargas por eixo, idade e meio ambiente. Determina, para as diferentes estratégias de manutenção, os efeitos sobre o desempenho dos pavimentos, seus quantitativos e custos;
4. Custo de Operação dos Veículos (dados de entrada: geometria e irregularidade longitudinal, dados de potência e outros parâmetros físicos, por tipo de veículo, e custos unitários): estima a velocidade de operação dos veículos, o consumo de pneus, combustíveis e lubrificantes, o desgaste dos equipamentos e a depreciação. Utiliza as equações empírico-mecanísticas desenvolvidas a partir do estudo realizado no Brasil;
5. Custos e Benefícios Exógenos (dados de entrada: atrasos, acidentes, problemas ambientais etc.): são adicionados em anos específicos, devendo ser em termos econômicos (excluindo taxas).

Após os quantitativos e custos para todos os anos e estratégias terem sido computados, o programa calcula o valor presente líquido das várias alternativas, em termos econômicos e financeiros (sem e com a inclusão de taxas, respectivamente). O usuário pode especificar vários tipos de relatórios, dentre os quais:

- Condição das rodovias: evolução dos diferentes tipos de deterioração (particularmente da irregularidade longitudinal), manutenção anual para cada alternativa;
- Custos dos usuários: velocidade, custos operacionais por classe de veículo, recursos consumidos;
- Resumo da comparação de alternativas: custos totais, valor presente líquido, benefícios do primeiro ano, taxa interna de retorno.

4.2.3 - Limitações

Embora o modelo HDM-III tenha uma sólida e ampla base empírica, também apresenta algumas limitações:

- submodelo para cálculo dos custos de operação dos veículos não inclui os efeitos de tráfego sob condição de congestionamento;
- a manutenção de rotina não pode ser alterada diretamente;
- os acidentes rodoviários e os custos correspondentes, os impactos ambientais e os atrasos são considerados a partir de estimativas exógenas ao programa;
- o submodelo de deterioração da rodovia não inclui pavimentos rígidos nem condições de congelamento.

Apesar dessa última limitação, utiliza-se neste trabalho o modelo HDM-III para a previsão dos custos operacionais, particularmente para quantificação da

evolução desses custos com a irregularidade longitudinal, obtida a partir de correlação desta com a curva de desempenho determinada segundo o método da AASHTO.

4.2.4 – Modelo HDM-IV

O HDM-IV (*Highway Development and Management Tools*), que está sendo desenvolvido em cinco centros de pesquisas: na Suécia (*Swedish National Roads Administration*), no Reino Unido (*University of Birmingham*), na Malásia (*Highway Research Institute*), nos Estados Unidos (*World Bank, Washington D.C.*) e no Chile (*Latin American Study Team*), é uma atualização do HDM-III (CARVALHO et al., 1996). Seus objetivos principais são:

- inclusão de outros tipos de pavimento, dentre eles o pavimento rígido;
- considerações sobre pavimentos asfálticos em climas frios;
- atualização das características da frota de veículos;
- considerações sobre aspectos de segurança e meio ambiente;
- considerações sobre os efeitos de congestionamento;
- atualização do programa computacional (versão para Windows).

A Federação Interamericana de Cimento (FICEM) é 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 permitirão análises técnicas do desempenho de pavimentos rígidos a longo prazo em função das estratégias de manutenção ou reabilitação adotadas. Os objetivos da equipe latino-americana formada pela FICEM são:

- definir modelos de deterioração para pavimentos rígidos antes e depois de sofrerem intervenções;
- definir ações de manutenção para pavimentos rígidos;
- definir e/ou sugerir valores limites de intervenção;
- fornecer informações à equipe sediada na Inglaterra, responsável pela elaboração do programa computacional HDM-IV;
- elaborar um programa para avaliação de diversas alternativas de intervenção (HDM-IV/FICEM).

No que diz respeito aos pavimentos rígidos, a estrutura do programa computacional HDM-IV apresenta como dados de entrada a condição atual dos pavimentos (representada pelos valores do índice de serventia ou da irregularidade longitudinal), características do projeto, padrões de manutenção e reabilitação e definição da frota de veículos. Com esses dados, os modelos de deterioração fornecem a evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo, utilizada para o cálculo dos custos de operação dos veículos.

Portanto, a estrutura do HDM-IV será, no que diz respeito aos custos operacionais, semelhante à do HDM-III, ou seja, baseada na determinação desses custos a partir da irregularidade longitudinal. Além disso, conforme apresentado por CARVALHO et al. (1996), pretende-se utilizar no HDM-IV os mesmos modelos de custo de operação dos veículos (VOC, *Vehicle Operation Costs*) existentes na versão HDM-III.

4.3 - Custos de Operação dos Veículos

Neste trabalho, os custos de operação dos veículos em pavimentos rígidos são calculados seguindo-se a seqüência:

- determinação da curva de desempenho (variação da serventia ao longo do tempo), segundo o método da AASHTO (1986);
- correlação entre o índice de serventia (IS) e a irregularidade longitudinal (IRI);
- utilização de modelos de custos de operação dos veículos (HDM-III), em função da evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo.

4.3.1 – Relação entre Serventia e Irregularidade Longitudinal

A serventia, conceito apresentado por CAREY & IRICK (1960), é definida como a habilidade de uma seção de pavimento, à época da observação, para servir ao tráfego de automóveis e caminhões com elevados volumes e altas velocidades (AASHTO, 1972). A capacidade de um pavimento servir satisfatoriamente ao tráfego durante um período de tempo é o seu desempenho, que pode ser interpretado como a variação da serventia com o tempo e/ou tráfego (Figura 4.2).

FIGURA 4.2 - Conceito de serventia-desempenho (CAREY & IRICK, 1960).

O PSI (*Present Serviceability Index*) foi padronizado pelo DNER como ISA (Índice de Serventia Atual), ou simplesmente IS (Índice de Serventia), sendo determinado objetivamente a partir de medidas da irregularidade longitudinal, que pode ser quantificada por perfilômetros, perfilógrafos e equipamentos do tipo “resposta”, como por exemplo o integrador de irregularidade IPR/USP.

A irregularidade longitudinal é definida como o desvio que a superfície do pavimento apresenta em relação a uma superfície plana de referência. Afeta a dinâmica dos veículos, o conforto e a segurança do rolamento e os custos operacionais, sendo expressa pelo Índice de Irregularidade Longitudinal Internacional (IRI – *International Roughness Index*) ou por correlações com outras unidades utilizadas (QI, *Quarter-car Index* e BI, *Bump Integrator*, por exemplo).

A irregularidade longitudinal afeta diretamente os itens que compõem o custo de operação dos veículos:

- velocidade: afeta os custos relacionados ao tempo dos passageiros e das cargas. A velocidade de operação calculada pelo programa computacional HDM-III não considera os efeitos de atrasos provocados por outros veículos (congestionamento de tráfego, por exemplo). Depende, portanto, somente dos tipos de veículos, da geometria da via e da irregularidade longitudinal;
- consumo de combustível: conforme apresentado por ARCHONDO-CALLAO & FAIZ (1993), depende da potência exigida do motor pelas condições da via (geometria e irregularidade longitudinal) e da velocidade do motor (rpm);

- consumo de lubrificantes: é função da irregularidade longitudinal (CHESHER & HARRISON, 1985) do tipo de veículo;
- desgaste de pneus: depende do tipo de veículo (carros de passeio ou veículos de carga) e da irregularidade longitudinal;
- mão-de-obra e peças utilizadas na manutenção dos veículos: dependem da irregularidade longitudinal e da idade do veículo (CHESHER & HARRISON, 1985).

Portanto, para uma dada geometria de via e uma determinada frota de veículos, os custos de operação passam a depender, significativamente, tão somente da irregularidade longitudinal.

ARCHONDO-CALLAO & FAIZ (1993) apresentam uma tabela que permite a estimativa do IRI a partir de avaliações qualitativas da condição do pavimento (Tabela 4.1). Outra estimativa do IRI a partir da condição dos pavimentos é apresentada na Tabela 4.2 (OECD, 1989).

TABELA 4.1 - Estimativa do IRI por avaliações qualitativas da condição do pavimento (ARCHONDO-CALLAO & FAIZ, 1993).

Avaliação Qualitativa	IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI, m/km)	
	Pavimentada	Não Pavimentada
Excelente	2	4
Bom	4	8
Regular	6	12
Ruim	8	15
Péssimo	10	20

TABELA 4.2 - Estimativa do IRI a partir da condição do pavimento (OECD, 1989).

ÍNDICE DE SERVENTIA (IS)	IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)
4,5	1,50
4,0	3,00
3,5	4,50
3,0	6,00
2,5	7,00
2	8,00
1,5	9,50

Neste trabalho, adota-se a relação entre o índice de serventia (IS) e a irregularidade longitudinal (IRI) apresentada na Equação 4.1, obtida através de análise de regressão polinomial (Figura 4.3). Desta forma, a partir das curvas de desempenho, determinadas segundo o método da AASHTO e exemplificadas na Figura 4.4 (Método PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$), obtém-se, para cada uma das estruturas consideradas, a evolução da irregularidade longitudinal ao longo do tempo (Figura 4.5).

$$IRI = 0,2121 \times (IS)^4 - 2,6566 \times (IS)^3 + 11,78 \times (IS)^2 - 24,276 \times (IS) + 27,298 \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$R^2 = 0,9998$$

FIGURA 4.3 - Relação entre o índice de serventia (IS) e a irregularidade longitudinal (IRI).

FIGURA 4.4 - Curva de desempenho pelo método da PCA/66, espessura de 27cm, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$.

FIGURA 4.5 - Evolução da irregularidade longitudinal (IRI) no tempo (PCA/66, espessura de 27 cm, $k = 41,40$ MPa/m e $N = 10^8$).

4.3.2 .- Relação entre Irregularidade Longitudinal e Custos Operacionais

Nos pavimentos rodoviários, a irregularidade longitudinal é a variável ligada à condição dos pavimentos que mais influencia os custos de operação dos veículos, tendo impacto sobre a segurança, o conforto e a velocidade do tráfego. Apesar de fatores como a velocidade dificultar a transferência dos modelos de custos do HDM-III para outras situações (vias urbanas, por exemplo), não existem evidências de que a irregularidade longitudinal observada em um pavimento rígido tenha efeitos muito diferentes sobre os custos de operações dos veículos.

A partir de simulações com o HDM-III, são obtidos os custos de operação dos veículos em função da irregularidade longitudinal. Os dados de entrada específicos para os estudos deste trabalho, diferentes dos que fazem parte do banco de dados (“default”) do Banco Mundial, são:

- extensão: 100 km;
- largura do pavimento: 7,20 m;
- curvas verticais (“subida mais descida”): 10 m/km;
- curvatura horizontal: 15 graus/km;
- altitude: 800 m;
- pluviosidade: 1.300 mm/ano;
- CBR do subleito: variável, conforme apresentado no capítulo 2;
- volume de tráfego: variável, conforme apresentado no capítulo 2, constando somente de dois tipos (automóveis e caminhões);
- porcentagem de caminhões: 25%;
- fator de veículo dos automóveis: zero;
- fator de veículo dos caminhões: 2,5;

- taxa de crescimento: 4% nos primeiros 5 anos, 3% nos 10 anos seguintes e 2% nos últimos 15 anos;
- período de análise: 30 anos;
- taxa de desconto: 12%;
- moeda: real (R\$);
- equações de Custos de Operação de Veículos (COV): Brasil.

Para cada valor de irregularidade tem-se o custo de operação unitário (R\$/veículo/ano, válido apenas para a composição de tráfego e fator de veículo adotados neste trabalho, uma vez que se utiliza como variável representativa do tráfego o número de aplicações equivalentes do eixo-padrão, N) correspondente, conforme equação de regressão polinomial (Equação 4.2) apresentada na Figura 4.6, a partir da qual podem ser obtidos os custos de operação, ano a ano, para cada combinação de volume de tráfego (N) e condição do pavimento (IRI). A Tabela 4.3 e Figura 4.7 apresentam um exemplo de determinação dos custos operacionais ao longo do período de análise, inclusive do cálculo do VPL.

$$COV = -0,0203 \times (IRI)^3 + 0,5406 \times (IRI)^2 - 1,3964 \times (IRI) + 66,215 \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$R^2 = 0,998$$

FIGURA 4.6 - Relação entre a irregularidade longitudinal (IRI) e o custo de operação unitário (R\$/veículo/ano).

TABELA 4.3 – Custo operacional e valor presente líquido (VPL): método da PCA/66, espessura de 27 cm, $k = 41,4$ MPa/m e $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^8$	$k = 41,10$ MPa/m	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	2.130.000	139.688.914,08	124.722.244,72
2	4,11	2,60	65,88	2.215.200	145.931.466,75	116.335.671,84
3	4,00	2,95	66,28	2.303.808	152.691.860,33	108.683.050,18
4	3,89	3,31	66,78	2.395.960	159.999.471,51	101.682.556,68
5	3,78	3,67	67,37	2.491.799	167.870.655,21	95.254.318,05
6	3,67	4,03	68,05	2.566.553	174.647.440,09	88.481.828,38
7	3,56	4,39	68,79	2.643.549	181.838.566,56	82.254.532,90
8	3,44	4,73	69,57	2.722.856	189.416.967,80	76.502.336,39
9	3,33	5,06	70,37	2.804.541	197.352.508,09	71.167.292,87
10	3,22	5,38	71,18	2.888.678	205.615.249,76	66.202.607,46
11	3,10	5,69	72,04	2.975.338	214.347.972,74	61.619.920,12
12	2,98	5,99	72,88	3.064.598	223.361.308,90	57.331.284,72
13	2,86	6,27	73,70	3.156.536	232.639.206,48	53.314.901,74
14	2,74	6,53	74,49	3.251.232	242.179.562,87	49.554.736,77
15	2,62	6,77	75,25	3.348.769	251.996.652,64	46.038.846,29
16	2,47	7,08	76,21	3.415.745	260.314.337,59	42.462.907,35
17	2,31	7,37	77,17	3.484.059	268.864.067,76	39.158.529,95
18	2,15	7,69	78,21	3.553.741	277.922.110,94	36.140.877,39
19	2,00	8,01	79,27	3.624.815	287.344.266,27	33.362.616,61
20	4,11	2,60	65,88	3.697.312	243.569.032,67	25.250.013,69
21	3,95	3,10	66,48	3.771.258	250.697.310,45	23.204.445,70
22	3,80	3,61	67,27	3.846.683	258.755.188,23	21.384.178,34
23	3,64	4,12	68,21	3.923.617	267.646.344,73	19.749.076,64
24	3,49	4,61	69,27	4.002.089	277.222.463,75	18.263.999,00
25	3,33	5,07	70,38	4.082.131	287.314.096,74	16.900.765,19
26	3,15	5,57	71,70	4.163.774	298.536.396,82	15.679.373,20
27	2,97	6,02	72,98	4.247.049	309.954.180,94	14.534.861,13
28	2,78	6,43	74,20	4.331.990	321.446.477,25	13.458.728,61
29	2,60	6,81	75,36	4.418.630	333.001.331,79	12.448.680,28
30	2,42	7,16	76,49	4.507.002	344.727.518,88	11.506.288,88
Total =					1.542.651.471,10	

FIGURA 4.7 - Evolução dos custos operacionais em função da irregularidade longitudinal: método da PCA/66, espessura de 27 cm, $k = 41,4$ MPa/m e $N = 10^8$.

5 - Custo Total de Pavimentos Rígidos: Análise Fatorial

5.1 – Introdução

Neste capítulo apresentam-se os cálculos dos custos de construção, custos de manutenção e reabilitação e custos de operação dos veículos, conforme discutido anteriormente, e também a análise do custo total dos pavimentos rígidos em função dos seguintes fatores:

- volume de tráfego: representado pelo número de aplicações equivalentes do eixo-padrão de 80 kN;
- capacidade de suporte do subleito: representada pelo módulo de reação do subleito;
- método de dimensionamento: selecionados o Método da PCA/66 e o Método da AASHTO/86.

Para os fatores selecionados, foram considerados os seguintes níveis:

- volume de tráfego (N): 10^6 , 10^7 e 10^8 ;
- capacidade de suporte do subleito: baixa ($k = 2,76$ MPa/m; CBR = 3%) e alta ($k = 13,80$ MPa/m; CBR = 12%).

5.2 – Custos de Construção

Os custos de construção são determinados a partir de planilha para cálculo do custo inicial unitário utilizada pela ABCP (CARVALHO et al., 1994), cujos itens variam em função da espessura do pavimento, determinada através dos dois métodos de dimensionamento adotados. As espessuras calculadas para os fatores selecionados são apresentadas na Tabela 5.1:

TABELA 5.1 – Dimensionamento pelos métodos da AASHTO/86 e PCA/66 em função do volume de tráfego e tipo de subleito (espessuras em cm).

Método de Dimensionamento	AASHTO/86		PCA/66	
N	k = 2,76 (MPa/m)	k = 13,8 (MPa/m)	k = 41,40 (MPa/m)	k = 138,0 (MPa/m)
10^6	14	13	13	11
10^7	20	19	18	17
10^8	28	27	27	25

Obs: os valores $k = 2,76$ MPa/m (AASHTO/86) e $k = 41,40$ MPa/m (PCA/66) são equivalentes e correspondem a um subleito fraco (CBR = 3%), assim como os valores $k = 13,8$ MPa/m (AASHTO/86) e $k = 138,0$ MPa/m (PCA/66) correspondem a um subleito mais resistente (CBR = 12%).

Deve-se destacar que no dimensionamento pelo Método da AASHTO consideram-se, além dos fatores apresentados, os seguintes valores:

- $Z_r = -1,282$ ($R = 90\%$);
- $S_0 = 0,35$;
- $p_t = 2,0$;
- $S_c = 5$ MPa;

- $SD = 0,60$ MPa;
- $z = 1,645$ (5%);
- $C_d = 1,10$;
- $J = 2,5$ (concreto simples com barra de transferência);
- $E_c = 28.000$ MPa;
- $LS = 2$ (sub-base granular).

A ABCP utiliza a planilha para determinação dos custos unitários apresentada na Figura 2.1. Para as espessuras calculadas anteriormente, tem-se os custos de construção unitários (Tabela 5.2), que multiplicados pela extensão do trecho (100 km) e pela largura da pista (7,20 m) fornecem o custo inicial (Tabela 5.3).

TABELA 5.2 – Custos de construção unitários em função da espessura.

Espessuras (cm)	Custo unitário (R\$/m ²)
11	13,73
13	15,30
14	16,09
17	18,45
18	19,24
19	20,02
20	20,81
25	24,74
27	26,31
28	27,10

TABELA 5.3 – Custos de construção totais para cada uma das espessuras.

Largura do Trecho		7,20 m
Extensão do Trecho		100.000 m
Espessuras (cm)	Custo Inicial (R\$/m ²)	Custo Inicial Total (R\$)
11	13,73	9.885.600,00
13	15,30	11.016.000,00
14	16,09	11.584.800,00
17	18,45	13.284.000,00
18	19,24	13.852.800,00
19	20,02	14.414.400,00
20	20,81	14.983.200,00
25	24,74	17.812.800,00
27	26,31	18.943.200,00
28	27,10	19.512.000,00

5.3 - Custos de Manutenção e Reabilitação

Os custos de manutenção e reabilitação são determinados a partir de recomendações da ABCP, discutidas anteriormente no capítulo 3, e da curva de desempenho dos pavimentos rígidos, utilizada, neste caso, apenas para a determinação da data de reconstrução (nível de serventia mínimo admissível).

Apresentam-se, a seguir, as curvas de desempenho (Figuras 5.1 a 5.12) e os custos de manutenção e reabilitação de pavimentos rígidos para todas as combinações dos fatores selecionados (Tabelas 5.4 a 5.15).

FIGURA 5.1 - Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 13$ cm), $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^6$.

TABELA 5.4 – Custos de M & R: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da PCA			N = 10 ⁶	k = 41,4 MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 13 cm		Custo Inicial de R\$ 11.016.000,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Resselagem (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
1	33.048,00			33.048,00	29.507,14
2	36.352,80			36.352,80	28.980,23
3	39.988,08			39.988,08	28.462,73
4	43.986,89			43.986,89	27.954,46
5	48.385,58	468.000,00		516.385,58	293.011,04
6	53.224,13			53.224,13	26.965,00
7	58.546,55			58.546,55	26.483,49
8	64.401,20			64.401,20	26.010,57
9	70.841,32			70.841,32	25.546,09
10	77.925,46	468.000,00		545.925,46	175.773,39
11	85.718,00			85.718,00	24.641,88
12	94.289,80			94.289,80	24.201,84
13	103.718,78			103.718,78	23.769,67
14	114.090,66			114.090,66	23.345,21
15	125.499,73	468.000,00		593.499,73	108.430,18
16	138.049,70			138.049,70	22.518,90
17	151.854,67			151.854,67	22.116,77
18	167.040,13			167.040,13	21.721,83
19	183.744,15			183.744,15	21.333,94
20	202.118,56	468.000,00		670.118,56	69.469,02
21	222.330,42		7.711.200,00	7.933.530,42	734.324,49
22	244.563,46			244.563,46	20.211,34
23	269.019,81			269.019,81	19.850,42
24	295.921,79			295.921,79	19.495,95
25	325.513,97	468.000,00		793.513,97	46.677,12
26	358.065,36			358.065,36	18.805,88
27	393.871,90			393.871,90	18.470,06
28	433.259,09			433.259,09	18.140,24
29	476.585,00			476.585,00	17.816,31
30	524.243,50	468.000,00		992.243,50	33.119,03
			Total	15.955.398,46	1.997.154,22

FIGURA 5.2 - Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 11$ cm), $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^6$.

TABELA 5.5 – Custos de M & R: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da PCA			$N = 10^6$	$k = 138$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m				Custo Inicial de R\$ 9.885.600,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Espessura = 11 cm Resselação (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
1	29.656,80			29.656,80	26.479,29
2	32.622,48			32.622,48	26.006,44
3	35.884,73			35.884,73	25.542,04
4	39.473,20			39.473,20	25.085,93
5	43.420,52	468.000,00		511.420,52	290.193,74
6	47.762,57			47.762,57	24.198,01
7	52.538,83			52.538,83	23.765,90
8	57.792,71			57.792,71	23.341,51
9	63.571,98			63.571,98	22.924,69
10	69.929,18	468.000,00		537.929,18	173.198,80
11	76.922,10			76.922,10	22.113,27
12	84.614,31			84.614,31	21.718,39
13	93.075,74			93.075,74	21.330,56
14	102.383,32			102.383,32	20.949,66
15	112.621,65	468.000,00		580.621,65	106.077,40
16	123.883,81			123.883,81	20.208,13
17	136.272,19			136.272,19	19.847,27
18	149.899,41			149.899,41	19.492,86
19	164.889,36			164.889,36	19.144,77
20	181.378,29	468.000,00	6.919.920,00	7.569.298,29	784.684,67
21	199.516,12			199.516,12	18.467,13
22	219.467,73			219.467,73	18.137,36
23	241.414,51			241.414,51	17.813,48
24	265.555,96			265.555,96	17.495,38
25	292.111,55	468.000,00		760.111,55	44.712,27
26	321.322,71			321.322,71	16.876,13
27	353.454,98			353.454,98	16.574,77
28	388.800,48			388.800,48	16.278,79
29	427.680,52			427.680,52	15.988,10
30	470.448,58	468.000,00		938.448,58	31.323,47
Total				14.606.286,33	1.929.970,22

FIGURA 5.3 - Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 14$ cm), $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^6$.

TABELA 5.6 – Custos de M & R: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da AASHTO			$N = 10^6$	$k = 2,76$ Mpa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m			Espessura = 14 cm	Custo Inicial de R\$ 11.584.800,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Ressagem (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
1	34.754,40			34.754,40	31.030,71
2	38.229,84			38.229,84	30.476,59
3	42.052,82			42.052,82	29.932,37
4	46.258,11			46.258,11	29.397,86
5	50.883,92	468.000,00		518.883,92	294.428,67
6	55.972,31			55.972,31	28.357,31
7	61.569,54			61.569,54	27.850,93
8	67.726,49			67.726,49	27.353,59
9	74.499,14			74.499,14	26.865,14
10	81.949,06	468.000,00		549.949,06	177.068,88
11	90.143,96			90.143,96	25.914,24
12	99.158,36			99.158,36	25.451,48
13	109.074,20			109.074,20	24.996,99
14	119.981,61			119.981,61	24.550,62
15	131.979,78	468.000,00		599.979,78	109.614,06
16	145.177,75			145.177,75	23.681,64
17	159.695,53			159.695,53	23.258,75
18	175.665,08			175.665,08	22.843,42
19	193.231,59			193.231,59	22.435,50
20	212.554,75	468.000,00		680.554,75	70.550,91
21	233.810,22			233.810,22	21.641,38
22	257.191,25			257.191,25	21.254,93
23	282.910,37			282.910,37	20.875,38
24	311.201,41			311.201,41	20.502,60
25	342.321,55	468.000,00		810.321,55	47.665,79
26	376.553,70			376.553,70	19.776,91
27	414.209,07			414.209,07	19.423,75
28	455.629,98			455.629,98	19.076,89
29	501.192,98			501.192,98	18.736,23
30	551.312,28	468.000,00		1.019.312,28	34.022,53
Total				8.524.891,06	1.319.036,06

FIGURA 5.4 - Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 13$ cm), $k = 13,8$ MPa/m. $N = 10^6$.

TABELA 5.7 – Custos de M & R: AASHTO/86, $k = 13,8$ MPa/m, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da AASHTO		$N = 10^6$		$k = 13,80$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 13 cm		Custo Inicial de R\$ 11.016.000,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Ressagem (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
1	33.048,00			33.048,00	29.507,14
2	36.352,80			36.352,80	28.980,23
3	39.988,08			39.988,08	28.462,73
4	43.986,89			43.986,89	27.954,46
5	48.385,58	468.000,00		516.385,58	293.011,04
6	53.224,13			53.224,13	26.965,00
7	58.546,55			58.546,55	26.483,49
8	64.401,20			64.401,20	26.010,57
9	70.841,32			70.841,32	25.546,09
10	77.925,46	468.000,00		545.925,46	175.773,39
11	85.718,00			85.718,00	24.641,88
12	94.289,80			94.289,80	24.201,84
13	103.718,78			103.718,78	23.769,67
14	114.090,66			114.090,66	23.345,21
15	125.499,73	468.000,00		593.499,73	108.430,18
16	138.049,70			138.049,70	22.518,90
17	151.854,67			151.854,67	22.116,77
18	167.040,13			167.040,13	21.721,83
19	183.744,15			183.744,15	21.333,94
20	202.118,56	468.000,00		670.118,56	69.469,02
21	222.330,42			222.330,42	20.578,82
22	244.563,46			244.563,46	20.211,34
23	269.019,81			269.019,81	19.850,42
24	295.921,79			295.921,79	19.495,95
25	325.513,97	468.000,00		793.513,97	46.677,12
26	358.065,36			358.065,36	18.805,88
27	393.871,90			393.871,90	18.470,06
28	433.259,09			433.259,09	18.140,24
29	476.585,00			476.585,00	17.816,31
30	524.243,50	468.000,00		992.243,50	33.119,03
Total				8.244.198,46	1.283.408,54

FIGURA 5.5 - Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 18$ cm), $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^7$.

TABELA 5.8 – Custos de M & R: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da PCA		$N = 10^7$		$k = 41,40$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 18 cm		Custo Inicial de R\$ 13.852.800,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Ressagem (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
1	41558.40			41.558,40	37.105,71
2	45714.24			45.714,24	36.443,11
3	50285.66			50.285,66	35.792,34
4	55314.23			55.314,23	35.153,19
5	60845.65	468.000,00		528.845,65	300.081,23
6	66930.22			66.930,22	33.908,93
7	73623.24			73.623,24	33.303,42
8	80985.56			80.985,56	32.708,71
9	89084.12			89.084,12	32.124,63
10	97992.53	468.000,00		565.992,53	182.234,45
11	107791.79			107.791,79	30.987,56
12	118570.97			118.570,97	30.434,21
13	130428.06			130.428,06	29.890,75
14	143470.87			143.470,87	29.356,98
15	157817.95	468.000,00		625.817,95	114.334,60
16	173599.75			173.599,75	28.317,88
17	190959.73			190.959,73	27.812,20
18	210055.70		9.696.960,00	9.907.015,70	1.288.304,26
19	231061.27			231.061,27	26.827,78
20	254167.39	468.000,00		722.167,39	74.864,76
21	279584.13			279.584,13	25.878,20
22	307542.55			307.542,55	25.416,09
23	338296.80			338.296,80	24.962,23
24	372126.48			372.126,48	24.516,48
25	409339.13	468.000,00		877.339,13	51.607,99
26	450273.04			450.273,04	23.648,70
27	495300.35			495.300,35	23.226,41
28	544830.38			544.830,38	22.811,65
29	599313.42			599.313,42	22.404,30
30	659244.76	468.000,00		1.127.244,76	37.625,09
Total				19.341.068,39	2.722.083,84

FIGURA 5.6 - Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 17$ cm), $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^7$.

TABELA 5.9 – Custos de M & R: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da PCA			$N = 10^7$		$k = 138,0$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m			Espessura = 17 cm		Custo Inicial de R\$ 13.284.000,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Resselação (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)	
1	39.852,00			39.852,00	35.582,14	
2	43.837,20			43.837,20	34.946,75	
3	48.220,92			48.220,92	34.322,70	
4	53.043,01			53.043,01	33.709,79	
5	58.347,31	468.000,00		526.347,31	298.663,60	
6	64.182,04			64.182,04	32.516,62	
7	70.600,25			70.600,25	31.935,97	
8	77.660,27			77.660,27	31.365,68	
9	85.426,30			85.426,30	30.805,58	
10	93.968,93	468.000,00		561.968,93	180.938,96	
11	103.365,82			103.365,82	29.715,20	
12	113.702,41			113.702,41	29.184,58	
13	125.072,65			125.072,65	28.663,42	
14	137.579,91			137.579,91	28.151,58	
15	151.337,90	468.000,00		619.337,90	113.150,72	
16	166.471,69			166.471,69	27.155,14	
17	183.118,86			183.118,86	26.670,23	
18	201.430,75		9.298.800,00	9.500.230,75	1.235.406,11	
19	221.573,82			221.573,82	25.726,22	
20	243.731,21	468.000,00		711.731,21	73.782,87	
21	268.104,33			268.104,33	24.815,63	
22	294.914,76			294.914,76	24.372,50	
23	324.406,24			324.406,24	23.937,27	
24	356.846,86			356.846,86	23.509,82	
25	392.531,55	468.000,00		860.531,55	50.619,31	
26	431.784,70			431.784,70	22.677,68	
27	474.963,17			474.963,17	22.272,72	
28	522.459,49			522.459,49	21.875,00	
29	574.705,44			574.705,44	21.484,37	
30	632.175,98	468.000,00		1.100.175,98	36.721,59	
Total				18.662.215,79	2.634.679,76

FIGURA 5.7 - Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 20$ cm), $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^7$.

TABELA 5.10 – Custos de M & R: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da AASHTO			$N = 10^7$	$k = 2,76$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m				Custo Inicial de R\$ 14.983.200,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Espessura = 20 cm	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
		Ressagem (RS)			
1	44.949,60			44.949,60	40.133,57
2	49.444,56			49.444,56	39.416,90
3	54.389,02			54.389,02	38.713,03
4	59.827,92			59.827,92	38.021,72
5	65.810,71	468.000,00		533.810,71	302.898,53
6	72.391,78			72.391,78	36.675,93
7	79.630,96			79.630,96	36.021,00
8	87.594,05			87.594,05	35.377,77
9	96.353,46			96.353,46	34.746,02
10	105.988,81	468.000,00		573.988,81	184.809,03
11	116.587,69			116.587,69	33.516,17
12	128.246,45			128.246,45	32.917,67
13	141.071,10			141.071,10	32.329,86
14	155.178,21			155.178,21	31.752,54
15	170.696,03	468.000,00		638.696,03	116.687,38
16	187.765,63			187.765,63	30.628,64
17	206.542,20			206.542,20	30.081,70
18	227.196,42			227.196,42	29.544,53
19	249.916,06			249.916,06	29.016,95
20	274.907,67	468.000,00		742.907,67	77.014,83
21	302.398,43			302.398,43	27.989,88
22	332.638,27			332.638,27	27.490,06
23	365.902,10			365.902,10	26.999,17
24	402.492,31			402.492,31	26.517,04
25	442.741,54	468.000,00		910.741,54	53.572,83
26	487.015,70			487.015,70	25.578,46
27	535.717,27			535.717,27	25.121,70
28	589.288,99			589.288,99	24.673,10
29	648.217,89			648.217,89	24.232,51
30	713.039,68	468.000,00		1.181.039,68	39.420,65
Total				10.201.940,52	1.531.899,18

FIGURA 5.8 - Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 19$ cm), $k = 13,8$ MPa/m, $N = 10^7$.

TABELA 5.11 – Custos de M & R: AASHTO/86, $k = 13,8$ MPa/m, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da AASHTO			N' = 10 ⁷	k = 13,80 MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 19 cm		Custo Inicial de R\$ 14.144.000,00	
Ano	Manutenção de Rotina (R\$)	Ressagem (R\$)	Reconstrução (R\$)	Custo Total (M&R) (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	43.243,20			43.243,20	38.610,00
2	47.567,52			47.567,52	37.920,54
3	52.324,27			52.324,27	37.243,38
4	57.556,70			57.556,70	36.578,32
5	63.312,37	468.000,00		531.312,37	301.480,91
6	69.643,61			69.643,61	35.283,62
7	76.607,97			76.607,97	34.653,55
8	84.268,76			84.268,76	34.034,74
9	92.695,64			92.695,64	33.426,98
10	101.965,20	468.000,00		569.965,20	183.513,54
11	112.161,72			112.161,72	32.243,82
12	123.377,90			123.377,90	31.668,03
13	135.715,69			135.715,69	31.102,53
14	149.287,25			149.287,25	30.547,13
15	164.215,98	468.000,00		632.215,98	115.503,50
16	180.637,58			180.637,58	29.465,90
17	198.701,34			198.701,34	28.939,73
18	218.571,47			218.571,47	28.422,94
19	240.428,62			240.428,62	27.915,39
20	264.471,48	468.000,00		732.471,48	75.932,95
21	290.918,63			290.918,63	26.927,32
22	320.010,49			320.010,49	26.446,47
23	352.011,54			352.011,54	25.974,21
24	387.212,69			387.212,69	25.510,39
25	425.933,96	468.000,00		893.933,96	52.584,15
26	468.527,36			468.527,36	24.607,44
27	515.380,09			515.380,09	24.168,02
28	566.918,10			566.918,10	23.736,45
29	623.609,91			623.609,91	23.312,58
30	685.970,90	468.000,00		1.153.970,90	38.517,15
Total				9.921.247,92	1.496.271,67

FIGURA 5.9 - Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 27$ cm), $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^8$.

TABELA 5.12 – Custos de M & R: PCA/66, $k = 41,40$ MPa/m, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento: PCA/66			$N = 10^8$	$k = 41,40$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m				Custo Inicial de R\$ 18.943.200,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Resslagem (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	VPL (RS)
1	56.829,60			56.829,60	50.740,71
2	62.512,56			62.512,56	49.834,63
3	68.763,82			68.763,82	48.944,73
4	75.640,20			75.640,20	48.070,71
5	83.204,22	468.000,00		551.204,22	312.768,08
6	91.524,64			91.524,64	46.369,23
7	100.677,10			100.677,10	45.541,21
8	110.744,81			110.744,81	44.727,97
9	121.819,29			121.819,29	43.929,26
10	134.001,22	468.000,00		602.001,22	193.828,28
11	147.401,35			147.401,35	42.374,36
12	162.141,48			162.141,48	41.617,68
13	178.355,63			178.355,63	40.874,51
14	196.191,19			196.191,19	40.144,60
15	215.810,31	468.000,00		683.810,31	124.929,59
16	237.391,34			237.391,34	38.723,67
17	261.130,48			261.130,48	38.032,18
18	287.243,52			287.243,52	37.353,03
19	315.967,88		13.260.240,00	13.576.207,88	1.576.289,74
20	347.564,66	468.000,00		815.564,66	84.546,95
21	382.321,13			382.321,13	35.387,50
22	420.553,24			420.553,24	34.755,58
23	462.608,57			462.608,57	34.134,94
24	508.869,43			508.869,43	33.525,39
25	559.756,37	468.000,00		1.027.756,37	60.456,03
26	615.732,00			615.732,00	32.338,74
27	677.305,21			677.305,21	31.761,27
28	745.035,73			745.035,73	31.194,10
29	819.539,30			819.539,30	30.637,06
30	901.493,23	468.000,00		1.369.493,23	45.710,84
Total				25.416.369,51	3.319.542,56

FIGURA 5.10 - Curva de desempenho: PCA/66 ($e = 25$ cm), $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^8$.

TABELA 5.13 – Custos de M & R: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da PCA			N = 10 ⁸	k = 138 MPa/m+F509	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 25 cm		Custo Inicial de R\$ 17.812.800,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Resselagem (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	VPL (RS)
1	53.438,40			53.438,40	47.712,86
2	58.782,24			58.782,24	46.860,84
3	64.660,46			64.660,46	46.024,04
4	71.126,51			71.126,51	45.202,18
5	78.239,16	468.000,00		546.239,16	309.950,77
6	86.063,08			86.063,08	43.602,23
7	94.669,39			94.669,39	42.823,62
8	104.136,32			104.136,32	42.058,91
9	114.549,96			114.549,96	41.307,86
10	126.004,95	468.000,00		594.004,95	191.253,70
11	138.605,45			138.605,45	39.845,75
12	152.465,99			152.465,99	39.134,22
13	167.712,59			167.712,59	38.435,40
14	184.483,85			184.483,85	37.749,05
15	202.932,24	468.000,00		670.932,24	122.576,81
16	223.225,46			223.225,46	36.412,91
17	245.548,00			245.548,00	35.762,68
18	270.102,80			270.102,80	35.124,06
19	297.113,09			297.113,09	34.496,84
20	326.824,39	468.000,00		794.824,39	82.396,87
21	359.506,83			359.506,83	33.275,81
22	395.457,52			395.457,52	32.681,60
23	435.003,27			435.003,27	32.098,00
24	478.503,60		12.468.960,00	12.947.463,60	853.006,13
25	526.353,95	468.000,00		994.353,95	58.491,19
26	578.989,35			578.989,35	30.408,99
27	636.888,29			636.888,29	29.865,97
28	700.577,11			700.577,11	29.332,65
29	770.634,82			770.634,82	28.808,85
30	847.698,31	468.000,00		1.315.698,31	43.915,28
Total				24.067.257,38	2.530.616,10

FIGURA 5.11 - Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 28$ cm), $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^8$.

TABELA 5.14 – Custos de M & R: AASHTO/86, $k = 2,76$ MPa/m, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento: AASHTO/86			$N = 10^8$	$k = 2,76$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m				Custo Inicial de RS 19.512.000,00	
Ano	Manutenção de Rotina (RS)	Espessura = 28 cm			
		Resselação (RS)	Reconstrução (RS)	Custo Total (M&R) (RS)	V.P.L. (RS)
1	58.536,00			58.536,00	52.264,29
2	64.389,60			64.389,60	51.330,99
3	70.828,56			70.828,56	50.414,37
4	77.911,42			77.911,42	49.514,11
5	85.702,56	468.000,00		553.702,56	314.185,70
6	94.272,81			94.272,81	47.761,54
7	103.700,09			103.700,09	46.908,66
8	114.070,10			114.070,10	46.071,00
9	125.477,11			125.477,11	45.248,31
10	138.024,83	468.000,00		606.024,83	195.123,77
11	151.827,31			151.827,31	43.646,72
12	167.010,04			167.010,04	42.867,32
13	183.711,04			183.711,04	42.101,83
14	202.082,15			202.082,15	41.350,01
15	222.290,36	468.000,00		690.290,36	126.113,47
16	244.519,40			244.519,40	39.886,41
17	268.971,34			268.971,34	39.174,15
18	295.868,47			295.868,47	38.474,61
19	325.455,32			325.455,32	37.787,57
20	358.000,85	468.000,00		826.000,85	85.628,84
21	393.800,94			393.800,94	36.450,06
22	433.181,03			433.181,03	35.799,17
23	476.499,13			476.499,13	35.159,90
24	524.149,05			524.149,05	34.532,04
25	576.563,95	468.000,00		1.044.563,95	61.444,71
26	634.220,35			634.220,35	33.309,77
27	697.642,38			697.642,38	32.714,95
28	767.406,62			767.406,62	32.130,75
29	844.147,28			844.147,28	31.556,99
30	928.562,01	468.000,00		1.396.562,01	46.614,34
Total				12.436.822,11	1.815.566,35

FIGURA 5.12 - Curva de desempenho: AASHTO/86 ($e = 27$ cm), $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^8$.

TABELA 5.15 – Custos de M & R: AASHTO/86, $k = 13,80$ MPa/m, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da AASHTO		$N = 10^8$		$k = 13,80$ MPa/m	
Extensão do Trecho = 100.000 m		Espessura = 27 cm		Custo Inicial de R\$ 18.943.200,00	
Ano	Manutenção de Rotina (R\$)	Ressagem (R\$)	Reconstrução (R\$)	Custo Total (M&R) (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	56.829,60			56.829,60	50.740,71
2	62.512,56			62.512,56	49.834,63
3	68.763,82			68.763,82	48.944,73
4	75.640,20			75.640,20	48.070,71
5	83.204,22	468.000,00		551.204,22	312.768,08
6	91.524,64			91.524,64	46.369,23
7	100.677,10			100.677,10	45.541,21
8	110.744,81			110.744,81	44.727,97
9	121.819,29			121.819,29	43.929,26
10	134.001,22	468.000,00		602.001,22	193.828,28
11	147.401,35			147.401,35	42.374,36
12	162.141,48			162.141,48	41.617,68
13	178.355,63			178.355,63	40.874,51
14	196.191,19			196.191,19	40.144,60
15	215.810,31	468.000,00		683.810,31	124.929,59
16	237.391,34			237.391,34	38.723,67
17	261.130,48			261.130,48	38.032,18
18	287.243,52			287.243,52	37.353,03
19	315.967,88			315.967,88	36.686,01
20	347.564,66	468.000,00		815.564,66	84.546,95
21	382.321,13			382.321,13	35.387,50
22	420.553,24			420.553,24	34.755,58
23	462.608,57			462.608,57	34.134,94
24	508.869,43			508.869,43	33.525,39
25	559.756,37	468.000,00		1.027.756,37	60.456,03
26	615.732,00			615.732,00	32.338,74
27	677.305,21			677.305,21	31.761,27
28	745.035,73			745.035,73	31.194,10
29	819.539,30			819.539,30	30.637,06
30	901.493,23	468.000,00		1.369.493,23	45.710,84
Total				12.156.129,51	1.779.938,84

5.4 – Custos de Operação dos Veículos

Os custos de operação dos veículos são determinados a partir da curva de desempenho dos pavimentos, através de correlações entre o índice de serventia e a irregularidade longitudinal e desta com o consumo dos itens que compõem os custos operacionais (combustível, lubrificantes, pneus etc.).

Com os custos operacionais unitários (Equação 4.2, Figura 4.6), função da irregularidade longitudinal, pode-se determinar os custos de operação dos veículos, ano a ano, a partir dos volumes de tráfego (Tabela 5.16). As Tabelas 5.17 a 5.28 apresentam os custos de operação dos veículos, inclusive já descontados à taxa de 12% (VPL), em função dos fatores método de dimensionamento (PCA/66 e AASHTO/86), volume de tráfego ($N = 10^6$, 10^7 e 10^8) e tipo de subleito.

TABELA 5.16 - Volume de tráfego acumulado (N, número de solicitações equivalentes do eixo padrão de 80 kN).

Ano	10^6	10^7	10^8
1	2,13E+04	2,13E+05	2,13E+06
2	4,35E+04	4,35E+05	4,35E+06
3	6,65E+04	6,65E+05	6,65E+06
4	9,04E+04	9,04E+05	9,04E+06
5	1,15E+05	1,15E+06	1,15E+07
6	1,41E+05	1,41E+06	1,41E+07
7	1,67E+05	1,67E+06	1,67E+07
8	1,95E+05	1,95E+06	1,95E+07
9	2,23E+05	2,23E+06	2,23E+07
10	2,52E+05	2,52E+06	2,52E+07
11	2,81E+05	2,81E+06	2,81E+07
12	3,12E+05	3,12E+06	3,12E+07
13	3,44E+05	3,44E+06	3,44E+07
14	3,76E+05	3,76E+06	3,76E+07
15	4,10E+05	4,10E+06	4,10E+07

Ano	10^6	10^7	10^8
16	4,44E+05	4,44E+06	4,44E+07
17	4,79E+05	4,79E+06	4,79E+07
18	5,14E+05	5,14E+06	5,14E+07
19	5,50E+05	5,50E+06	5,50E+07
20	5,87E+05	5,87E+06	5,87E+07
21	6,25E+05	6,25E+06	6,25E+07
22	6,64E+05	6,64E+06	6,64E+07
23	7,03E+05	7,03E+06	7,03E+07
24	7,43E+05	7,43E+06	7,43E+07
25	7,84E+05	7,84E+06	7,84E+07
26	8,25E+05	8,25E+06	8,25E+07
27	8,68E+05	8,68E+06	8,68E+07
28	9,11E+05	9,11E+06	9,11E+07
29	9,55E+05	9,55E+06	9,55E+07
30	1,00E+06	1,00E+07	1,00E+08

TABELA 5.17 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 41,10$ MPa/m, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^6$	$k = 41,10$ MPa/m	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veíc/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	21.300	1.396.889,14	1.247.222,45
2	4,22	2,25	65,58	22.152	1.452.764,71	1.158.135,13
3	4,22	2,25	65,58	23.038	1.510.875,29	1.075.411,19
4	4,22	2,25	65,58	23.960	1.571.310,31	998.596,11
5	4,22	2,25	65,58	24.918	1.634.162,72	927.267,81
6	4,22	2,27	65,59	25.666	1.683.416,37	852.871,12
7	4,21	2,28	65,60	26.435	1.734.158,12	784.445,07
8	4,21	2,29	65,61	27.229	1.786.433,05	721.510,35
9	4,20	2,30	65,62	28.045	1.840.287,59	663.626,15
10	4,20	2,31	65,63	28.887	1.895.769,60	610.387,07
11	4,15	2,48	65,76	29.753	1.956.679,35	562.498,56
12	4,10	2,64	65,92	30.646	2.020.260,84	518.550,64
13	4,04	2,81	66,11	31.565	2.086.638,32	478.203,65
14	3,99	2,98	66,31	32.512	2.155.930,32	441.146,06
15	3,96	3,08	66,45	33.488	2.225.223,99	406.540,10
16	3,69	3,96	67,90	34.157	2.319.169,66	378.306,81
17	3,42	4,79	69,71	34.841	2.428.660,28	353.720,63
18	3,16	5,55	71,64	35.537	2.545.938,61	331.072,81
19	2,89	6,20	73,51	36.248	2.664.705,38	309.390,35
20	2,62	6,77	75,25	36.973	2.782.246,67	288.426,51
21	2,00	8,01	79,27	37.713	2.989.529,75	276.709,71
22	4,22	2,25	65,58	38.467	2.522.718,24	208.483,77
23	4,22	2,25	65,58	39.236	2.573.172,61	189.869,15
24	4,22	2,25	65,58	40.021	2.624.636,06	172.916,54
25	4,22	2,25	65,58	40.821	2.677.128,78	157.477,57
26	4,18	2,38	65,68	41.638	2.734.641,07	143.625,56
27	4,14	2,50	65,79	42.470	2.793.973,33	131.019,41
28	4,10	2,63	65,91	43.320	2.855.190,63	119.544,74
29	4,06	2,75	66,05	44.186	2.918.354,54	109.097,65
30	4,02	2,88	66,20	45.070	2.983.523,03	99.583,80
					Total =	14.715.656,47

TABELA 5.18 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^6$	$k = 138$ MPa/m	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	21.300	1.396.889,14	1.247.222,45
2	4,22	2,25	65,58	22.152	1.452.764,71	1.158.135,13
3	4,22	2,25	65,58	23.038	1.510.875,29	1.075.411,19
4	4,22	2,25	65,58	23.960	1.571.310,31	998.596,11
5	4,22	2,25	65,58	24.918	1.634.162,72	927.267,81
6	4,22	2,27	65,59	25.666	1.683.416,37	852.871,12
7	4,22	2,25	65,58	26.435	1.733.683,23	784.230,25
8	4,22	2,25	65,58	27.229	1.785.693,73	721.211,75
9	4,22	2,25	65,58	28.045	1.839.264,54	663.257,23
10	4,22	2,25	65,58	28.887	1.894.442,47	609.959,77
11	4,20	2,31	65,63	29.753	1.952.642,69	561.338,11
12	4,18	2,38	65,68	30.646	2.012.735,79	516.619,15
13	4,16	2,44	65,73	31.565	2.074.786,85	475.487,60
14	4,14	2,50	65,79	32.512	2.138.863,02	437.653,75
15	4,12	2,56	65,85	33.488	2.205.033,55	402.851,39
16	3,70	3,94	67,87	34.157	2.318.319,54	378.168,14
17	3,27	5,23	70,80	34.841	2.466.827,77	359.279,50
18	2,85	6,29	73,78	35.537	2.621.979,99	340.961,20
19	2,42	7,15	76,46	36.248	2.771.622,90	321.804,20
20	2,00	8,01	79,27	36.973	2.930.911,52	303.838,12
21	4,22	2,25	65,58	37.713	2.473.253,18	228.923,35
22	4,22	2,25	65,58	38.467	2.522.718,24	208.483,77
23	4,22	2,25	65,58	39.236	2.573.172,61	189.869,15
24	4,22	2,25	65,58	40.021	2.624.636,06	172.916,54
25	4,22		65,58	40.821	2.677.128,78	157.477,57
26	4,19	2,33	65,64	41.638	2.733.186,17	143.549,15
27	4,17	2,41	65,71	42.470	2.790.663,48	130.864,20
28	4,15	2,46	65,75	43.320	2.848.369,59	119.259,15
29	4,14	2,51	65,80	44.186	2.907.366,51	108.686,88
30	4,09	2,66	65,94	45.070	2.972.027,00	99.200,09
					Total =	14.695.393,81

TABELA 5.19 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 2,76 \text{ MPa/m}$, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da AASHTO				$N = 10^6$	$k = 2,76 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Trafego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	21.300	1.396.889,14	1.247.222,45
2	4,22	2,25	65,58	22.152	1.452.764,71	1.158.135,13
3	4,22	2,25	65,58	23.038	1.510.875,29	1.075.411,19
4	4,22	2,25	65,58	23.960	1.571.310,31	998.596,11
5	4,22	2,25	65,58	24.918	1.634.162,72	927.267,81
6	4,22	2,27	65,59	25.666	1.683.416,37	852.871,12
7	4,21	2,28	65,60	26.435	1.734.158,12	784.445,07
8	4,21	2,29	65,61	27.229	1.786.433,05	721.510,35
9	4,20	2,30	65,62	28.045	1.840.287,59	663.626,15
10	4,20	2,31	65,63	28.887	1.895.769,60	610.387,07
11	4,18	2,38	65,68	29.753	1.954.112,41	561.760,62
12	4,16	2,44	65,73	30.646	2.014.356,16	517.035,06
13	4,14	2,50	65,79	31.565	2.076.566,04	475.895,34
14	4,12	2,56	65,85	32.512	2.140.809,27	438.051,99
15	4,10	2,63	65,91	33.488	2.207.155,22	403.239,01
16	4,04	2,82	66,12	34.157	2.258.502,06	368.410,61
17	3,98	3,01	66,36	34.841	2.312.087,50	336.742,46
18	3,92	3,21	66,63	35.537	2.367.958,54	307.928,36
19	3,86	3,41	66,93	36.248	2.426.144,68	281.691,84
20	3,80	3,61	67,26	36.973	2.486.659,06	257.783,90
21	3,69	3,96	67,90	37.713	2.560.550,70	237.003,58
22	3,58	4,30	68,60	38.467	2.638.693,06	218.068,22
23	3,48	4,64	69,34	39.236	2.720.619,94	200.748,98
24	3,37	4,96	70,11	40.021	2.805.830,45	184.854,01
25	3,26	5,27	70,89	40.821	2.893.830,38	170.224,67
26	3,00	5,94	72,75	41.638	3.028.961,95	159.083,53
27	2,76	6,49	74,39	42.470	3.159.172,39	148.144,90
28	2,50	7,00	75,97	43.320	3.291.015,40	137.792,40
29	2,25	7,48	77,54	44.186	3.426.077,52	128.078,00
30	2,00	8,01	79,27	45.070	3.572.764,78	119.251,47
					Total = 14.691.261,41	

TABELA 5.20 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 13,8 \text{ MPa/m}$, $N = 10^6$.

Método de Dimensionamento da AASHTO				$N = 10^6$	$k = 13,80 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veíc/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	21.300	1.396.889,14	1.247.222,45
2	4,22	2,25	65,58	22.152	1.452.764,71	1.158.135,13
3	4,22	2,25	65,58	23.038	1.510.875,29	1.075.411,19
4	4,22	2,25	65,58	23.960	1.571.310,31	998.596,11
5	4,22	2,25	65,58	24.918	1.634.162,72	927.267,81
6	4,22	2,27	65,59	25.666	1.683.416,37	852.871,12
7	4,22	2,25	65,58	26.435	1.733.683,23	784.230,25
8	4,22	2,25	65,58	27.229	1.785.693,73	721.211,75
9	4,22	2,25	65,58	28.045	1.839.264,54	663.257,23
10	4,22	2,25	65,58	28.887	1.894.442,47	609.959,77
11	4,22	2,27	65,59	29.753	1.951.540,95	561.021,39
12	4,21	2,28	65,60	30.646	2.010.364,55	516.010,51
13	4,21	2,29	65,61	31.565	2.070.965,52	474.611,85
14	4,20	2,30	65,62	32.512	2.133.397,69	436.535,44
15	4,20	2,31	65,63	33.488	2.197.716,55	401.514,60
16	4,17	2,41	65,70	34.157	2.244.246,29	366.085,18
17	4,14	2,50	65,79	34.841	2.292.031,27	333.821,38
18	4,11	2,60	65,88	35.537	2.341.109,50	304.436,92
19	4,08	2,69	65,98	36.248	2.391.518,66	277.671,52
20	4,05	2,79	66,08	36.973	2.443.296,06	253.288,60
21	3,88	3,33	66,81	37.713	2.519.534,43	233.207,13
22	3,72	3,87	67,74	38.467	2.605.596,45	215.333,03
23	3,55	4,40	68,81	39.236	2.699.958,91	199.224,45
24	3,39	4,91	69,98	40.021	2.800.650,13	184.512,72
25	3,22	5,38	71,18	40.821	2.905.649,08	170.919,89
26	2,98	6,00	72,91	41.638	3.035.892,09	159.447,51
27	2,73	6,54	74,54	42.470	3.165.754,01	148.453,54
28	2,49	7,03	76,07	43.320	3.295.283,89	137.971,12
29	2,24	7,50	77,59	44.186	3.428.342,98	128.162,69
30	2,00	8,01	79,27	45.070	3.572.764,78	119.251,47
					Total =	14.659.643,74

TABELA 5.21 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 41,10 \text{ MPa/m}$, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^7$	$k = 41,10 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	213.000	13.968.891,41	12.472.224,47
2	4,15	2,48	65,76	221.520	14.568.192,30	11.613.673,71
3	4,08	2,71	65,99	230.381	15.203.644,77	10.821.654,04
4	4,00	2,94	66,27	239.596	15.877.497,88	10.090.436,94
5	3,93	3,18	66,59	249.180	16.591.818,88	9.414.643,62
6	3,82	3,55	67,16	256.655	17.235.944,80	8.732.266,04
7	3,71	3,91	67,81	264.355	17.925.832,54	8.108.736,28
8	3,59	4,27	68,53	272.286	18.659.647,81	7.536.318,79
9	3,48	4,62	69,30	280.454	19.434.763,26	7.008.370,46
10	3,37	4,95	70,09	288.868	20.248.112,76	6.519.350,40
11	3,21	5,40	71,25	297.534	21.199.875,98	6.094.457,75
12	3,05	5,82	72,40	306.460	22.186.335,13	5.694.679,63
13	2,89	6,20	73,50	315.654	23.200.342,33	5.316.919,67
14	2,73	6,55	74,55	325.123	24.238.896,28	4.959.758,42
15	2,57	6,87	75,56	334.877	25.304.015,01	4.622.948,94
16	2,38	7,24	76,73	341.574	26.210.362,25	4.275.477,85
17	2,19	7,61	77,94	348.406	27.154.496,44	3.954.898,74
18	2,00	8,01	79,27	355.374	28.171.006,50	3.663.346,14
19	4,22	2,25	65,58	362.482	23.772.137,44	2.760.106,26
20	4,04	2,82	66,12	369.731	24.446.752,62	2.534.315,76
21	3,88	3,34	66,83	377.126	25.202.945,33	2.332.774,83
22	3,74	3,81	67,63	384.668	26.014.106,40	2.149.871,06
23	3,58	4,30	68,60	392.362	26.914.669,23	1.985.978,42
24	3,43	4,77	69,65	400.209	27.874.871,92	1.836.455,19
25	3,28	5,21	70,75	408.213	28.879.161,07	1.698.767,74
26	3,04	5,84	72,47	416.377	30.173.167,55	1.584.719,18
27	2,82	6,36	73,99	424.705	31.425.156,11	1.473.638,07
28	2,58	6,84	75,48	433.199	32.695.763,05	1.368.947,66
29	2,35	7,29	76,91	441.863	33.982.599,56	1.270.380,86
30	2,12	7,75	78,41	450.700	35.339.162,46	1.179.547,87
					Total =	153.075.664,79

TABELA 5.22 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^7$	$k = 138$ MPa/m	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veíc/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	213.000	13.968.891,41	12.472.224,47
2	4,17	2,41	65,70	221.520	14.554.526,44	11.602.779,37
3	4,12	2,56	65,85	230.381	15.169.674,99	10.797.475,02
4	4,07	2,72	66,01	239.596	15.815.976,10	10.051.338,74
5	4,02	2,88	66,20	249.180	16.495.085,52	9.359.754,51
6	3,92	3,21	66,63	256.655	17.101.671,40	8.664.238,96
7	3,82	3,54	67,15	264.355	17.750.125,10	8.029.255,16
8	3,72	3,87	67,72	272.286	18.440.270,35	7.447.715,91
9	3,62	4,19	68,36	280.454	19.171.176,11	6.913.318,30
10	3,52	4,50	69,03	288.868	19.941.343,39	6.420.578,87
11	3,36	4,98	70,17	297.534	20.876.988,37	6.001.635,28
12	3,20	5,43	71,32	306.460	21.858.004,92	5.610.405,44
13	3,04	5,84	72,47	315.654	22.874.128,98	5.242.159,98
14	2,88	6,22	73,57	325.123	23.918.246,82	4.894.147,18
15	2,72	6,57	74,62	334.877	24.987.571,55	4.565.135,90
16	2,48	7,05	76,12	341.574	25.999.907,68	4.241.148,15
17	2,24	7,51	77,61	348.406	27.041.203,80	3.938.398,31
18	2,00	8,01	79,27	355.374	28.171.006,50	3.663.346,14
19	4,22	2,25	65,58	362.482	23.772.137,44	2.760.106,26
20	4,11	2,60	65,88	369.731	24.356.903,27	2.525.001,37
21	3,98	3,03	66,38	377.126	25.033.252,14	2.317.068,10
22	3,84	3,47	67,03	384.668	25.782.873,60	2.130.761,40
23	3,71	3,91	67,80	392.362	26.601.104,49	1.962.841,12
24	3,57	4,33	68,66	400.209	27.479.877,21	1.810.432,11
25	3,44	4,75	69,59	408.213	28.409.157,67	1.671.120,59
26	3,20	5,44	71,35	416.377	29.709.807,51	1.560.383,14
27	2,95	6,06	73,08	424.705	31.036.328,63	1.455.404,55
28	2,71	6,59	74,69	433.199	32.357.376,29	1.354.779,65
29	2,46	7,08	76,22	441.863	33.677.153,82	1.258.962,29
30	2,22	7,55	77,74	450.700	35.038.891,39	1.169.525,45
					Total =	151.891.441,73

TABELA 5.23 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 2,76 \text{ MPa/m}$, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da AASHTO				$N = 10^7$	$k = 2,76 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	213.000	13.968.891,41	12.472.224,47
2	4,18	2,37	65,67	221.520	14.547.356,79	11.597.063,77
3	4,15	2,49	65,77	230.381	15.152.562,04	10.785.294,37
4	4,11	2,60	65,89	239.596	15.785.851,49	10.032.194,01
5	4,07	2,72	66,01	249.180	16.448.615,14	9.333.385,97
6	4,01	2,90	66,22	256.655	16.996.048,18	8.610.726,95
7	3,96	3,09	66,46	264.355	17.568.473,87	7.947.085,37
8	3,90	3,27	66,72	272.286	18.166.793,13	7.337.263,05
9	3,85	3,45	67,01	280.454	18.791.831,17	6.776.522,71
10	3,79	3,64	67,31	288.868	19.444.339,40	6.260.556,89
11	3,73	3,85	67,69	297.534	20.139.349,33	5.789.581,69
12	3,66	4,05	68,09	306.460	20.865.522,29	5.355.659,87
13	3,60	4,26	68,50	315.654	21.623.234,53	4.955.487,26
14	3,53	4,46	68,94	325.123	22.412.774,29	4.586.097,67
15	3,47	4,66	69,38	334.877	23.234.362,07	4.244.831,08
16	3,39	4,89	69,95	341.574	23.893.470,83	3.897.542,67
17	3,31	5,13	70,53	348.406	24.572.390,48	3.578.829,62
18	3,23	5,35	71,11	355.374	25.269.720,35	3.286.064,08
19	3,15	5,56	71,68	362.482	25.984.188,10	3.016.940,33
20	3,07	5,77	72,25	369.731	26.714.709,71	2.769.427,54
21	2,98	5,99	72,88	377.126	27.486.576,47	2.544.146,84
22	2,89	6,20	73,50	384.668	28.272.879,68	2.336.541,75
23	2,80	6,40	74,10	392.362	29.073.290,91	2.145.258,70
24	2,71	6,59	74,68	400.209	29.888.095,48	1.969.090,60
25	2,62	6,77	75,25	408.213	30.718.251,34	1.806.949,12
26	2,50	7,02	76,02	416.377	31.652.730,73	1.662.427,04
27	2,37	7,25	76,78	424.705	32.610.320,68	1.529.214,68
28	2,25	7,49	77,56	433.199	33.600.091,57	1.406.811,23
29	2,12	7,74	78,38	441.863	34.634.120,90	1.294.736,86
30	2,00	8,01	79,27	450.700	35.727.647,83	1.192.514,71
					Total =	150.520.470,88

TABELA 5.24 - Custos operacionais: AASHTO, $k = 13,8 \text{ MPa/m}$, $N = 10^7$.

Método de Dimensionamento da AASHTO				$N = 10^7$	$k = 13,80 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	213.000	13.968.891,41	12.472.224,47
2	4,19	2,34	65,65	221.520	14.541.837,64	11.592.663,93
3	4,17	2,42	65,72	230.381	15.139.777,86	10.776.194,84
4	4,14	2,51	65,79	239.596	15.763.866,28	10.018.222,01
5	4,11	2,60	65,88	249.180	16.415.305,34	9.314.485,10
6	4,07	2,71	66,00	256.655	16.938.482,32	8.581.562,29
7	4,04	2,83	66,13	264.355	17.481.238,35	7.907.624,45
8	4,00	2,94	66,27	272.286	18.044.318,45	7.287.797,58
9	3,97	3,06	66,42	280.454	18.628.474,62	6.717.614,70
10	3,93	3,18	66,59	288.868	19.234.465,48	6.192.983,10
11	3,89	3,32	66,79	297.534	19.871.932,22	5.712.705,65
12	3,85	3,45	67,01	306.460	20.534.341,30	5.270.653,96
13	3,80	3,59	67,23	315.654	21.222.495,06	4.863.648,12
14	3,76	3,73	67,47	325.123	21.937.187,80	4.488.783,26
15	3,72	3,87	67,72	334.877	22.679.206,58	4.143.406,25
16	3,66	4,05	68,07	341.574	23.251.970,90	3.792.900,13
17	3,61	4,23	68,44	348.406	23.843.753,49	3.472.707,76
18	3,55	4,40	68,81	355.374	24.454.359,68	3.180.034,91
19	3,50	4,58	69,20	362.482	25.083.549,16	2.912.370,05
20	3,44	4,75	69,59	369.731	25.731.049,39	2.667.454,65
21	3,38	4,91	69,99	377.126	26.396.569,01	2.443.256,18
22	3,33	5,07	70,40	384.668	27.079.811,29	2.237.943,59
23	3,27	5,23	70,80	392.362	27.780.487,30	2.049.865,37
24	3,22	5,39	71,21	400.209	28.498.328,84	1.877.529,85
25	3,16	5,54	71,61	408.213	29.233.100,98	1.719.587,66
26	2,93	6,11	73,24	416.377	30.496.162,42	1.601.683,13
27	2,70	6,62	74,77	424.705	31.755.448,99	1.489.126,68
28	2,46	7,08	76,22	433.199	33.016.817,47	1.382.389,97
29	2,23	7,52	77,67	441.863	34.317.552,52	1.282.902,49
30	2,00	8,01	79,27	450.700	35.727.647,83	1.192.514,71
					Total =	148.642.836,84

TABELA 5.25 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 41,10$ MPa/m, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^8$	$k = 41,10$ MPa/m	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	2.130.000	139.688.914,08	124.722.244,72
2	4,11	2,60	65,88	2.215.200	145.931.466,75	116.335.671,84
3	4,00	2,95	66,28	2.303.808	152.691.860,33	108.683.050,18
4	3,89	3,31	66,78	2.395.960	159.999.471,51	101.682.556,68
5	3,78	3,67	67,37	2.491.799	167.870.655,21	95.254.318,05
6	3,67	4,03	68,05	2.566.553	174.647.440,09	88.481.828,38
7	3,56	4,39	68,79	2.643.549	181.838.566,56	82.254.532,90
8	3,44	4,73	69,57	2.722.856	189.416.967,80	76.502.336,39
9	3,33	5,06	70,37	2.804.541	197.352.508,09	71.167.292,87
10	3,22	5,38	71,18	2.888.678	205.615.249,76	66.202.607,46
11	3,10	5,69	72,04	2.975.338	214.347.972,74	61.619.920,12
12	2,98	5,99	72,88	3.064.598	223.361.308,90	57.331.284,72
13	2,86	6,27	73,70	3.156.536	232.639.206,48	53.314.901,74
14	2,74	6,53	74,49	3.251.232	242.179.562,87	49.554.736,77
15	2,62	6,77	75,25	3.348.769	251.996.652,64	46.038.846,29
16	2,47	7,08	76,21	3.415.745	260.314.337,59	42.462.907,35
17	2,31	7,37	77,17	3.484.059	268.864.067,76	39.158.529,95
18	2,15	7,69	78,21	3.553.741	277.922.110,94	36.140.877,39
19	2,00	8,01	79,27	3.624.815	287.344.266,27	33.362.616,61
20	4,11	2,60	65,88	3.697.312	243.569.032,67	25.250.013,69
21	3,95	3,10	66,48	3.771.258	250.697.310,45	23.204.445,70
22	3,80	3,61	67,27	3.846.683	258.755.188,23	21.384.178,34
23	3,64	4,12	68,21	3.923.617	267.646.344,73	19.749.076,64
24	3,49	4,61	69,27	4.002.089	277.222.463,75	18.263.999,00
25	3,33	5,07	70,38	4.082.131	287.314.096,74	16.900.765,19
26	3,15	5,57	71,70	4.163.774	298.536.396,82	15.679.373,20
27	2,97	6,02	72,98	4.247.049	309.954.180,94	14.534.861,13
28	2,78	6,43	74,20	4.331.990	321.446.477,25	13.458.728,61
29	2,60	6,81	75,36	4.418.630	333.001.331,79	12.448.680,28
30	2,42	7,16	76,49	4.507.002	344.727.518,88	11.506.288,88
					Total = 1.542.651.471,10	

TABELA 5.25 - Custos operacionais: PCA/66, $k = 138,0$ MPa/m, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da PCA				$N = 10^8$	$k = 138$ MPa/m	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veíc/ano (R\$)	Trafégo/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	2.130.000	139.688.914,08	124.722.244,72
2	4,15	2,46	65,75	2.215.200	145.653.807,76	116.114.323,79
3	4,08	2,68	65,96	2.303.808	151.965.262,32	108.165.872,07
4	4,02	2,90	66,21	2.395.960	158.644.537,42	100.821.471,57
5	3,88	3,34	66,83	2.491.799	166.524.454,53	94.490.447,63
6	3,80	3,61	67,27	2.566.553	172.644.537,51	87.467.095,60
7	3,72	3,88	67,75	2.643.549	179.096.201,24	81.014.026,10
8	3,63	4,14	68,27	2.722.856	185.878.752,48	75.073.310,56
9	3,55	4,40	68,81	2.804.541	192.988.945,02	69.593.748,29
10	3,47	4,66	69,38	2.888.678	200.421.648,25	64.530.406,77
11	3,38	4,92	70,02	2.975.338	208.341.534,62	59.893.212,69
12	3,29	5,18	70,67	3.064.598	216.583.946,99	55.591.704,72
13	3,20	5,43	71,32	3.156.536	225.137.450,66	51.595.692,92
14	3,11	5,67	71,97	3.251.232	233.992.228,14	47.879.445,88
15	3,02	5,89	72,61	3.348.769	243.141.082,92	44.420.966,81
16	2,91	6,15	73,36	3.415.745	250.592.977,28	40.877.142,90
17	2,80	6,40	74,10	3.484.059	258.162.503,12	37.599.907,62
18	2,69	6,63	74,81	3.553.741	265.851.174,80	34.571.177,80
19	2,58	6,85	75,50	3.624.815	273.673.669,97	31.775.367,74
20	2,47	7,07	76,18	3.697.312	281.658.871,22	29.198.664,04
21	2,35	7,29	76,90	3.771.258	290.026.497,23	26.844.739,96
22	2,24	7,52	77,65	3.846.683	298.680.539,51	24.683.709,60
23	2,12	7,75	78,43	3.923.617	307.716.068,28	22.705.739,63
24	2,00	8,01	79,27	4.002.089	317.251.288,30	20.901.182,16
25	4,11	2,60	65,88	4.082.131	268.919.893,22	15.818.757,32
26	3,98	3,01	66,36	4.163.774	276.315.859,37	14.512.332,59
27	3,85	3,44	66,98	4.247.049	284.483.789,88	13.340.463,31
28	3,72	3,87	67,72	4.331.990	293.379.720,02	12.283.594,04
29	3,59	4,28	68,56	4.418.630	302.925.370,58	11.324.342,36
30	3,46	4,69	69,45	4.507.002	313.021.722,10	10.448.015,21
					Total =	1.528.259.106,41

TABELA 5.27 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 2,76 \text{ MPa/m}$, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da AASHIO				$N = 10^8$	$k = 2,76 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op./veic/ano (R\$)	Tráfego/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	2.130.000	139.688.914,08	124.722.244,72
2	4,16	2,45	65,74	2.215.200	145.619.977,01	116.087.354,12
3	4,10	2,64	65,93	2.303.808	151.880.457,55	108.105.509,72
4	4,03	2,84	66,15	2.395.960	158.490.096,20	100.723.321,38
5	3,97	3,05	66,41	2.491.799	165.468.001,30	93.890.987,70
6	3,91	3,24	66,68	2.566.553	171.139.672,59	86.704.684,20
7	3,85	3,44	66,98	2.643.549	177.075.169,50	80.099.813,98
8	3,79	3,64	67,31	2.722.856	183.281.547,77	74.024.343,14
9	3,73	3,83	67,66	2.804.541	189.764.925,97	68.431.134,70
10	3,67	4,03	68,03	2.888.678	196.530.567,17	63.277.582,80
11	3,61	4,23	68,45	2.975.338	203.661.706,79	58.547.874,02
12	3,54	4,43	68,88	3.064.598	211.093.660,11	54.182.484,83
13	3,48	4,63	69,33	3.156.536	218.828.582,40	50.149.863,15
14	3,41	4,82	69,78	3.251.232	226.868.167,11	46.421.721,84
15	3,35	5,01	70,24	3.348.769	235.213.859,85	42.972.692,79
16	3,27	5,23	70,79	3.415.745	241.796.370,08	39.442.225,71
17	3,20	5,44	71,34	3.484.059	248.548.090,93	36.199.622,89
18	3,12	5,64	71,88	3.553.741	255.459.489,08	33.219.847,25
19	3,05	5,83	72,42	3.624.815	262.522.665,41	30.480.660,54
20	2,97	6,01	72,95	3.697.312	269.731.755,83	27.962.218,57
21	2,88	6,22	73,57	3.771.258	277.439.056,23	25.679.651,31
22	2,79	6,42	74,16	3.846.683	285.284.369,26	23.576.616,46
23	2,70	6,61	74,75	3.923.617	293.271.189,53	21.639.881,55
24	2,61	6,79	75,31	4.002.089	301.409.653,00	19.857.501,91
25	2,52	6,97	75,87	4.082.131	309.717.079,58	18.218.582,72
26	2,42	7,17	76,51	4.163.774	318.577.560,52	16.731.951,34
27	2,31	7,37	77,16	4.247.049	327.690.506,01	15.366.580,91
28	2,21	7,57	77,82	4.331.990	337.121.044,28	14.115.011,26
29	2,10	7,78	78,52	4.418.630	346.950.349,45	12.970.140,24
30	2,00	8,01	79,27	4.507.002	357.276.478,34	11.925.147,10
					Total = 1.515.727.252,84	

TABELA 5.28 - Custos operacionais: AASHTO/86, $k = 13,8 \text{ MPa/m}$, $N = 10^8$.

Método de Dimensionamento da AASHTO				$N = 10^8$	$k = 13,80 \text{ MPa/m}$	
Ano	PSI	IRI	Custo Op/veic/ano (R\$)	Trafégo/ano (veículos)	Custo Operacional (R\$)	V.P.L. (R\$)
1	4,22	2,25	65,58	2.130.000	139.688.914,08	124.722.244,72
2	4,16	2,45	65,74	2.215.200	145.619.977,01	116.087.354,12
3	4,10	2,64	65,93	2.303.808	151.880.457,55	108.105.509,72
4	4,03	2,84	66,15	2.395.960	158.490.096,20	100.723.321,38
5	3,97	3,05	66,41	2.491.799	165.468.001,30	93.890.987,70
6	3,91	3,24	66,67	2.566.553	171.114.923,65	86.692.145,62
7	3,85	3,43	66,96	2.643.549	177.019.604,19	80.074.679,06
8	3,80	3,62	67,28	2.722.856	183.189.224,80	73.987.055,44
9	3,74	3,81	67,62	2.804.541	189.630.168,34	68.382.539,74
10	3,68	4,00	67,97	2.888.678	196.348.082,38	63.218.827,58
11	3,62	4,20	68,38	2.975.338	203.465.250,38	58.491.397,50
12	3,55	4,40	68,81	3.064.598	210.884.230,93	54.128.729,57
13	3,49	4,60	69,26	3.156.536	218.607.280,56	50.099.146,48
14	3,42	4,79	69,71	3.251.232	226.636.159,12	46.374.248,41
15	3,36	4,98	70,17	3.348.769	234.972.343,32	42.928.568,63
16	3,28	5,21	70,73	3.415.745	241.598.412,25	39.409.934,50
17	3,20	5,42	71,30	3.484.059	248.397.171,53	36.177.642,34
18	3,13	5,63	71,86	3.553.741	255.357.892,71	33.206.635,70
19	3,05	5,82	72,41	3.624.815	262.471.646,19	30.474.736,86
20	2,97	6,01	72,95	3.697.312	269.731.755,83	27.962.218,57
21	2,88	6,22	73,55	3.771.258	277.388.324,83	25.674.955,63
22	2,79	6,41	74,14	3.846.683	285.183.617,32	23.568.290,07
23	2,71	6,60	74,71	3.923.617	293.120.881,99	21.628.790,67
24	2,62	6,78	75,26	4.002.089	301.209.431,84	19.844.310,91
25	2,53	6,95	75,81	4.082.131	309.465.144,25	18.203.763,05
26	2,42	7,15	76,46	4.163.774	318.372.350,16	16.721.173,53
27	2,32	7,36	77,12	4.247.049	327.530.800,37	15.359.091,74
28	2,21	7,56	77,80	4.331.990	337.008.110,20	14.110.282,79
29	2,11	7,78	78,51	4.418.630	346.889.057,75	12.967.848,95
30	2,00	8,01	79,27	4.507.002	357.276.478,34	11.925.147,10
					Total = 1.515.141.578,07	

5.5 – Custos Totais

Os custos totais, resultado da soma dos custos de construção, manutenção e reabilitação e de operação dos veículos, todos eles descontados à taxa de 12%, são apresentados nas Tabelas 5.29 e 5.30.

TABELA 5.29 - Custos totais considerando-se o dimensionamento pelo método da PCA/66.

Espessura (cm)	k (MPa/m)	N	Custo Inicial (R\$)	Custo (M & R) (R\$)	Custo de Operação (R\$)	Custo Total (R\$)
13	41.40	10 ⁶	11.016.000,00	1.997.154,22	14.710.000,00	27.723.154,22
11	138.00	10 ⁶	9.885.600,00	1.929.970,22	14.690.000,00	26.505.570,22
18	41.40	10 ⁷	13.852.800,00	2.722.083,00	153.070.000,00	169.644.883,00
17	138.00	10 ⁷	13.284.000,00	2.634.679,00	151.890.000,00	167.808.679,00
27	41.40	10 ⁸	18.943.200,00	3.319.542,00	1.542.650.000,00	1.564.912.742,00
25	138.00	10 ⁸	17.812.800,00	2.530.616,10	1.528.250.000,00	1.548.593.416,10

TABELA 5.30 - Custos totais considerando-se o dimensionamento pelo método da AASHTO/86.

Espessura (cm)	k (MPa/m)	N	Custo Inicial (R\$)	Custo (M & R) (R\$)	Custo de Operação (R\$)	Custo Total (R\$)
14	2.760	10 ⁶	11.584.800,00	1.319.036,06	14.690.000,00	27.593.836,06
13	13.800	10 ⁶	11.016.000,00	1.283.408,54	14.650.000,00	26.949.408,54
20	2.760	10 ⁷	14.983.200,00	1.531.899,18	150.520.000,00	167.035.099,18
19	13.800	10 ⁷	14.414.400,00	1.496.271,67	148.640.000,00	164.550.671,67
28	2.760	10 ⁸	19.512.000,00	1.815.566,35	1.515.720.000,00	1.537.047.566,35
27	13.800	10 ⁸	18.943.200,00	1.779.938,84	1.515.140.000,00	1.535.863.138,84

5.6 – Análise dos Resultados

Apresenta-se, a seguir, um resumo dos resultados obtidos (Tabelas 5.31 a 5.34) e a análise da influência dos fatores selecionados sobre os custos dos pavimentos rígidos .

TABELA 5.31 – Matriz fatorial: custo de construção (10^6 R\$).

Tráfego (N)	Subleito (CBR, %)	PCA/66	AASHTO/86
10^6	3	11,016	11,584
	12	9,885	11,016
10^7	3	13,852	14,983
	12	13,284	14,144
10^8	3	18,943	19,512
	12	17,812	18,943

TABELA 5.32 - Matriz fatorial: custo de M & R (10^6 R\$).

Tráfego (N)	Subleito (CBR, %)	PCA/66	AASHTO/86
10^6	3	1,997	1,319
	12	1,929	1,283
10^7	3	2,722	1,531
	12	2,634	1,496
10^8	3	3,319	1,815
	12	2,530	1,779

TABELA 5.33 - Matriz fatorial: custo operacional (10^6 R\$).

Tráfego (N)	Subleito (CBR, %)	PCA/66	AASHTO/86
10^6	3	14,710	14,690
	12	14,690	14,650
10^7	3	153,070	150,520
	12	151,890	148,640
10^8	3	1.542,650	1.515,720
	12	1.528,250	1.515,140

TABELA 5.34 - Matriz fatorial: custo total (10^6 R\$).

Tráfego (N)	Subleito (CBR, %)	PCA/66	AASHTO/86
10^6	3	27,723	27,593
	12	26,505	26,949
10^7	3	169,644	167,0.34
	12	167,808	164,280
10^8	3	1.564,912	1.537,047
	12	1.5482,592	1.535,862

5.6.1 - Método de dimensionamento

O método de dimensionamento da PCA/66, adotado pela ABCP, resulta, para todas as combinações de tráfego e tipo de subleito, em menores espessuras e, portanto, menores custos iniciais. Por outro lado, os custos de manutenção e reabilitação e também os custos de operação dos veículos são menores para as

estruturas dimensionadas pelo método da AASHTO/86. Em razão da elevada sensibilidade do desempenho dos pavimentos rígidos a variações na espessura, tem-se menores custos totais utilizando-se o método da AASHTO/86.

Sobre a elevada sensibilidade do desempenho dos pavimentos rígidos à espessura da placa de concreto, deve-se destacar que essa sensibilidade é observada tanto no modelo de desempenho da AASHTO, utilizado neste trabalho, como também na curva de fadiga (Equação 5.1) adotada pelo método da PCA/66 a partir de estudos desenvolvidos por VESIC & SAXENA (1969).

$$N = 225000 \times \left(\frac{f_{clM.k}}{\sigma_{tf}} \right)^4 \quad \text{Eq. 5.1}$$

5.6.2 - Tipo de subleito

A capacidade de suporte do subleito apresenta-se como um fator significativo no dimensionamento de pavimentos rígidos, sendo sua influência maior no método de dimensionamento da PCA/66, chegando a acarretar diferenças superiores a 5% nos custos de construção. Apesar da diferença em termos de espessura ser pequena, dada a sensibilidade do desempenho dos pavimentos rígidos à espessura, tem-se que o tipo de subleito afeta não só os custos iniciais mas também as outras parcelas que compõem o custo total, embora tal efeito resulte em diferenças da ordem de apenas 1%.

5.6.3 - Volume de tráfego

O volume de tráfego afeta todas as parcelas do custo total. Para uma análise mais detalhada dos efeitos do volume de tráfego, apresentam-se as Tabelas 3.35 a 3.37.

TABELA 3.35 - Custos (10^6 R\$) para volume de tráfego igual a 10^6 .

CUSTO	PCA/66		AASHTO/86	
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 3%	CBR = 12%
Construção	11,016 (40%)	9,885 (37%)	11,584 (42%)	11,016 (41%)
M & R	1,997 (7%)	1,929 (7%)	1,319 (5%)	1,283 (5%)
Operação	14,715 (53%)	14,695 (56%)	14,691 (53%)	14,650 (54%)

TABELA 3.36 - Custos (10^6 R\$) para volume de tráfego igual a 10^7 .

CUSTO	PCA/66		AASHTO/86	
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 3%	CBR = 12%
Construção	13,852 (8%)	13,284 (8%)	14,983 (9%)	14,144 (9%)
M & R	2,722 (2%)	2,634 (2%)	1,531 (1%)	1,496 (1%)
Operação	153,075 (90%)	151,891 (90%)	150,520 (90%)	148,642 (90%)

TABELA 3.37 - Custos (10^6 R\$) para volume de tráfego igual a 10^8 .

CUSTO	PCA/66		AASHTO/86	
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 3%	CBR = 12%
Construção	18,943 (1%)	17,812 (1%)	19,512 (1%)	18,943 (1%)
M & R	3,319 (0%)	2,530 (0%)	1,815 (0%)	1,779 (0%)
Operação	1.542,651 (99%)	1.528,259 (99%)	1.515,727 (99%)	1.515,141 (99%)

À medida em que ocorre um aumento no volume de tráfego, tem-se um aumento da importância relativa do custo de operação dos veículos ou, de outra forma, uma diminuição da importância dos custos de construção e de manutenção e reabilitação dos pavimentos rígidos. Sendo os elevados custos iniciais a causa mais citada para justificar a não utilização de pavimentos rígidos, observa-se que para volumes de tráfego superiores a 10^7 aplicações do eixo-padrão os custos operacionais passam a representar acima de 90% do custo total, valor compatível com o que se observa em rodovias com pavimentos flexíveis.

Embora a escolha entre os tipos de pavimentos (rígido ou flexível) deva ser baseada no custo total mínimo, pode-se utilizar os resultados deste trabalho como uma evidência quantitativa de que os pavimentos rígidos apresentam-se vantajosos para volumes de tráfego elevados.

6 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho desenvolveu uma revisão bibliográfica sobre pavimentos rígidos, particularmente da determinação das parcelas que compõem o custo total mediante utilização de conceitos de gerência de pavimentos. Apresentou, também, o trabalho de acompanhamento da execução das obras de restauração, reconstrução e ampliação do pavimento rígido do pátio de taxiamento do aeroporto Leite Lopes, de Ribeirão Preto – SP. Suas principais conclusões e sugestões para a continuidade dos estudos desenvolvidos são apresentadas neste capítulo.

O custo de construção dos pavimentos rígidos depende, basicamente, da espessura da placa de concreto, função do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito e das características dos materiais constituintes das camadas. Comparando-se os métodos da PCA/66 e da AASHTO/86, o método de dimensionamento da PCA/66 resultou, para todas as combinações de tráfego e tipo de subleito, em menores espessuras e, portanto, menores custos iniciais.

A capacidade de suporte do subleito também apresentou-se como um fator significativo no dimensionamento de pavimentos rígidos, sendo sua influência maior no método de dimensionamento da PCA/66, chegando a acarretar diferenças superiores a 5% nos custos de construção.

O levantamento de defeitos no campo permite a seleção de atividades de manutenção e reabilitação mais apropriadas, com as quais pode-se estimar os custos correspondentes ao longo da vida em serviço. Visando facilitar a análise da causa dos defeitos e suas prováveis soluções, recomenda-se a adoção do manual de levantamento de defeitos no campo utilizado no Programa SHRP, em virtude da necessidade de uniformização da avaliação da condição dos pavimentos rígidos e do compromisso dos países envolvidos, entre eles o Brasil, para o acompanhamento do desempenho das seções a longo-prazo. Outros manuais publicados em língua portuguesa podem ser utilizados de forma complementar.

Conforme o esperado, os custos de manutenção e reabilitação apresentaram-se menores para as estruturas dimensionadas pelo método da AASHTO/86 (maiores espessuras) e para subleito com maior capacidade de suporte.

Nos pavimentos rodoviários, a irregularidade longitudinal é a variável ligada à condição dos pavimentos que mais influencia os custos de operação dos veículos. Apesar de fatores como a velocidade dificultar a transferência dos modelos de custos do HDM-III para outras situações (vias urbanas, por exemplo), sua utilização neste trabalho é justificada pela inexistência de evidências de que a irregularidade longitudinal observada em um pavimento rígido tem efeitos diferentes sobre os custos de operações dos veículos.

Os custos de operação dos veículos apresentaram-se menores para as estruturas dimensionadas pelo método da AASHTO/86 (maiores espessuras) em razão da sensibilidade do desempenho dos pavimentos rígidos à espessura da placa de concreto. Pavimentos com maior capacidade de suporte do subleito, por outro lado, resultaram em menores custos operacionais.

Os elevados custos iniciais são a causa mais citada para justificar a não utilização de pavimentos rígidos. À medida em que ocorre um aumento no volume de tráfego, no entanto tem-se uma diminuição da importância relativa dos custos de construção e de manutenção e reabilitação. Neste trabalho, para volumes de tráfego superiores a 10^7 aplicações do eixo-padrão os custos operacionais passaram a representar acima de 90% do custo total, valor compatível com o que se observa em rodovias com pavimentos flexíveis.

A quantificação dos custos de construção, manutenção e reabilitação e de operação dos veículos é essencial para o planejamento e a gerência dos investimentos rodoviários. Visando dar subsídios aos organismos rodoviários brasileiros que estão iniciando o processo de financiamento privado sob a forma de concessão de rodovias, recomendam-se estudos complementares sobre outros fatores que afetam as parcelas que compõem o custo total de uma obra de pavimentação, particularmente dos pavimentos rígidos.

Referências Bibliográficas

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

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.

ARCHONDO-CALLAO, R. & FAIZ, A (1993). *Estimating Vehicle Operating Costs*. World bank. Transportation Department. Washington D.C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1982). *Barras e Fios de Aço Destinadas a Armaduras para Concreto Armado*. NBR - 7480. Rio de Janeiro.

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

BERTOLLO, S. A. M. (1997). *Considerações sobre Gerência de Pavimentos Urbanos em Nível de rede*. Dissertação de mestrado. EESC - USP. São Carlos, S.P.

CAREY, W. N.; IRICK, P. E. (1960). *The Pavement Serviceability-Performance Concept*. Highway Research Board Bulletin 250, p.40-58.

CARVALHO, M. D., GROSSI, L. C. e IGNATI, M. B.(1994). *Custos Comparativos de Pavimentos Rígidos e Flexíveis em Áreas Críticas de Solicitação de Tráfego*. 28ª Reunião anual de Pavimentação – ABPv. Belo Horizonte, M.G.

CARVALHO, M. D., HALLACK, A , SILVA, E. L. S. (1996). *O projeto HDM – IV/FICEM*. 30ª Reunião anual de Pavimentação - ABPv. Salvador, BA.

- CHESHER, A. & HARRISON, R. (1985). *User Benefits from Highway Improvements, Evidence from Developing Countries*. World Bank.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS RODAGEM (1989). *Manual de Pavimentos Rígidos – Projeto e Dimensionamento, Operação e conservação*. Vol. 2. MT-DNER-IPR. Rio de Janeiro, RJ.
- DOMINGUES, F.A.A. (1994). *Fissuras, Trincas e Esborcinamentos em Pavimentos de Concreto de Cimento Portland*. 28º Reunião Anual de Pavimentação - ABPv. Belo Horizonte, M.G.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES - GEIPOT (1982). *Pesquisa do Interrelacionamento entre Custos de construção, Conservação e Utilização de Rodovias*. Relatório Final. Brasília, D.F.
- FERNANDES JR., J. L. (1994). *Investigação dos Efeitos das solicitações do Tráfego sobre o desempenho de Pavimentos*. Tese de Doutorado. EESC - USP. São Carlos.
- FERNANDES JR., J. L. (1996). *Curso de Atualização em Sistemas de Gerência de Pavimentos*. Notas de Aula. FIPAI. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.
- FHWA (1989). *Road Surface Management for Local Governments*. Course Workbook. U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. 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.
- INSTITUTO DO ASFALTO. (1989). *The Asfalt Handbook*. Ms – 4.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION DEVELOPMENT – OECD. (1989). *Monitoring manual for Road Maintenance Management in Developing Countries*. Road Transportation Research Program.
- PALAZZO, S. A (1993). *O desafio na implantação dos pavimentos rígidos em rodovias e áreas urbanas no Brasil*. SIMPATICON. Campinas, S.P.

- PICKET, G. e RAY, G. K. (1951). *Influence Charts Concrete Pavements*. Trans. ASCE 116.
- PITTA, M. R. (1977). *Dimensionamento dos pavimentos rodoviários de concreto*. ET – 14. ABCP. São Paulo.
- PITTA, M. R. (1987). *Projeto de juntas em pavimentos rodoviários de concreto*. ET - 13. ABCP. São Paulo.
- PITTA, M. R. (1989 a). *Construção de Pavimentos de Concreto Simples*. ET - 81. ABCP. São Paulo.
- PITTA, M. R. (1989b). *Execução de Pavimento de Concreto com Equipamento Reduzido – Prática Recomendada*. BT - 98. ABCP. São Paulo.
- PITTA, M. R. (1991). *Pavimentação de Vias Urbanas com Concreto Pré-Misturado*. BT - 123. ABCP. São Paulo.
- SHRP (1993). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. The Strategic Highway Research Program. National Academy of Science. SHRP-H- 348. Washington, D.C.
- SUZUKI, C. Y. (1997). *Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimentos*. Vol. 1. Apostila do Curso de Manutenção e Reabilitação de Pavimentos Asfálticos – PTR 795. EPUSP – São Paulo.
- TARAGIN, A. (1958). *Lateral Displacement of Truck on Two-Lane Highways and Four-Lane Divided Highways*. Public Roads. Washington D.C.
- THOMAZ, C. A. (1977). *Pavimento rígido, otimização técnica e econômica dos equipamentos de construção*. ET – 17. ABCP. XIII Reunião Anual de Pavimentação. ABPv. Curitiba, P.R.
- VESIC, A S. & SAXENA, S. K. (1969). *Analysis of Structural Behavior of Road Test Rigid Pavement*. Highway research Record, Nº 291.
- WESTERGAARD, H. M. (1925). *Theory of Stress in Roads Slabs*. Proc. Of Annual Meeting. HRB. National Research Council. Washington D.C.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design*. Second Edition. John Wiley & Sons. New York. p.17.

ANEXO A

**FOTOS DO ACOMPANHAMENTO DA CONSTRUÇÃO DO
PAVIMENTO RÍGIDO DO PÁTIO DE TAXIAMENTO DO
AEROPORTO “LEITE LOPES” DE RIBEIRÃO PRETO**

Foto 1 – Execução de sub-base de brita graduada tratada com cimento (BGTC) e imprimação.

Foto 2 – Montagem das formas para execução do pavimento de concreto.

Foto 3 – Detalhe de forma de junta de construção com encaixe macho/fêmea.

Foto 4 – Colocação de armadura sem função estrutural.

Foto 5 – Lançamento do concreto.

Foto 6 – Vibração do concreto.

Foto 7 – Vista do interior de equipamento utilizado na execução de pavimentos rígidos.

Foto 8 – Rolo desempenador com parafuso sem fim.

Foto 9 – Desempenadeira atuando próxima à extremidade.

Foto 10 – Desempenadeira manual de cabo longo.

Foto 11 – Detalhe das barras de transferência de carga (metade pintada e metade engraxada).

Foto 12 – Colocação das barras de transferência de carga.

Foto 13 – Detalhe da colocação das barras de transferência.

Foto 14 – Ponte utilizada para vassouramento e aplicação de agente de cura química (“antisol”).

Foto 15 – Detalhe do vassouramento do concreto fresco..

Foto 16 – Vista geral do processo de cura do concreto.

Foto 17 – Detalhe de junta longitudinal de construção, no concreto, de encaixe macho-fêmea.

Foto 18 – Vista do bordo espessado.

Foto 19 – Serragem de juntas com serra de disco diamantado.

Foto 20 – Detalhe do disco de diamante.

Foto 21 – Detalhe de junta serrada.

Foto 22 – Vista lateral da junta transversal serrada, com direcionamento da trinca.

Foto 23 – Aplicação de selante.

Foto 24 – Vista do pavimento rígido do acostamento, previamente à aplicação de revestimento em concreto asfáltico.

Foto 25 – Acostamento com concreto asfáltico já executado.

Foto 26 – Vista geral da junção do pavimento rígido com o acostamento com revestimento em concreto asfáltico.

ANEXO B

FOTOS DOS DEFEITOS NO PAVIMENTO RÍGIDO DO PÁTIO DE TAXIAMENTO DO AEROPORTO “LEITE LOPES” DE RIBEIRÃO PRETO

Foto 1 – Trinca de retração em concreto novo, próxima a junta transversal.

Foto 2 – Trinca de retração em concreto novo, no centro da placa.

Foto 3 – Esborcinamento em junta serrada.

Foto 4 – Detalhe de início de esborcinamento em junta.

Foto 5 – Trinca de canto, bombeamento e esborcinamento de juntas e trincas.

Foto 6 – Vista geral de pavimento velho com trincas e bombeamento.

Foto 7 – Pavimento velho, ainda em serviço, mas com muitos defeitos com severidade alta.

Foto 8 – Pavimento velho, ainda em serviço, mas sem suporte em virtude de bombeamento do subleito.