EILAINÉ DE LOURDES MARTINI DE OLIVEIRA

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE ACOSTAMENTOS PARA
RODOVIAS

São Paulo
2007

EILAINÉ DE LOURDES MARTINI DE OLIVEIRA

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE ACOSTAMENTOS PARA
RODOVIAS

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

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de novembro de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Eilaine de Lourdes Martini de
Considerações sobre o projeto de acostamentos para rodovias / E.L.M. de Oliveira. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
135 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Acostamento 2.Rodovias 3.Pavimentação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

EILAINÉ DE LOURDES MARTINI DE OLIVEIRA

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE ACOSTAMENTOS PARA RODOVIAS

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

Área de Concentração:
Engenharia de Transporte

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo
2007

Para os meus pais, por me darem toda a
base que precisei;

Para meu marido e minha filha, pela
paciência e apoio no período em que me
dediquei a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a oportunidade e a capacitação necessária para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Yukio Suzuki, pela oportunidade, apoio e orientação para a realização desta dissertação.

Aos meus pais, Valter e Inês, por me ensinarem a persistir nos momentos difíceis e encontrar forças para superar os obstáculos.

Ao meu marido Marcio e minha filha Mayara Helena, pelo incentivo tão necessário em muitos momentos e pela paciência que tiveram na minha ausência.

À minha irmã, Eliana, pela ajuda no cuidado com minha filha sempre que necessário.

Aos amigos engenheiros Antonio Carlos Oquendo Pereira, Caio Rubens Gonçalves, Leandro Cardoso Trentin, Isabella Veiga e Ana Maria Siwik Gêbra, por todo o auxílio durante o desenvolvimento do estudo.

“Busquem, pois, em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça, e todas as coisas vos serão acrescentadas.”

Mateus 6:33

RESUMO

Os acostamentos exercem funções importantes em uma rodovia, tanto em relação à melhoria das condições operacionais, tais como a capacidade e a segurança viárias, quanto ao desempenho dos pavimentos, protegendo a estrutura da pista principal, melhorando as condições de drenagem e de transferência de carga. Entretanto, os acostamentos têm sido suprimidos ou implantados de maneira incorreta por razões de economia. O presente trabalho reuniu critérios e recomendações existentes sobre a implantação de acostamentos no que diz respeito à sua influência na capacidade e na segurança viárias, às suas características geométricas, aos métodos para a definição do tipo, dimensionamento e sobre os defeitos encontrados nos pavimentos, tanto nos acostamentos quanto nas pistas. Também efetuou análises para mensurar a importância dos acostamentos no bom desempenho de uma rodovia, tanto em relação às condições operacionais, como do desempenho do pavimento. A partir destas análises verificou-se que a supressão de acostamentos em uma rodovia pode reduzir a sua capacidade em 7% e aumentar o índice de acidentes previstos em até 28%. Com relação ao desempenho dos pavimentos, a partir do levantamento das condições funcionais e estruturais dos pavimentos existentes na malha rodoviária pertencente à Divisão Regional DR-2 do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) efetuado em 2005, verificou-se que o Índice de Qualidade Final da malha composta por rodovias com acostamentos é superior ao da malha composta por rodovias sem acostamentos. Foram então realizadas análises que verificaram a influência dos acostamentos (i) na vida útil de pavimentos flexíveis e rígidos através da utilização do método de dimensionamento da AASHTO; (ii) na espessura das placas de concreto dos pavimentos rígidos através dos métodos de dimensionamento da AASHTO e da PCA; (iii) nas tensões atuantes nas placas de concreto dos pavimentos rígidos através da análise mecanicista com a utilização do programa EVERFE 2.24. Todas as análises mostraram que os acostamentos melhoram significativamente o desempenho do pavimento da pista principal, seja aumentando a sua vida útil de 100 a 400% ou reduzindo a espessura necessária do revestimento da pista principal em cerca de 25%. Realizou-se também uma análise de custo para

orientar a definição do tráfego a ser considerado para o dimensionamento do pavimento dos acostamentos, onde se constatou que o valor de 5% do tráfego total considerado para a pista implica em aumento de apenas 2 a 3 % nos custos totais da pavimentação, sendo recomendável o seu uso. Por fim, propôs-se um Fluxograma para Projeto baseado nas análises realizadas e com o objetivo de orientar a decisão de implantar ou não os acostamentos, assim como fornecer recomendações a serem seguidas em ambos os casos.

Palavras-chave: Acostamento. Rodovias. Pavimentação.

ABSTRACT

Shoulders has important functions in a highway, so much in relation to the improvement of the operational conditions, such as the capacity and the road safety, as for the pavements performance, protecting the structure of the mainline, improving the drainage and load transfer conditions. However, the shoulders have been suppressed or implanted in incorrect way for economy reasons. The present work gathered criteria and existent recommendations on the implantation of shoulders related to its influence in the capacity and road safety, to their geometric characteristics, to the methods for the definition of the type, design method and failures in the pavements, in the shoulders and in the tracks. It also made analyses to measure the importance of the shoulders in the good performance of a highway, so much in relation to the operational conditions, as of the pavement performance. Starting from these analyses it was verified that the suppression of shoulders in a highway can reduce its capacity in 7% and to increase the predicted accidents index in up to 28%. Regarding the pavements performance, starting from the functional and structural conditions of the existent pavements in the road mesh belonging to the Regional Division DR-2 of the Department of Highways of the State of São Paulo (DER/SP) in 2005, it was verified that the value of Final Quality Index of the mesh composed by highways with shoulders is superior to the mesh composed by highways without shoulders. Then, analyses were made to verify the influence of the shoulders (i) in the flexible and rigid pavements life cycle through the use of the AASHTO design method; (ii) in the concrete thickness of the rigid pavements through the AASHTO and PCA design methods; (iii) in the stresses in the concrete plate of the rigid pavements through the analysis mechanic with the use of the software EVERFE 2.24. All of the analyses showed that the shoulders improve significantly the pavement performance of the mainline, increasing its life cycle from 100 to 400% or reducing the necessary thickness of the covering of the mainline in about 25%. It also took place a cost analysis to guide the definition of the traffic to be considered in the shoulders pavement design, where it was verified that the value of 5% of the total traffic considered for the mainline increases only 2 to 3% in the total costs of the paving, being advisable its use. Finally, it was proposed a Flowchart for Project

based on the accomplished analyses and with the objective of guiding the decision of implanting or not the shoulders, as well as supplying recommendations to be following in both cases.

Keywords: Shoulder. Highways. Paving.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Divisão Regional de Itapetininga (DR-2) e sua localização no Estado de São Paulo.....	26
Figura 2.2 - Mapa de localização do Trecho Sul do Rodoanel Mario Covas.....	27
Figura 3.1 – Velocidade Média de Viagem em Função do Fluxo em Rodovias de Pista Simples para Condição Base	40
Figura 3.2 – Porcentagem de Tempo Gasto Seguindo em Função do Fluxo em Rodovias de Pista Simples para Condição Base	40
Figura 3.3 – Alturas toleráveis de degrau entre a pista e o acostamento em função da velocidade do tráfego e da forma do degrau	44
Figura 4.1 – Posição de implantação das sarjetas de pé de corte	48
Figura 4.2 – Posição de implantação das sarjetas de borda de aterro.....	49
Figura 4.3 – Posição de implantação das sarjetas de canteiro central.....	49
Figura 4.4 – Largura de inundação considerada para dimensionamento das sarjetas	51
Figura 4.5 – Saída de Dreno de Pavimento (esquerda) e detalhe da quantidade de água drenada (direita)	52
Figura 4.6 – Drenos de pavimento – com tubo perfurado e cego.....	53
Figura 4.7 – Nomograma para Determinação da Seção de Vazão	54
Figura 4.8 – Camada Drenante de Pavimento em Seções em Aterro e em Corte	56

Figura 6.1 - Trincamento e Panela em Pavimento Flexível	78
Figura 6.2 - Trincamento, Afundamento e Remendos em Pavimento Flexível	79
Figura 6.3 - Afundamento de Trilha de Roda e Trincamento em Pavimento Flexível	79
Figura 6.4 - Trincamento Couro de Jacaré em Pavimento Flexível.....	80
Figura 6.5 - Degrau, Trincas e Afundamentos em Acostamento Flexível Adjacente à Pavimento Flexível	81
Figura 6.6 - Abertura e Formação de Degrau na Junta Longitudinal em Acostamento Flexível Adjacente à Pavimento Rígido	82
Figura 6.7 - Trincamento e Formação de Painelas na Faixa Adicional e Degrau na Junta Longitudinal Entre a Pista e a Faixa Adicional.....	83
Figura 6.8 - Degrau e Afundamentos em Acostamento Flexível Adjacente à Pavimento Flexível	83
Figura 7.1 – Variação da capacidade em função das larguras da faixa de rolamento e do acostamento.....	91
Figura 7.2 – Variação do índice de acidentes em função das larguras da faixa de rolamento e do acostamento	93
Figura 7.3 – Distribuição dos segmentos de pavimentos da malha rodoviária do DR-2 segundo o conceito obtido na avaliação do IRI, para as situações com e sem acostamento.....	95
Figura 7.4 – Distribuição dos segmentos de pavimentos da malha rodoviária do DR-2 segundo o conceito obtido na avaliação do IDS, para as situações com e sem acostamento.....	96

Figura 7.5 – Distribuição dos segmentos de pavimentos da malha rodoviária do DR-2 segundo o conceito obtido na avaliação do D0, para as situações com e sem acostamento.....	96
Figura 7.6 – Gráfico da variação da serventia em função do número de solicitações calculado para as estruturas analisadas nas condições de drenagem consideradas	103
Figura 7.7 – Gráfico da variação da vida útil do pavimento em função da condição de drenagem	105
Figura 7.8 – Gráfico da variação da serventia em função do número de solicitações calculado para as estruturas analisadas nas condições de transferência de carga consideradas.....	109
Figura 7.9 – Estrutura do pavimento proposta para o dimensionamento da espessura da placa em função do acostamento.....	110
Figura 7.10 – Quadro resumo do dimensionamento da espessura da placa de concreto através do método da AASHTO (1993) em função do acostamento e do módulo de reação do sistema	111
Figura 7.11 – Quadro resumo do dimensionamento da espessura da placa de concreto através do método da PCA (1984) em função do acostamento e do módulo de reação do sistema	112
Figura 7.12 – Gráfico comparativo das espessuras da placa de concreto calculadas através dos métodos da AASHTO (1993) e da PCA (1984) em função do acostamento e do módulo de reação do sistema.....	112
Figura 7.13 – Situação de carregamento analisada, considerando pista sem acostamento e carga aplicada no centro da placa	114

Figura 7.14 – Situação de carregamento analisada, considerando pista sem acostamento e carga aplicada no bordo da placa	115
Figura 7.15 – Situação de carregamento analisada, considerando pista com acostamento e carga aplicada no centro da placa	116
Figura 7.16 – Situação de carregamento analisada, considerando pista com acostamento e carga aplicada no bordo da placa	117
Figura 7.17 – Quadro resumo do número de solicitações admissíveis para placas de concreto considerando-se a carga aplicada em seu bordo, em função do diferencial térmico e da largura do acostamento	120
Figura 7.18 – Seção da plataforma da rodovia considerada na análise	121
Figura 7.19 – Estruturas de pavimento consideradas na análise de custo em função do tráfego considerado no projeto do acostamento	122
Figura 7.20 – Gráfico comparativo do custo do acostamento relativo ao custo total do pavimento em função do tráfego considerado no acostamento, para as duas situações de dimensionamento	124
Figura 8.1 – Fluxograma para projeto de acostamentos	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Distribuição da malha rodoviária do Estado de São Paulo. Fonte DER/SP.....	24
Tabela 2.2 - Evolução da Frota de Veículos do Estado de São Paulo	25
Tabela 3.1 – Definição da classe de projeto de uma rodovia em função de seu sistema e classe funcional.....	29
Tabela 3.2 – Larguras de acostamento recomendadas pelo DNER em função da classe de projeto e região de implantação	31
Tabela 3.3 - Fatores de Ajuste para Restrição de Largura da Faixa e Afastamento Lateral de Obstruções na Capacidade e Volumes de Serviço de Rodovia de Pista Simples com Fluxo Ininterrupto – HCM (1965).....	34
Tabela 3.4 - Fatores de Ajuste para Restrição de Largura da Faixa e Afastamento Lateral de Obstruções na Capacidade para Rodovia de Múltiplas Faixas Não Divididas com Fluxo Ininterrupto – HCM (1965, 1985).....	35
Tabela 3.5 - Fatores de Ajuste para Restrição de Largura da Faixa e Afastamento Lateral de Obstruções na Capacidade para Rodovia de Múltiplas Faixas Divididas com Fluxo Ininterrupto – HCM (1965, 1985)	36
Tabela 3.6 - Fatores de Ajuste para o Efeito Combinado de Faixas Estreitas e Largura Restrita do Acostamento na Capacidade e Nível de Serviço – HCM (1985).....	37
Tabela 3.7 - Redução da velocidade de fluxo livre em função das larguras da faixa e do acostamento para rodovias de pista simples (FL)	39
Tabela 3.8 - Redução da velocidade de fluxo livre em função da densidade de acessos para rodovias com pista simples (FA)	39

Tabela 5.1 – Critérios de Seleção do Tipo de Pavimento dos Acostamentos Adjacentes às Pistas Principais em Concreto dos Estados do Centro-Oeste dos Estados Unidos (continua)	69
Tabela 5.1 – Critérios de Seleção do Tipo de Pavimento dos Acostamentos Adjacentes às Pistas Principais em Concreto dos Estados do Centro-Oeste dos Estados Unidos (conclusão).....	70
Tabela 5.2 - Práticas para Determinação da Espessura dos Pavimentos dos Acostamentos Adjacentes à Pista Principal em Concreto nos Estados do Centro-Oeste dos Estados Unidos	72
Tabela 6.1 – Classificação do estado do pavimento em função dos valores de IRI..	85
Tabela 6.2 – Classificação do estado do pavimento em função dos valores de IDS	86
Tabela 6.3 – Classificação do estado do pavimento em função dos valores de D0..	87
Tabela 6.4 – Pesos atribuídos aos conceitos obtidos pelo pavimento	88
Tabela 6.5 – Pesos atribuídos às notas de cada parâmetro de avaliação	89
Tabela 6.6 – Correlação entre o IQF e a qualidade do pavimento da malha analisada	89
Tabela 7.1 - Coeficientes de drenagem utilizados na análise	99
Tabela 7.2 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil e valores do número estrutural (SN) para as condições de drenagem consideradas – 1ª Estrutura (Baixo Tráfego).....	100
Tabela 7.3 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil e valores do número estrutural (SN) para as condições de drenagem consideradas – 2ª Estrutura (Médio Tráfego).....	100

Tabela 7.4 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil e valores do número estrutural (SN) para as condições de drenagem consideradas – 3ª Estrutura (Alto Tráfego).....	100
Tabela 7.5 - Número de solicitações calculado para cada estrutura analisada, em função do PSI e do coeficiente de drenagem.....	102
Tabela 7.6 - Relação entre a vida útil de projeto para as condições de drenagem péssima e excelente em relação à vida útil de projeto para coeficiente de drenagem igual a 1,0.....	104
Tabela 7.7 – Quadro resumo da variação da vida útil do pavimento considerando-se os efeitos da drenagem em relação à vida útil para $m_i=1,0$	105
Tabela 7.8 - Coeficientes de transferência de carga (J) utilizados na análise.....	106
Tabela 7.9 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil – 1ª Estrutura (Médio Tráfego).....	107
Tabela 7.10 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil – 2ª Estrutura (Alto Tráfego).....	107
Tabela 7.11 - Número de solicitações calculado para cada estrutura analisada, em função do PSI e do coeficiente de transferência de carga	108
Tabela 7.12 – Quadro resumo da variação da vida útil do pavimento considerando-se os efeitos do acostamento em relação à vida útil do pavimento sem acostamento	109
Tabela 7.13 – Tensões máximas na placa de concreto para carga aplicada no centro da placa.....	118
Tabela 7.14 – Tensões máximas na placa de concreto para carga aplicada no bordo	118

Tabela 7.15 – Custos em função do tráfego considerado no acostamento para a situação 1 de dimensionamento da estrutura.....123

Tabela 7.16 – Custos em função do tráfego considerado no acostamento para a situação 2 de dimensionamento da estrutura.....123

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	22
2 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO E DESCRIÇÃO DOS TRECHOS ESTUDADOS	24
3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E OPERACIONAIS DA VIA RELEVANTES AO ESTUDO DOS ACOSTAMENTOS.....	28
3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	29
3.1.1 CLASSIFICAÇÃO DE RODOVIAS SEGUNDO O DNIT (ANTIGO DNER)	29
3.1.2 LARGURA DO ACOSTAMENTO	30
3.1.3 DECLIVIDADE DO ACOSTAMENTO.....	31
3.1.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TIPOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL.....	32
3.2 CAPACIDADE VIÁRIA.....	33
3.3 SEGURANÇA VIÁRIA	41
4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DRENAGEM SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL DOS PAVIMENTOS.....	46
4.1 DRENAGEM SUPERFICIAL.....	47
4.2 DRENAGEM SUBSUPERFICIAL	51
4.2.1 DRENOS DE PAVIMENTO.....	52
4.2.2 CAMADA DRENANTE.....	55
5 CONSIDERAÇÕES REFERENTES AO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DOS ACOSTAMENTOS.....	57
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	57

5.2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	58
5.2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	58
5.2.1.1 AASHTO (1993)	58
5.2.1.2 DNER	60
5.2.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	61
5.2.2.1 AASHTO (1993)	61
5.2.2.2 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA, 1984).....	63
5.3 CONSIDERAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DO PAVIMENTO DO ACOSTAMENTO	65
5.4 CRITÉRIOS EXISTENTES DE PROJETO DE ACOSTAMENTO	67
6 DEFEITOS E AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS.....	74
6.1 PRINCIPAIS DEFEITOS RELACIONADOS AOS ACOSTAMENTOS	74
6.1.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	74
6.1.1.1 TRINCAS COURO DE JACARÉ	74
6.1.1.2 PANELAS OU BURACOS.....	75
6.1.1.3 BOMBEAMENTO DE FINOS	75
6.1.1.4 AFUNDAMENTOS	75
6.1.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	76
6.1.2.1 BOMBEAMENTO DE FINOS	76
6.1.2.2 FISSURAS DE CANTO	76
6.1.2.3 ESCALONAMENTO DAS JUNTAS.....	77
6.1.2.4 DESNÍVEL PAVIMENTO-ACOSTAMENTO.....	77
6.1.3 DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA	78
6.1.3.1 DEFEITOS NA PISTA DEVIDOS À AUSÊNCIA DE ACOSTAMENTOS.....	78
6.1.3.2 DEFEITOS NO ACOSTAMENTO	81
6.1.3.3 DEFEITOS DEVIDOS AO USO DOS ACOSTAMENTOS COMO FAIXA ADICIONAL.....	83

6.2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS ATRAVÉS DO ÍNDICE DE QUALIDADE FINAL (IQF)	84
6.2.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)	85
6.2.2 ÍNDICE DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE (IDS).....	85
6.2.3 DEFLEXÃO MÁXIMA (D_0)	87
6.2.4 ÍNDICE DE QUALIDADE FINAL (IQF)	87

7 INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA VIA E NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS 90

7.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA RODOVIA.....	90
7.1.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NA CAPACIDADE DA VIA	91
7.1.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NO ÍNDICE DE ACIDENTES.....	92
7.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS	94
7.2.1 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS EXISTENTES	94
<u>7.2.1.1 LEVANTAMENTOS DAS CONDIÇÕES FUNCIONAIS E ESTRUTURAIS DOS PAVIMENTOS</u>	<u>95</u>
7.2.1.1.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)	95
7.2.1.1.2 ÍNDICE DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE (IDS).....	96
7.2.1.1.3 DEFLEXÃO MÁXIMA (D_0)	96
<u>7.2.1.2 CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE FINAL (IQF)</u>	<u>97</u>
7.2.1.2.1 SUBMALHA COM ACOSTAMENTOS	97
7.2.1.2.2 SUBMALHA SEM ACOSTAMENTOS	97
<u>7.2.1.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	<u>98</u>
7.2.2 ESTIMATIVAS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ATRAVÉS DE MODELOS	98
<u>7.2.2.1 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS.....</u>	<u>99</u>
7.2.2.1.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	99
7.2.2.1.2 PAVIMENTO RÍGIDO.....	106

<u>7.2.2.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO NECESSÁRIA PARA A PISTA EM FUNÇÃO DO TIPO DE ACOSTAMENTO ADOTADO</u>	<u>110</u>
7.2.2.2.1 DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS DO PAVIMENTO DE CONCRETO.....	110
7.2.2.2.2 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES NAS PLACAS DE CONCRETO.....	113
7.3 ANÁLISE DE CUSTOS PARA A DEFINIÇÃO DO TRÁFEGO A SER CONSIDERADO NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DO ACOSTAMENTO.....	121
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	125
REFERÊNCIAS.....	133

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os acostamentos de uma rodovia consistem na faixa adjacente à pista principal que apresenta basicamente as seguintes funções: acomodar veículos estacionados em casos de emergência e proteger as camadas do pavimento da pista. Adicionalmente, a presença de acostamentos proporciona um aumento da segurança viária, já que aumenta a área de escape para veículos errantes, afasta a faixa de rolamento de obstruções laterais à rodovia, tais como barreiras, defensas e sinalizações, ampliam as distâncias de visibilidade em trechos de seção em corte e ainda promovem maior espaço para operações de manutenção.

Em contra partida, a implantação de acostamentos consiste numa atividade onerosa e, por isso, tem sido suprimida em inúmeros projetos. Em consequência, tem-se verificado o desempenho insatisfatório de pavimentos rodoviários, principalmente decorrentes de condições inadequadas de drenagem.

Pelos motivos acima descritos, a decisão sobre a implantação de acostamentos em rodovias consiste em um assunto polêmico. Porém, em uma extensa malha viária como, por exemplo, a pertencente ao Estado de São Paulo, são necessárias decisões acertadas a esse respeito para garantir a relação custo/benefício esperada pela sociedade.

No presente trabalho serão realizadas estimativas de desempenho de pavimentos através de modelos, tanto para pavimentos rígidos de concreto quanto pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico, considerando-se a presença ou não de acostamentos e seu tipo. Também, será realizado levantamento das condições dos pavimentos existentes nas rodovias pertencentes à malha da Divisão Regional de Itapetininga (DR-2) do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP), e serão efetuadas comparações da qualidade dos trechos com e sem acostamentos.

Por fim, será proposto um critério para tomada de decisão embasado: i) no tipo de pavimento da pista principal e do acostamento a ser implantado, ii) na contribuição do acostamento para o aumento da vida útil do pavimento da pista principal, iii) na

possibilidade de aproveitamento da estrutura do pavimento do acostamento para futuras ampliações da pista para suprir a necessidade de aumento da capacidade viária, iv) na influência das condições de segurança viária e v) nos custos de implantação e manutenção ao longo do período de projeto considerado.

2 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO E DESCRIÇÃO DOS TRECHOS ESTUDADOS

A malha rodoviária do Estado de São Paulo atualmente totaliza cerca de 200.000 quilômetros de extensão, dentre rodovias municipais, rodovias estaduais administradas pelo DER/SP, Desenvolvimento Rodoviário S. A. (DERSA) ou concessionárias e rodovias federais, conforme apresentado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Distribuição da malha rodoviária do Estado de São Paulo. Fonte DER/SP

TIPO DE ESTRADA		ÓRGÃO			TOTAL ESTADUAL (km)	FEDERAL (km)	MUNICIPAL (km)	TOTAL (km)
		DER (km)	CONCESSÕES (km)	DERSA (km)				
EIXO	TERRA	958,69	0,00	0,00	958,69	0,00	164.142,32	165.101,01
	PISTA SIMPLES	10.947,13	1.220,59	42,11	12.209,83	445,27	11.665,38	24.320,48
	PISTA DUPLA	1.106,95	2.330,29	316,99	3.754,23	610,22	0,00	4.364,45
	SUBTOTAL	13.012,77	3.550,88	359,10	16.922,75	1.055,49	175.807,70	193.785,94
ACESSOS	TERRA	271,46	0,00	0,00	271,46	0,00	0,00	271,46
	PISTA SIMPLES	2.327,19	0,00	0,00	2.327,19	0,00	0,00	2.327,19
	PISTA DUPLA	120,03	0,00	0,00	120,03	0,00	0,00	120,03
	SUBTOTAL	2.718,68	0,00	0,00	2.718,68	0,00	0,00	2.718,68
DISPOSITIVOS		1.132,31	694,08	124,82	1.951,21	0,00	0,00	1.951,21
SUBTOTAL		1.132,31	694,08	124,82	1.951,21	0,00	0,00	1.951,21
TOTAL		16.863,76	4.244,96	483,92	21.592,64	1.055,49	175.807,70	198.455,83

Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/informativos/estat_malha/malharod05.htm>. Acesso em: 19 jul. 2006.

Segundo o DER/SP verifica-se que a frota de veículos praticamente dobrou em 15 anos, alcançando em 2004, mais de 13 milhões de veículos. A tabela 2.2 apresenta a evolução da frota.

Tabela 2.2 - Evolução da Frota de Veículos do Estado de São Paulo

Ano	Nº de Veículos
1990	7.103.709
1991	8.004.509
1992	7.893.059
1993	8.477.512
1994	8.987.232
1995	9.915.931
1996	10.342.810
1997	10.769.688
1998	11.400.948
1999	11.867.438
2000	10.603.826
2001	11.348.349
2002	12.025.243
2003	12.665.366
2004	13.367.137

Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 19 jul. 2006.

Em virtude da extensão da malha rodoviária e do grande número de veículos que a utiliza faz-se necessário garantir que as rodovias apresentem qualidade e segurança adequadas, ao mesmo tempo de custos de construção e manutenção condizentes com o grau de utilização.

O presente estudo focalizará o acostamento, pois constitui um dos itens que interferem de forma considerável nos conceitos expostos acima (qualidade, segurança e custo).

Para as verificações de desempenho dos pavimentos existentes foi escolhida a malha rodoviária pertencente à Divisão Regional de Itapetininga (DR-2) do DER/SP. Esta Divisão Regional está localizada na região sudoeste do estado de São Paulo, conforme apresentado na figura 2.1, e sua malha rodoviária sob jurisdição do DER/SP possui cerca de 1700 km de extensão.

Figura 2.1 - Divisão Regional de Itapetininga (DR-2) e sua localização no Estado de São Paulo

O tráfego utilizado nas estimativas de desempenho dos pavimentos através de modelos será o mesmo tráfego projetado para o Trecho Sul do Rodoanel Mario Covas igual a 10^8 solicitações do eixo padrão.

O Rodoanel Mario Covas é uma via perimetral que visa circundar o núcleo central da Região Metropolitana de São Paulo. O Trecho Sul, ainda em fase de projeto, possui cerca de 60 km de extensão e ligará o trecho Oeste, já em operação, às rodovias Anchieta (SP) e Imigrantes (SP). A figura 2.2 apresenta a localização do Trecho Sul do Rodoanel Mario Covas.

Figura 2.2 - Mapa de localização do Trecho Sul do Rodoanel Mario Covas

3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E OPERACIONAIS DA VIA RELEVANTES AO ESTUDO DOS ACOSTAMENTOS

Com relação aos aspectos geométricos e de segurança, segundo FHWA (1986) os acostamentos apresentam as seguintes funções:

- acomodar veículos parados;
- providenciar área de escape para veículos errantes;
- aumentar a distância lateral existente entre o tráfego e a sinalização ou defensas e barreiras;
- aumentar a distância de visibilidade em cortes;
- disponibilizar áreas para operações de manutenção.

Recomenda-se que os acostamentos apresentem características, tais como:

- nítida delimitação entre as faixas de tráfego e o acostamento para evitar “invasões” involuntárias no acostamento;
- inclinação transversal adequada para garantir drenagem superficial eficiente;
- largura suficiente para uso emergencial, provendo distância satisfatória para a instalação de drenagem superficial, defensas e barreiras;
- suave transição através da borda da pista/acostamento.

Para que os acostamentos atendam às funções e recomendações anteriormente definidas, seus projetos devem levar em conta a capacidade viária, a classe da rodovia e as características geométricas apresentadas a seguir.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO DE RODOVIAS SEGUNDO O DNIT (ANTIGO DNER)

O projeto de uma rodovia deve ser executado de modo a garantir que a mesma atenda aos serviços a que se destina, provendo as características físicas necessárias para atender ao volume e tipo de tráfego previstos, com economia, conforto e segurança.

Visando estabelecer tais características, o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais do DNER (1999) apresenta uma classificação técnica para rodovias em função das características geométricas e das restrições de custos condicionadas pelo relevo.

Esta classificação técnica é definida em cinco grupos, de 0 a IV, sendo que os menores números representam características técnicas mais exigentes. Os critérios de classificação são definidos em função da posição hierárquica dentro da classificação funcional, do volume diário médio de tráfego, do nível de serviço e dos custos de implantação.

Em linhas gerais, a classe de projeto em que as rodovias devem ser enquadradas pode ser definida a partir da tabela 3.1, sempre tendo em vista os níveis de serviço e volumes de tráfego admissíveis.

Tabela 3.1 – Definição da classe de projeto de uma rodovia em função de seu sistema e classe funcional

Sistema	Classe Funcional	Classe de Projeto
Arterial	Principal	0 e I
	Primário	I
	Secundário	I e II
Coletor	Primário	II e III
	Secundário	III e IV
Local	Local	III e IV

DNER (1999)

3.1.2 LARGURA DO ACOSTAMENTO

De acordo com AASHTO (2001) na publicação *Geometric Design of Highways and Streets* (2001), as larguras dos acostamentos variam desde 0,60 metro, sem revestimento, para rodovias rurais, até 3,60 metros, com revestimento ou estabilizado, para as rodovias maiores.

Estudo realizado pelo *Federal Highway Administration* (FHWA, 1986) recomenda que os acostamentos apresentem largura entre 3,00 a 3,70 metros para garantir distância livre a partir da pista principal de 0,30 a 0,60 metro para veículos comerciais e de 0,90 a 1,20 metro para veículos de passeio. Esta distância também possibilita o uso do acostamento como faixa de rolamento para horário de pico, quando permitido pelas leis de trânsito.

As normas de projeto vigentes no Brasil indicam que todas as rodovias devem possuir acostamentos, sejam pavimentados ou não. Entretanto, os acostamentos constituem elemento sensível às restrições econômicas para a implantação de uma rodovia, uma vez que aumentam a largura necessária para a sua implantação e todos os custos decorrentes ao longo de sua extensão.

Segundo DNER (1999), a largura considerada ideal para os acostamentos de uma rodovia seria aquela capaz de abrigar um veículo de projeto e uma pessoa trabalhando ao seu lado, restando ainda uma largura de segurança até a pista.

Porém, um acostamento muito largo estimularia seu uso como faixa de rolamento, sendo prejudicial à segurança de tráfego, além de atrair solicitações de carga não previstas no projeto do pavimento que reduziriam drasticamente a sua vida útil.

Assim sendo, a largura dos acostamentos deveria ser definida em função de uma análise técnico-econômica do aumento dos custos de construção em comparação ao aumento de segurança do tráfego e da capacidade viária resultantes para cada caso.

O Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), apresenta as larguras recomendadas dos acostamentos em função da classe de projeto da rodovia e da região de implantação, conforme tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Larguras de acostamento recomendadas pelo DNER em função da classe de projeto e região de implantação

Classe do Projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	3,50	3,00	3,00
Classe I	3,00	2,50	2,50
Classe II	2,50	2,50	2,00
Classe III	2,50	2,00	1,50
Classe IV-A	1,30	1,30	0,80
Classe IV-B	1,00	1,00	0,50

3.1.3 DECLIVIDADE DO ACOSTAMENTO

Para garantir a segurança, os acostamentos devem ser contínuos, sem variação de largura ou declividade com relação à faixa de rolamento. Entretanto, para drenar a água superficial mais rapidamente, recomenda-se uma declividade maior no acostamento do que na faixa de rolamento, sendo:

- declividade do acostamento variando entre 2% a 8%;
- diferença entre a declividade da pista principal e a declividade do acostamento menor ou igual a 7%.

Ainda, para a definição da declividade transversal dos acostamentos deve-se levar em consideração o tipo de seu pavimento, tendo em vista o seu potencial de escoamento. Os valores recomendados pela AASHTO (2001) são:

- para revestimentos betuminosos ou em concreto: declividade entre 2% e 6%;
- para acostamentos com pedras britadas: declividade entre 4% e 6%;

- para acostamentos gramados: declividade entre 6% e 8%.

No Brasil, o DNER estabelece que os acostamentos devem apresentar declividade transversal de 5%, independentemente do tipo de pavimento ou da classe da via. Estas declividades podem variar apenas em regiões de curvas, em função da superelevação da pista principal.

Nos trechos em curva, quando o acostamento estiver no lado interno, sua declividade se manterá constante em 5% até que a superelevação da pista atinja este valor, e a partir daí, sua declividade acompanhará a declividade da pista.

Já o acostamento situado no lado externo da curva, tanto poderá acompanhar a superelevação da pista em valor e sentido, quanto poderá ter sua declividade voltada para fora da curva, ao contrário da pista. Neste último caso, a diferença algébrica não deverá ultrapassar 7%.

3.1.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TIPOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL

As seções transversais das pistas de uma rodovia nos trechos em tangente podem ser abauladas ou com caimento simples.

As pistas abauladas apresentam drenagem da água superficial mais rápida do que as pistas com caimento simples. Em contrapartida, as pistas abauladas necessitam de dispositivos de drenagem em ambos os lados, ao passo que em pistas com caimento simples as captações ocorrem em um só lado, mas com um acúmulo maior de águas pluviais no bordo mais baixo da seção transversal.

3.2 CAPACIDADE VIÁRIA

A abordagem do conceito de capacidade viária associada à definição de níveis de serviço no presente trabalho visa estudar a influência do acostamento nestes elementos, auxiliando a decisão sobre a implantação dos acostamentos e definição de sua largura. Ou seja, visa analisar a restrição de capacidade viária em virtude da não implantação de acostamentos, evitando-se eventualmente a necessidade de implantação de faixas adicionais ou duplicações. Ainda, procura apresentar critérios para a determinação da largura dos acostamentos para otimização dos custos de implantação da rodovia.

A capacidade da via define o número máximo de veículos que pode passar por determinada seção, durante um período de tempo estipulado e sob as condições existentes da via e do trânsito.

O Nível de Serviço de uma rodovia descreve as condições operacionais da corrente de tráfego em função da velocidade e tempo de viagem, liberdade de execução de manobras, interrupções do tráfego, conforto e conveniência.

A capacidade e os níveis de serviço para rodovias de pistas simples e divididas sob condição de fluxo contínuo dependem da largura da faixa de rolamento e da distância da obstrução lateral até a borda da faixa de tráfego, o que pressupõe a existência de acostamentos para garantir o gabarito livre de qualquer impedância lateral.

O Manual de Capacidade Viária (HCM (1965, 1985, 1994)) considera que, tanto a redução do afastamento de obstruções, quanto a redução da largura da faixa de rolamento, causam diretamente a perda de capacidade e nível de serviço da rodovia. As tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam a influência considerada dos parâmetros supracitados na capacidade viária e nos níveis de serviço, respectivamente, para rodovias de pista simples, rodovias de múltiplas faixas do tipo divididas e rodovias de múltiplas faixas do tipo não divididas. A tabela 3.6 apresenta os efeitos combinados da redução da faixa de rolamento e da largura do acostamento no nível de serviço da via.

Tabela 3.3 - Fatores de Ajuste para Restrição de Largura da Faixa e Afastamento Lateral de Obstruções na Capacidade e Volumes de Serviço de Rodovia de Pista Simples com Fluxo Ininterrupto – HCM (1965)

DISTÂNCIA DA BORDA DA FAIXA DE TRÁFEGO ATÉ A OBSTRUÇÃO (m)	FATORES DE AJUSTE PARA RESTRIÇÃO DE AFASTAMENTO LATERAL E LARGURA DA FAIXA *															
	OBSTRUÇÃO EM UM LADO								OBSTRUÇÕES EM AMBOS LADOS							
	FAIXA 3,60m		FAIXA 3,30m		FAIXA 3,00m		FAIXA 2,70m		FAIXA 3,60m		FAIXA 3,30m		FAIXA 3,00m		FAIXA 2,70m	
	NS B	NS E	NS B	NS E	NS B	NS E	NS B	NS E	NS B	NS E	NS B	NS E	NS B	NS E	NS B	NS E
1,80	1,00	1,00	0,86	0,88	0,77	0,81	0,70	0,76	1,00	1,00	0,86	0,88	0,77	0,81	0,70	0,76
1,20	0,96	0,97	0,83	0,85	0,74	0,79	0,68	0,74	0,92	0,94	0,79	0,83	0,71	0,76	0,65	0,71
0,60	0,91	0,93	0,78	0,81	0,70	0,75	0,64	0,70	0,81	0,85	0,70	0,75	0,63	0,69	0,57	0,65
0	0,85	0,88	0,73	0,77	0,66	0,71	0,60	0,66	0,70	0,76	0,60	0,67	0,54	0,62	0,49	0,58

* Fator de ajuste dado para nível E, representativo da capacidade, e para nível B; interpolar para outros níveis de serviço
NS: Nível de Serviço

Tabela 3.4 - Fatores de Ajuste para Restrição de Largura da Faixa e Afastamento Lateral de Obstruções na Capacidade para Rodovia de Múltiplas Faixas Não Divididas com Fluxo Ininterrupto – HCM (1965, 1985)

DISTÂNCIA DA BORDA DA FAIXA DE TRÁFEGO ATÉ A OBSTRUÇÃO (m)	FATORES DE AJUSTE PARA RESTRIÇÃO DE AFASTAMENTO LATERAL E LARGURA DA FAIXA							
	OBSTRUÇÃO APENAS NO LADO DIREITO DE UM SENTIDO DE TRÁFEGO				OBSTRUÇÕES EM AMBOS OS LADOS DE UM SENTIDO DE TRÁFEGO			
	FAIXA 3,60m	FAIXA 3,30m	FAIXA 3,00m	FAIXA 2,70m	FAIXA 3,60m	FAIXA 3,30m	FAIXA 3,00m	FAIXA 2,70m
RODOVIA COM 4 FAIXAS, NÃO DIVIDIDA, UM SENTIDO DE TRÁFEGO								
1,80	1,00	0,95	0,89	0,77	NA	NA	NA	NA
1,20	0,98	0,94	0,88	0,76	NA	NA	NA	NA
0,60	0,95	0,92	0,86	0,75	0,94	0,91	0,86	NA
0	0,88	0,85	0,80	0,70	0,81	0,79	0,74	0,66
RODOVIA COM 6 FAIXAS, NÃO DIVIDIDA, UM SENTIDO DE TRÁFEGO								
1,80	1,00	0,95	0,89	0,77	NA	NA	NA	NA
1,20	0,99	0,94	0,88	0,76	NA	NA	NA	NA
0,60	0,97	0,93	0,86	0,75	0,96	0,92	0,85	NA
0	0,94	0,90	0,83	0,72	0,91	0,87	0,81	0,70

NA: não aplicável

Tabela 3.5 - Fatores de Ajuste para Restrição de Largura da Faixa e Afastamento Lateral de Obstruções na Capacidade para Rodovia de Múltiplas Faixas Divididas com Fluxo Ininterrupto – HCM (1965, 1985)

DISTÂNCIA DA BORDA DA FAIXA DE TRÁFEGO ATÉ A OBSTRUÇÃO (m)	FATORES DE AJUSTE PARA RESTRIÇÃO DE AFASTAMENTO LATERAL E LARGURA DA FAIXA							
	OBSTRUÇÃO APENAS EM UM LADO DE UM SENTIDO DE TRÁFEGO				OBSTRUÇÕES EM AMBOS LADOS DE UM SENTIDO DE TRÁFEGO			
	FAIXA 3,60m	FAIXA 3,30m	FAIXA 3,00m	FAIXA 2,70m	FAIXA 3,60m	FAIXA 3,30m	FAIXA 3,00m	FAIXA 2,70m
RODOVIA COM 4 FAIXAS, DIVIDIDA, UM SENTIDO DE TRÁFEGO								
1,80	1,00	0,97	0,91	0,81	1,00	0,97	0,91	0,81
1,20	0,99	0,96	0,90	0,80	0,98	0,95	0,89	0,79
0,60	0,97	0,94	0,88	0,79	0,94	0,91	0,86	0,76
0	0,90	0,87	0,82	0,73	0,81	0,79	0,74	0,66
RODOVIA COM 6 OU 8 FAIXAS, DIVIDIDA, UM SENTIDO DE TRÁFEGO								
1,80	1,00	0,96	0,89	0,78	1,00	0,96	0,89	0,78
1,20	0,99	0,95	0,88	0,77	0,98	0,94	0,87	0,77
0,60	0,97	0,93	0,87	0,76	0,96	0,92	0,85	0,75
0	0,94	0,91	0,85	0,74	0,91	0,87	0,81	0,70

Tabela 3.6 - Fatores de Ajuste para o Efeito Combinado de Faixas Estreitas e Largura Restrita do Acostamento na Capacidade e Nível de Serviço – HCM (1985)

LARGURA UTILIZÁVEL DO ACOSTAMENTO (m)	LARGURA DA FAIXA							
	3,60		3,30		3,00		2,70	
	NS A-D	NS* E	NS A-D	NS* E	NS A-D	NS* E	NS A-D	NS* E
1,80	1,00	1,00	0,93	0,94	0,84	0,87	0,70	0,76
1,20	0,92	0,97	0,85	0,92	0,77	0,85	0,65	0,74
0,60	0,81	0,93	0,75	0,88	0,68	0,81	0,57	0,70
0	0,70	0,88	0,65	0,82	0,58	0,75	0,49	0,66

* O fator se aplica para velocidades abaixo de 70 km/h
NS: Nível de Serviço

Já as versões mais recentes do HCM (HCM, 1994, 2000) consideram que os efeitos da redução do afastamento de obstruções ou da largura da faixa de rolamento atuam sobre a velocidade de fluxo livre estimada da rodovia.

A velocidade de fluxo livre consiste na velocidade do tráfego em que o motorista sente-se confortável para viajar sob as características físicas, ambientais e condições de controle da rodovia, em uma seção não congestionada. Esta velocidade pode ser estimada através de medições de velocidade em campo ou a partir da velocidade de fluxo livre considerada para as condições ideais ou condição base.

No primeiro caso, é dada pela equação apresentada a seguir.

$$VFL = V_{MR} + 0,0125 \cdot \frac{I_V}{F_{VP}}$$

VFL = velocidade estimada de fluxo livre (km/h);

V_{MR} = Velocidade média medida na rodovia (km/h);

I_V = índice de veículos observados para o período de observação (veículos/h);

F_{VP} = Fator de ajuste de veículos pesados.

Porém, quando não há informações de campo disponíveis, estima-se a velocidade de fluxo livre através da velocidade de fluxo livre para a condição base, sendo:

$$VFL = VFL_B - F_L - F_A$$

VFL = velocidade estimada de fluxo livre (km/h);

VFL_B = velocidade de fluxo livre para a condição base (km/h);

F_L = redução da velocidade de fluxo livre em função das larguras da faixa e do acostamento, conforme tabela 3.7;

F_A = redução da velocidade de fluxo livre em função da densidade de acessos, conforme tabela 3.8.

Tabela 3.7 - Redução da velocidade de fluxo livre em função das larguras da faixa e do acostamento para rodovias de pista simples (F_L)

Largura da Faixa de Rolamento (m) L_f	F_L (km/h)			
	Largura do acostamento L_a (m)			
	$L_a < 0,60$	$0,60 \leq L_a < 1,20$	$1,20 \leq L_a < 1,80$	$L_a \geq 1,80$
$2,70 \leq L_f < 3,00$	10,30	7,70	5,60	3,50
$3,00 \leq L_f < 3,30$	8,50	5,90	3,80	1,70
$3,30 \leq L_f < 3,60$	7,50	4,90	2,80	0,70
$L_f \geq 3,60$	6,80	4,20	2,10	0,00

Tabela 3.8 - Redução da velocidade de fluxo livre em função da densidade de acessos para rodovias com pista simples (F_A)

Acessos por km (ambos os lados)	F_A (km/h)
0	0,00
6	4,00
12	8,00
18	12,00
≥ 24	16,00

A condição base ou ideal é definida como a melhor situação de uma via, em que qualquer melhoria feita não pode mais aumentar a sua capacidade. Representa uma condição de fluxo sem impedimentos ou atrasos. Esta situação é obtida através dos seguintes elementos:

- Largura das faixas de rolamento maior ou igual a 3,60 metros;
- Afastamento de obstáculos ou obstruções laterais fixas de 1,80 metro;
- Velocidade de fluxo livre de 100 km/h para rodovias com múltiplas faixas, e para rodovias de pista simples com duas mãos de direção, conforme figuras 3.1 e 3.2.
- Apenas veículos de passeio na corrente de tráfego;
- Relevo plano;
- Inexistência de zonas de ultrapassagem proibida para rodovias de pista simples;

- Inexistência de interferência de veículos que entram na rodovia sobre os veículos da corrente de tráfego.

Figura 3.1 – Velocidade Média de Viagem em Função do Fluxo em Rodovias de Pista Simples para Condição Base

Figura 3.2 – Porcentagem de Tempo Gasto Seguindo em Função do Fluxo em Rodovias de Pista Simples para Condição Base

Da análise do exposto acima, verifica-se que a ausência de acostamentos pode implicar em necessidade de aumento da capacidade da via, como por exemplo, necessidade de duplicação. Ainda, pode resultar em redução do nível de serviço apresentado pela rodovia, fazendo com que a mesma não se enquadre no nível de serviço recomendado.

Vale considerar também que, objetivando melhorar as condições operacionais do tráfego, muitas vezes os acostamentos são empregados como faixas auxiliares para veículos lentos em rampas ascendentes (3^{as} faixas), para aceleração e desaceleração nas interseções, para armazenamento e conversões e, ainda, como baias de ônibus para transporte coletivo.

3.3 SEGURANÇA VIÁRIA

A segurança viária é um dos fatores mais importantes a serem considerados quando da implantação ou restauração de uma rodovia, uma vez que as rodovias têm a função de servir aos seus usuários provendo conforto, segurança e economia adequados.

Os acidentes ocorridos em rodovias apresentam causas complexas, dependentes de diversos fatores, tanto relativos às características da pista, quanto relativos aos motoristas, veículos, tráfego, condições ambientais, etc. No entanto, estudos apontaram que dentre as inúmeras variáveis, três possuem maior importância nos índices de acidentes, a saber: largura da pista, largura do acostamento e tipo do acostamento.

Zegeer e Deacon (1987) analisaram 30 pesquisas anteriores relacionadas a acidentes e apresentaram as seguintes conclusões:

- As condições da pista e do acostamento afetam diretamente os acidentes do tipo colisão em sentidos contrários e fuga da pista, ao passo que acidentes do tipo colisão traseira e abalroamento lateral não são afetados por estas características. Assim sendo, os acidentes mencionados no presente trabalho serão apenas aqueles afetados pelas condições da pista e do acostamento.
- Os índices de acidentes diminuem tanto com o aumento da largura da pista, quanto com o aumento da largura do acostamento. Entretanto, quando

aumentadas as larguras da pista e do acostamento simultaneamente, os efeitos são menos percebidos.

- O aumento da largura da pista implica em maior redução do índice de acidentes do que o aumento da largura do acostamento.
- Os índices de acidentes ocorridos em seções com acostamentos não pavimentados são maiores do que aqueles ocorridos em seções com acostamentos pavimentados.
- Formulou-se modelo de previsão de acidentes em função da largura da pista, da largura total do acostamento e da largura pavimentada ou estabilizada do acostamento. Em virtude da complexidade do estudo, os autores do modelo não o consideraram aplicável a todas as situações, mas de grande valia quando aplicado conscientemente para estimar as prováveis reduções dos índices de acidentes diretamente relacionadas às larguras da pista e do acostamento. A eq. (1) a seguir representa o modelo proposto.

$$IA = 2,5788 \cdot (0,8907)^L (0,9562)^A (1,0026)^{LA} (0,9403)^{Ap} (1,0040)^{LAp} \quad (1)$$

Onde:

IA = índice de acidentes por milhão de veículo quilômetros;

L = largura da faixa de rolamento, em pés;

A = largura total do acostamento, incluindo a parte pavimentada ou estabilizada e a parte não estabilizada, em pés;

Ap = largura da parte pavimentada ou estabilizada do acostamento, em pés.

Contrariamente ao que foi apresentado por Zegeer e Deacon (1987) sobre a redução do índice de acidentes em rodovias com acostamento em relação àquelas desprovidas deste dispositivo, pesquisa realizada nas rodovias do Estado de São Paulo apontou para a situação inversa.

Este fato pode ser explicado conforme o exposto no capítulo de capacidade viária, onde a presença de acostamentos, principalmente pavimentados, afasta os veículos dos obstáculos laterais. Isto aumenta a sensação de segurança do motorista,

impelindo-o a trafegar em velocidades maiores, o que pode gerar maior número de acidentes.

Portanto, com base neste efeito do alargamento do acostamento sobre a velocidade média praticada e da grande complexidade de identificação dos causadores de acidentes, o modelo anteriormente proposto deve ser utilizado com cautela, servindo apenas como balizador dos índices de acidentes.

Outro fator que reconhecidamente apresenta influência na segurança viária são os degraus formados na interface entre a pista e o acostamento.

Estudos realizados na Carolina do Norte em 1974 indicaram que 3,5% dos acidentes ocorridos envolvendo apenas um veículo tinham influência de descontinuidades da pista. Ainda, destes 3,5%, 1% dos acidentes estava relacionado a degraus entre a pista e o acostamento, sendo este o tipo mais significativo de descontinuidade da pista. Recomenda-se, portanto, que os degraus entre a pista e o acostamento sejam eliminados ou minimizados.

Entretanto, tendo em vista que por muitas vezes a espessura de revestimento projetada para o acostamento é menor do que a do pavimento, principalmente em projetos de restauração, inevitavelmente forma-se um degrau entre a pista e o acostamento. Sendo este degrau indesejável principalmente do ponto de vista da segurança viária, a sua configuração final sempre deve ser analisada. Pesquisas realizadas a partir de 1977 mostraram que a severidade dos acidentes ocorridos devidos aos degraus localizados na interface entre a pista e o acostamento é dependente de sua altura, velocidade do veículo e ângulo de reentrada.

Com base nos estudos de Glennon (1987), a figura 3.3 apresenta os ábacos que definem alturas de degraus entre a pista e o pavimento toleráveis do ponto de vista da segurança viária, em função da velocidade do tráfego e da forma do degrau.

Figura 3.3 – Alturas toleráveis de degrau entre a pista e o acostamento em função da velocidade do tráfego e da forma do degrau

O manual de reabilitação de pavimentos de Illinois (2006) define graus de severidade em função da altura do degrau formado entre a pista e o acostamento, sendo: entre 1,25 cm a 2,50 cm como severidade baixa, de 2,50 cm a 5,00 cm de media severidade e acima de 5,00 cm, severidade alta.

Assim sendo, em locais onde ocorrem invasões mais freqüentes nos acostamentos, tais como em curvas horizontais, sugere-se que sejam eliminados os degraus entre

a pista principal e o acostamento, ou que sejam construídas bordas do pavimento chanfradas ou arredondadas para a redução dos impactos causados pela sua presença. Ainda, onde houver degrau, este deve ser mantido com altura menor ou igual a 5,00 cm.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DRENAGEM SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL DOS PAVIMENTOS

O sucesso da implantação de uma rodovia está intimamente relacionado às boas condições de drenagem, tanto superficial quanto subsuperficial de sua plataforma.

Uma drenagem superficial eficiente contribui para a segurança do tráfego, já que minimiza a lâmina d'água sobre a pista, reduzindo a aquaplanagem. Também reduz o tempo de permanência da água sobre o pavimento, evitando a infiltração indesejável para o seu bom desempenho. Ainda, conduz as águas lateralmente à pista, de forma segura, através de dispositivos adequados, o que reduz as infiltrações nas regiões adjacentes ao pavimento.

A bibliografia internacional apresenta ainda que o bom desempenho dos pavimentos depende de uma boa drenagem subsuperficial que seja capaz de evitar a geração de excessos de poro-pressão que provocam o bombeamento de finos e também de eliminar as águas que atuam como lubrificante entre os agregados nos casos de camadas granulares, reduzindo a sua resistência ao cisalhamento, aumentando a sua deformabilidade, comprometendo assim a sua vida útil.

Estudo realizado em trecho experimental por Pereira (2003) mediu deflexões em pavimento flexível desprovido de dispositivo de drenagem subsuperficial, em período de chuva e de estiagem. As medições foram realizadas com o equipamento *Falling Weight Deflectometer*. Da comparação entre os valores obtidos em cada período resultou que as deflexões do período de chuva eram cerca de 20% maiores do que as medidas no período seco.

Tal estudo também constatou que, em época de chuvas, os valores de deflexão medidos a 1,50m da borda do pavimento eram cerca de 65% superiores aos valores medidos no eixo da pista, enquanto que, em época de estiagem, esta diferença cai para menos de 20%. Além disso, ficou evidente que a maior parte da infiltração de água ocorre pelos bordos do pavimento, posto que o aumento da deflexão do período de estiagem para o período de chuvas foi de cerca de 70% nos bordos e de 20% no eixo.

Considerando o exposto, verifica-se que os acostamentos são elementos importantes na drenagem de rodovias, pois protegem o pavimento das águas que infiltram lateralmente. Ainda, acostamentos do mesmo material de revestimento da pista principal reduzem a abertura da junta longitudinal que permitiria a entrada de água por esta região.

A seguir serão apresentadas algumas considerações sobre a drenagem superficial e subsuperficial.

4.1 DRENAGEM SUPERFICIAL

A drenagem superficial de uma rodovia consiste no conjunto de dispositivos que interceptam e captam as águas pluviais e as conduzem de forma segura para fora do corpo estradal, em direção aos talwegues naturais.

O conjunto de dispositivos de drenagem superficial é constituído por valetas de proteção de cortes e aterros, sarjetas de pé de cortes e borda de aterros e de canteiro central, saídas e descidas d'água com ou sem dissipadores de energia, caixas coletoras e bueiros de greide. Entretanto, os dispositivos que apresentam influência direta nas condições de drenagem do pavimento são as sarjetas e, por isso, serão abordadas neste trabalho.

As sarjetas de pé de corte captam as águas que se precipitam sobre a plataforma e sobre os taludes de corte e as conduz longitudinalmente à rodovia, até o ponto de descarga seguro que, neste caso, seria em uma valeta no ponto de transição entre o corte e o aterro ou para uma caixa coletora de um bueiro de greide.

Segundo o Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006), em todos os cortes devem ser colocadas sarjetas à margem dos acostamentos. As sarjetas podem ter seção triangular, trapezoidal ou retangular, sendo que a triangular é a que oferece menor risco ao tráfego. As demais seções deverão ser utilizadas apenas quando a seção triangular for insuficiente hidraulicamente e deverão ter meio-fios de proteção

para impedir que as rodas de veículos desgovernados caiam em suas seções. A figura 4.1 apresenta a posição de implantação das sarjetas de corte com a seção mais utilizada.

Figura 4.1 – Posição de implantação das sarjetas de pé de corte

As sarjetas de borda de aterro localizam-se na faixa da plataforma contígua ao acostamento e têm a função de captar as águas que se precipitam sobre a plataforma para que estas não provoquem erosões na borda do acostamento e/ou no talude de aterro. O Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT recomenda sua implantação sempre que a velocidade das águas provoque erosão na borda da plataforma ou em interseções, para coletar e conduzir as águas dos ramos, ilhas, etc.

Estas sarjetas podem ter seção triangular, trapezoidal ou retangular, de acordo com a natureza e a categoria da rodovia, devendo sempre se ter em conta a sua interferência na segurança do tráfego. A posição de implantação da sarjeta de aterro com a seção mais utilizada está apresentada na figura 4.2.

Figura 4.2 – Posição de implantação das sarjetas de borda de aterro

Por fim, nas rodovias de pista dupla separadas por um canteiro central côncavo existe a necessidade de implantar sarjetas de canteiro central, que captam as águas precipitadas sobre a pista e sobre o canteiro e as conduz longitudinalmente até uma caixa coletora de bueiro de greide. Também são chamadas de valetas de canteiro central.

Estas sarjetas geralmente são triangulares, acompanhando as declividades dos taludes do canteiro central, conforme a figura 4.3. Quando a seção triangular passa a ser insuficiente hidraulicamente, estas sarjetas podem ter seção circular tipo meia cana, trapezoidal ou retangular.

Figura 4.3 – Posição de implantação das sarjetas de canteiro central

As sarjetas descritas acima podem ser revestidas com diversos materiais, dentre eles, concreto, alvenaria, solo cimento, solo e revestimento vegetal.

O dimensionamento das sarjetas é feito através da verificação de sua capacidade hidráulica em função da descarga de projeto proveniente da área de contribuição.

A descarga de projeto, por geralmente se tratar de pequenas bacias, é calculada através da fórmula Racional dada por:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{36 \times 10^4}$$

Onde:

Q = descarga de projeto (m³/s);

C = coeficiente médio de escoamento superficial (adimensional);

i = intensidade de precipitação (cm/h);

A = área de contribuição para a sarjeta (m²).

A verificação da capacidade hidráulica é feita através da determinação da altura da lâmina d'água e da velocidade do escoamento produzida pela vazão oriunda da área da bacia de contribuição. Tal verificação é feita através da fórmula de Manning associada à equação da Continuidade, como expresso a seguir.

$$V = \frac{R_H^{2/3} \cdot I^{1/2}}{n} \quad (\text{Fórmula de Manning})$$

$$V = \frac{Q}{S} \quad (\text{Equação da Continuidade})$$

$$Q = \frac{S \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2}}{n}$$

Onde:

Q = vazão máxima admissível (m³/s);

S = Área molhada da sarjeta (m²);

V = velocidade do escoamento (m/s);

I = declividade da sarjeta (m/m);

n = coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional);

R_H = raio hidráulico (m), sendo: $R_H = \frac{S}{P}$;

P = perímetro molhado da sarjeta (m).

Alguns órgãos, inclusive o DNIT em seu Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), permitem que as sarjetas sejam dimensionadas considerando-se uma largura de inundação maior do que a sua própria largura, ou seja, permite-se que durante as chuvas, o acostamento e/ou parte da pista permaneçam com uma lâmina d'água. A figura 4.4 ilustra tal situação.

Figura 4.4 – Largura de inundação considerada para dimensionamento das sarjetas

Este procedimento além de prejudicar a segurança do tráfego no momento da chuva, ainda permite que a água permaneça por mais tempo sobre o pavimento, aumentando a probabilidade de infiltração. Portanto, este procedimento deve ser evitado sempre que possível, principalmente em regiões de intensa pluviosidade, onde tais eventos ocorreriam com maior frequência.

4.2 DRENAGEM SUBSUPERFICIAL

A drenagem subsuperficial, conforme exposto anteriormente, é de suma importância ao bom desempenho dos pavimentos. Esta drenagem pode ser implantada na rodovia de duas formas: através de drenos embutidos no pavimento ou através da inserção de camadas drenantes na estrutura do pavimento.

No Brasil, emprega-se esta drenagem sempre que a região de implantação da rodovia apresentar altura pluviométrica superior a 1500mm por ano e em rodovias com tráfego diário médio acima de 500 veículos comerciais.

A figura 4.5 mostra uma boca de saída de dreno implantado e em funcionamento, evidenciando a eficiência e a necessidade deste dispositivo para o bom desempenho de pavimentos.

Figura 4.5 – Saída de Dreno de Pavimento (esquerda) e detalhe da quantidade de água drenada (direita)

4.2.1 DRENOS DE PAVIMENTO

Os drenos de pavimento podem ser de três tipos: drenos rasos longitudinais, drenos laterais de base e drenos transversais.

Os drenos rasos longitudinais são aqueles responsáveis por receber as águas provenientes da camada drenante do pavimento e conduzi-las longitudinalmente até o local de deságüe. São posicionados adjacentes à camada drenante, sendo que a face superior do dreno deve estar na mesma cota da face superior da camada drenante, de modo que o dreno receba toda a água coletada por esta camada.

São constituídos de materiais com, no mínimo, a mesma condutividade hidráulica das camadas drenantes, preferencialmente dotados de tubos perfurados. Quando

desprovidos do tubo são chamados de drenos cegos. A figura 4.6 apresenta as seções de drenos de pavimento.

Figura 4.6 – Drenos de pavimento – com tubo perfurado e cego

Estes drenos devem ser utilizados sempre que for técnica e economicamente mais viável do que a implantação da camada drenante por toda a plataforma da rodovia ou quando não for possível fazer a ligação da camada drenante aos eventuais drenos profundos.

O Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006) recomenda que o dimensionamento dos drenos providos de tubos perfurados seja feito através de nomograma apresentado na figura 4.7, que leva em consideração o diâmetro e inclinação do tubo, distância entre as saídas, largura do pavimento a ser drenado e índice de infiltração. Este índice de infiltração resulta do produto entre a intensidade de precipitação para chuva com 1 hora de duração e período de recorrência de 1 ano e da taxa de infiltração, considerada a partir de observações anteriores, sendo:

- para revestimentos betuminosos: 0,33 a 0,50;
- para revestimento de concreto de cimento: 0,50 a 0,67.

Figura 4.7 – Nomograma para Determinação da Seção de Vazão

Os drenos cegos são dimensionados a partir da fórmula de Darcy para escoamento de água em meios porosos, expressa por:

$$Q = k \cdot A \cdot I$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s);

k = coeficiente de condutividade hidráulica (m/s);

A = área de escoamento, normal à direção do fluxo (m^2);

I = gradiente hidráulico (m/m).

4.2.2 CAMADA DRENANTE

A camada drenante é aquela colocada logo abaixo do revestimento do pavimento, cuja granulometria é aberta o suficiente para torná-la permeável. É utilizada em pavimentos asfálticos e de concreto e serve para drenar as águas infiltradas para fora do pavimento.

O dimensionamento hidráulico da camada drenante pode ser feito de diversas formas. No Brasil, o DNIT recomenda o uso da Lei de Darcy, onde o fluxo de água que infiltra através da superfície do pavimento deve ser totalmente drenado através da camada drenante, sem perdas de volume ou acúmulo de água.

Entretanto, Cristopher, Zao e Hayden (2002) *apud* Pereira (2003) recomenda valores menos conservadores que admitem determinado acúmulo de águas em função da classe da rodovia. A saber:

- Classe Especial: o sistema de drenagem subsuperficial deve ser capaz de drenar 50% da água livre em menos de 1 hora;
- Rodovias de 1ª Classe: o sistema de drenagem subsuperficial deve ser capaz de drenar 50% da água livre em menos de 2 horas;
- Rodovias Secundárias: o sistema de drenagem subsuperficial deve ser capaz de drenar 50% da água livre em até 1 dia.

O dimensionamento da camada drenante deverá ser feito a partir de duas situações:

- Escolhido o material drenante a ser utilizado, em função de sua condutividade hidráulica, determinar a espessura da base para a drenagem da descarga considerada;
- Definida a espessura da base, determinar qual material apresenta condutividade hidráulica suficiente para drenar a descarga de projeto.

Em ambas as situações, é importante ressaltar que deve ser sempre definida em projeto a espessura da camada calculada acrescida de 2 centímetros, de modo a garantir a segurança do escoamento.

Na figura 4.8, apresentam-se esquematicamente pavimentos providos de camada drenante, em seções em aterro e em corte.

Figura 4.8 – Camada Drenante de Pavimento em Seções em Aterro e em Corte

5 CONSIDERAÇÕES REFERENTES AO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DOS ACOSTAMENTOS

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os projetos de pavimento dos acostamentos têm sido feitos com as mesmas metodologias empregadas nos projetos das pistas principais. A diferença destes projetos reside basicamente no volume de tráfego ao qual serão submetidos.

O pavimento dos acostamentos deve apresentar as seguintes características: dar suporte às camadas de revestimento, base e sub-base do pavimento da pista principal e garantir a continuidade das camadas drenantes da pista principal para o acostamento, retirando as águas do interior da estrutura do pavimento com rapidez. Para apresentar tais características, é importante que seja feita a escolha correta do tipo de pavimento do acostamento, tendo-se em vista a combinação com o tipo de pavimento da pista principal.

Também, deve-se procurar uma combinação de tipos de pavimentos da pista principal e acostamentos que garanta uma junta sempre selada, já que este é um dos maiores problemas de desempenho dos acostamentos segundo Hicks e Barksdale (FHWA, 1986).

Para embasar os estudos relativos à contribuição dos acostamentos na estrutura do pavimento da pista, serão apresentados a seguir os métodos de dimensionamento utilizados.

Também, visando tratar sobre o projeto específico de pavimento para acostamento, serão realizadas algumas considerações sobre o dimensionamento de suas estruturas.

5.2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

A seguir serão descritos os métodos de dimensionamento de pavimentos utilizados nas análises apresentadas nos capítulos posteriores.

5.2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

5.2.1.1 AASHTO (1993)

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis proposto pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 1993) foi obtido a partir das observações da Pista Experimental da AASHO, construída em Ottawa, Illinois, Estados Unidos, entre 1958 e 1960.

Este dimensionamento é baseado no desempenho do pavimento medido através da perda de serventia e considera como parâmetros o período de projeto, o tráfego, o desempenho do pavimento e a confiabilidade. Sua equação original, ou seja, válida para as condições da Pista Experimental, é apresentada a seguir:

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

Onde:

W_{18} = número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN para o período de projeto;

p_o = serventia inicial do pavimento;

p_t = serventia final do pavimento;

SN = número estrutural (*structural number*), que leva em conta a espessura, o coeficiente estrutural e a condição de drenagem de cada camada do pavimento. Ou seja:

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i$$

Onde:

a_i = coeficiente estrutural da camada i ;

D_i = espessura da camada i .

Para a utilização da equação de dimensionamento de pavimentos flexíveis do método da AASHTO para outras condições ambientais e de subleito e acrescentar confiabilidade ao tráfego previsto maior do que 50%, a equação foi modificada conforme apresentado a seguir:

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{p_o - p_t}{p_o - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log M_R - 8,07$$

Sendo:

Z_R = desvio normal padrão correspondente à confiabilidade do projeto em função da localização e classe funcional da via;

S_0 = desvio padrão combinado das variáveis envolvidas;

M_R = módulo resiliente do subleito (psi).

5.2.1.2 DNER

O método de dimensionamento de pavimento flexível do DNER foi proposto com base no método do Corpo dos Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e nas conclusões da Pista Experimental da AASHTO.

Este método considera o cálculo da espessura necessária de pavimento para proteger o subleito contra os efeitos do tráfego, em termos de base granular, cujo coeficiente estrutural é igual a 1,0. É expresso pela seguinte equação:

$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598}$$

Onde:

H_t = espessura total do pavimento em termos de base granular;

N = número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf;

CBR = valor do índice de suporte Califórnia do subleito.

A partir do valor calculado da espessura total, calculam-se as espessuras dos materiais escolhidos para o pavimento através dos coeficientes estruturais de cada material.

5.2.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS

5.2.2.1 AASHTO (1993)

O método de dimensionamento de pavimentos rígidos proposto pela AASHTO foi obtido juntamente com o método proposto para pavimentos flexíveis a partir das observações da Pista Experimental da AASHO (AASHTO, 1993).

Neste método a espessura é dimensionada com base nas equações empíricas modificadas posteriormente para reproduzir condições diferentes daquelas a que estava sujeita a Pista Experimental.

Da mesma forma que para os pavimentos flexíveis, a equação original de dimensionamento baseia-se no desempenho do pavimento medido através da perda de serventia e sua equação original é dada por:

$$\log W_{18} = 7,35 \log (D + 1) - 0,06 + \frac{\log \left[\frac{(4,5 - p_t)}{(4,5 - 1,5)} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{8,46}}}$$

Onde:

W_{18} = número de repetições do eixo simples padrão de 82 kN para o período de projeto;

p_t = serventia final do pavimento;

D = espessura da placa de concreto (in).

Para expandir o uso desta equação para o dimensionamento de pavimentos sujeitos a condições diferentes daquelas da Pista Experimental, a equação original recebeu modificações baseadas em experiências e teorias. Tais modificações consistiram na introdução de coeficiente de confiabilidade, coeficiente de drenagem, módulos de

elasticidade e de ruptura do concreto e módulo de reação do subleito e de coeficiente de transferência de carga. A seguir apresenta-se a equação modificada de dimensionamento:

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7,35 \log (D + 1) - 0,06 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{(4,5 - 1,5)} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 p_t) \log \left\{ \frac{S_c C_d (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0,25}} \right]} \right\}$$

Onde:

Z_R = desvio normal padrão correspondente à confiabilidade do projeto em função da localização e classe funcional da via;

S_0 = desvio padrão combinado das variáveis envolvidas;

S_c = módulo de ruptura médio do concreto de cimento portland;

C_d = coeficiente de drenagem;

J = coeficiente de transferência de carga através das juntas;

E_c = módulo de elasticidade do concreto (psi);

k = módulo de reação efetivo do sistema de fundação (psi).

Em 1998, a AASHTO propôs um suplemento para o dimensionamento de pavimentos rígidos que passa a levar em consideração, além da perda de serventia, a presença de base cimentada como componente estrutural, efeitos de gradientes térmicos diurnos e noturnos e ajuste do valor de k em função de diversas condições, tais como efeitos de borda. Ou seja, o método atual de dimensionamento leva em consideração seu modelo empírico anterior e modelos mecanicistas para cálculo de tensões em estruturas de concreto.

5.2.2.2 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA, 1984)

O método da PCA (1984) para determinação da espessura dos pavimentos de concreto é baseado nos critérios de falência da estrutura por fadiga e por erosão.

O critério de fadiga contempla a falência da estrutura por fadiga da placa de concreto, enquanto que o critério de erosão contempla a falência da estrutura devido ao bombeamento de finos (pumping), erosão da fundação e falência da junta.

- Critério de Fadiga

O processo de falência por fadiga na placa de concreto é baseado na tensão causada pelo carregamento aplicado na borda da placa adjacente ao acostamento, no ponto central entre as juntas transversais.

Este processo utiliza o conceito de dano cumulativo apresentado na Hipótese de Palmgreen-Miner e não considera tensões provenientes de torção e empenamento. Portanto, o índice de dano acumulado é dado por:

$$D_t = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$$

Onde:

D_t = índice de dano acumulado ao longo do período de projeto para todos os grupos de carregamento;

m = número total de grupos de carregamento;

n_i = número previsto de repetições para o i -ésimo grupo de carregamento;

N_i = número permitido de repetições para o i -ésimo grupo de carregamento. Este valor é função da relação entre as tensões na flexão e o módulo de ruptura do concreto.

Sendo assim, o dano acumulado no final do período de projeto deve ser menor do que 1,0.

- Critério de Erosão

Os fenômenos de erosão do pavimento são mais influenciados pela deflexão do que pelas tensões na flexão. Portanto, o ponto mais crítico de análise por este critério se dá no canto da placa.

O número permitido de repetições de carga é definido através das seguintes equações:

$$\log N = 14,524 - 6,777(C_1 P - 9,0)^{0,103}$$

Onde:

N = número permitido de repetições de carga baseado no PSI de 3,0.

C₁ = fator de ajuste, sendo igual a 1,0 para sub-bases não tratadas e 0,9 para sub-bases estabilizadas;

P = índice de trabalho ou força, definido por:

$$P = 268,7 \frac{p^2}{hk^{0,73}}$$

Onde:

p = pressão na fundação sob o canto da placa (psi);

h = espessura da placa (pol);

k = módulo de reação do subleito (pci).

Finalmente, o índice de dano por erosão, que deve ser menor do que 100%, é dado por:

$$E_t = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i}$$

Onde:

E_t = Índice de dano por erosão;

C_2 = coeficiente que leva em conta o acostamento, sendo igual a 0,06 para pavimentos sem acostamentos em concreto e 0,94 para pavimentos com acostamentos em concreto com barras de ligação.

5.3 CONSIDERAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DO PAVIMENTO DO ACOSTAMENTO

O número de solicitações a que o pavimento dos acostamentos será submetido consiste na maior diferença entre o seu projeto e o projeto do pavimento da faixa de rolamento.

Estudo realizado pelo FHWA (1986) sugere que sejam consideradas as seguintes solicitações:

- (i) veículos comerciais estacionados em casos de emergência;
- (ii) porcentagem de veículos comerciais da faixa de rolamento que invade o acostamento acidentalmente;
- (iii) transferência de carga de veículos comerciais quando estes trafegam mais próximos da borda da pista principal por não existir obstruções (principalmente nos casos de pista principal em pavimento rígido e acostamento em concreto asfáltico).

Portanto, recomendam-se neste estudo as seguintes porcentagens:

- 2,5% do tráfego de caminhões da pista principal;
- 3 a 5% do tráfego em termos de veículo padrão.

Semelhantemente, Huang (1993) classifica o tráfego sobre os acostamentos em três tipos:

- (i) porcentagem do tráfego da pista principal que invade acidentalmente o acostamento;
- (ii) veículos estacionados;
- (iii) tráfego regular (apenas quando permitido o uso do acostamento em horários de pico ou está previsto o uso como desvio).

Quando não há previsão de tráfego regular recomenda-se que na borda interna do acostamento seja considerada a somatória do tráfego dos veículos que invadem acidentalmente o acostamento e dos veículos estacionados e, na borda externa, apenas os veículos estacionados.

As porcentagens de tráfego de cada tipo considerado devem ser determinadas através de observações em pistas de semelhantes características geométricas, de tráfego e de topografia às da pista em projeto, obtendo-se:

$$P_i = \frac{N_i \cdot L_i}{N_o \cdot L_o} \cdot 100$$

Sendo:

P_i = porcentagem do tráfego da pista principal que invade o acostamento;

N_i = número total de invasões por dia;

L_i = comprimento médio de cada invasão;

N_o = número de aplicações de carga por dia na pista principal;

L_o = comprimento de observação.

$$P_p = \frac{N_p \cdot L_p}{N_o \cdot L_o} \cdot 100$$

Sendo:

P_p = porcentagem do tráfego da pista principal que estaciona sobre o acostamento;

N_p = número de veículos estacionados por dia;

L_i = comprimento médio percorrido para cada estacionamento;

N_o = número de aplicações de carga por dia na pista principal;

L_o = comprimento de observação.

Estudos de campo mostram que P_i varia em torno de 1% a 8% do volume de tráfego da pista principal e P_p varia em torno de 0,0005% a 0,02%, sendo este último muitas vezes desprezível.

No Brasil, o Manual de Pavimentação do DNER (1996) recomenda que para a escolha do revestimento do acostamento seja considerado 1% do tráfego da pista.

5.4 CRITÉRIOS EXISTENTES DE PROJETO DE ACOSTAMENTO

No Brasil, o DNIT (2006) recomenda que o projeto da estrutura dos acostamentos seja condicionado ao da pista, mantendo-se as camadas de reforço, sub-base e base constantes, de modo a garantir que a drenagem da estrutura do pavimento da pista tenha continuidade através do acostamento. Devem ser feitas reduções apenas na espessura do revestimento e, em caso de bases de alto custo, pode-se estudar solução diferente para a base do acostamento.

A solução de custo menos elevado para as bases dos acostamentos geralmente é a escolha de materiais utilizados para subbases granulares, porém com qualidade melhorada, tais como solos estabilizados por cimento, cal, etc.

Em 2001, o estado de Wisconsin, percebendo as deficiências de desempenho dos acostamentos asfálticos e os conseqüentes problemas de manutenção, iniciou uma pesquisa com o objetivo de desenvolver um manual para projeto, construção e manutenção dos acostamentos pavimentados (OWUSU-ABABIO; SCHMITT;

OSTHUS, 2003). Seu enfoque principal foi aumentar o desempenho dos acostamentos pavimentados adjacentes aos pavimentos em concreto.

Os fatores considerados na definição do tipo de pavimento a ser utilizado nos acostamentos adjacentes à pista principal revestida em concreto estão apresentados na tabela 5.1, sendo que das Agências pesquisadas, apenas Illinois restringe o uso ao concreto nos acostamentos adjacentes à pista principal em concreto.

As demais Agências utilizam diversos critérios, tais como a consideração dos custos de construção e manutenção, a classificação funcional e o volume de tráfego da rodovia ou, até mesmo, deixar esta decisão por conta do empreiteiro.

Tabela 5.1 – Critérios de Seleção do Tipo de Pavimento dos Acostamentos Adjacentes às Pistas Principais em Concreto dos Estados do Centro-Oeste dos Estados Unidos (continua)

Estado	Fatores Considerados na Definição do Tipo de Acostamento Adjacente à Pista Principal em Concreto	Critérios Especificados	
		Situação	Acostamento
ILLINOIS	-	<ul style="list-style-type: none"> Qualquer situação 	<ul style="list-style-type: none"> Concreto
INDIANA	<ul style="list-style-type: none"> Classificação Funcional Volume de Caminhões 	<ul style="list-style-type: none"> Rodovias Rurais de Alto Volume de Tráfego Expressas ou de Tráfego Livre (VDM > 20000) 	<ul style="list-style-type: none"> Revestimento betuminoso sobre base betuminosa e agregados compactados
		<ul style="list-style-type: none"> Rodovias Rurais de Médio Volume de Tráfego (5000<VDM<20000) ou de Alto Volume, mas não de Tráfego Livre 	<ul style="list-style-type: none"> Base betuminosa sobre base de agregados compactados
		<ul style="list-style-type: none"> Vias Urbanas de Alto e Médio Volumes de Tráfego 	<ul style="list-style-type: none"> Concreto
		<ul style="list-style-type: none"> Vias de Baixo Volume de Tráfego 	<ul style="list-style-type: none"> Base betuminosa sobre base de agregados compactados
IOWA	<ul style="list-style-type: none"> Classificação Funcional Volume de Caminhões 	<ul style="list-style-type: none"> Todas as Rodovias Interestaduais e Não Interestaduais com VDM>10000 	<ul style="list-style-type: none"> Pavimentados
		<ul style="list-style-type: none"> Acostamento sujeito ao tráfego durante o período de construção 	<ul style="list-style-type: none"> Espessura total em concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico
		<ul style="list-style-type: none"> Demais casos 	<ul style="list-style-type: none"> 8" (200mm) de concreto asfáltico ou 7" (175mm) de concreto de cimento Portland sobre camada granular

Tabela 5.1 – Critérios de Seleção do Tipo de Pavimento dos Acostamentos Adjacentes às Pistas Principais em Concreto dos Estados do Centro-Oeste dos Estados Unidos (conclusão)

Estado	Fatores Considerados na Definição do Tipo de Acostamento Adjacente à Pista Principal em Concreto	Critérios Especificados	
		Situação	Acostamento
MICHIGAN	<ul style="list-style-type: none"> • Classificação Funcional • Volume de Caminhões • Custos de Construção e Manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> • Rodovias de Tráfego Livre 	<ul style="list-style-type: none"> • Empreiteiro decide pelo emprego de concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico • Se for concreto de cimento Portland, o acostamento deverá apresentar barras de ligação na junta adjacente à pista principal
		<ul style="list-style-type: none"> • A espessura do acostamento é reduzida na borda em 3" (75mm) da espessura na interface com a pista principal • Para acostamentos em concreto de cimento Portland, a espessura mínima da placa na borda é de 7" (175mm) 	
MINNESOTA	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de Construção e Manutenção 	Alternativa de Menor Custo	
WISCONSIN	<ul style="list-style-type: none"> • Classificação Funcional • Volume de Caminhões • Custos de Construção e Manutenção • Experiência em construções e julgamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Todas as Rodovias Rurais Estaduais de Ligação 	<ul style="list-style-type: none"> • Pavimentados
		<ul style="list-style-type: none"> • Rodovias Rurais Estaduais de Ligação de Pista Simples com Duas Mãos de Direção e VDM>1250 	<ul style="list-style-type: none"> • 3ft (900mm) de concreto monilítico
		<ul style="list-style-type: none"> • Rodovias Rurais Estaduais de Ligação 4 Faixas e VDM>1250 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 ft (600mm) de concreto monolítico do lado direito
		<ul style="list-style-type: none"> • Rodovias Rurais Municipais com as condições de tráfego acima descritas 	<ul style="list-style-type: none"> • Devem seguir os critérios dos órgãos locais

A pesquisa realizada também procurou informações sobre o método utilizado para estimativa do tráfego de projeto sobre o acostamento, tipo de juntas e suas características, camadas de base e projeto das barras de ligação.

A tabela 5.2 indica que a determinação das espessuras varia de estado para estado, tanto para concreto como para asfalto. A espessura do acostamento de concreto varia desde o mínimo de 6" (150mm) até a espessura da placa de concreto da pista principal. A espessura mínima requerida para revestimento asfáltico é de 2" (50mm).

Alguns estados recomendam que a espessura do acostamento varie transversalmente, sendo reduzida em direção à borda externa.

Outro enfoque da pesquisa voltou-se para as características gerais das juntas transversais de retração e das barras de ligação utilizadas nos acostamentos.

Verificou-se que os acostamentos em pavimentos de concreto simples com barras de transferência são populares dentre os estados pesquisados. Apenas Michigan utiliza pavimentos de concreto armado além dos pavimentos de concreto simples com barras de transferência.

O espaçamento entre juntas varia de 15 ft (4,5m) até 20 ft (6m). As larguras e profundidades das juntas também variam, sendo que a maioria dos estados utiliza a profundidade da junta como sendo $\frac{1}{4}$ da espessura da placa de concreto. Quando utilizado pavimentos de concreto armado em Michigan, requer-se uma profundidade de 2" (50mm).

Tabela 5.2 - Práticas para Determinação da Espessura dos Pavimentos dos Acostamentos Adjacentes à Pista Principal em Concreto nos Estados do Centro-Oeste dos Estados Unidos

Estado	Acostamento em Concreto	Acostamento Asfáltico
ILLINOIS	<ul style="list-style-type: none"> • Período de Projeto de 20 anos: Mesma espessura da pista principal na interface, reduzindo em direção à borda até 6" (150mm) • Período de Projeto de 30 anos: Mesma espessura da pista principal 	<ul style="list-style-type: none"> • Não aplicável
INDIANA	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO • Mesma espessura da pista principal para rodovias com pelo menos 3×10^7 solicitações do eixo padrão 	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura mínima de 2" (50mm) de asfalto sobre base de agregado compactado para rodovias com menos de 3×10^7 solicitações do eixo padrão
IOWA	<ul style="list-style-type: none"> • Mesma espessura da pista principal se o acostamento for utilizado na fase de construção ou se será utilizado no futuro como faixa de rolamento • Caso contrário, espessura padrão de 7" (175mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesma espessura da pista principal se o acostamento for utilizado na fase de construção ou se será utilizado no futuro como faixa de rolamento • Caso contrário, espessura padrão de 8" (200mm)
MICHIGAN	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO • Mesma espessura da pista principal • Espessura padrão igual a espessura da pista principal na interface, reduzindo a espessura em direção a borda até o mínimo de 7" (175mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO • Espessura padrão de 5,5" (137,5mm) para rodovias
MINNESOTA	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura de 6" (150mm) de concreto com barras de ligação na junta adjacente com a pista principal sobre base granular 	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura de 3" (75mm) de asfalto sobre camada granular
WISCONSIN	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO (utilizando 2,5% do número de solicitações do eixo padrão considerado na pista principal) • Espessura mínima igual a 6" (150mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • AASHTO (utilizando 2,5% do número de solicitações do eixo padrão considerado na pista principal) • Espessura mínima igual a 2" (50mm)

Com relação às características de drenagem subsuperficial, as camadas de base sob os acostamentos adjacentes à pista principal com pavimento de concreto são predominantemente granulares. Entretanto, a espessura desta camada é variável de estado para estado, tendo uma espessura mínima de 4" (100mm) ou 6" (150mm) para acostamentos em concreto e 3" (75mm) para acostamentos asfálticos. Illinois declara utilizar asfalto ou bases de solo-cal adicionalmente aos materiais granulares.

Dois principais sistemas de drenagem subsuperficial são especificados:

- Trincheira com tubo envolvido por agregados e cobertos com manta geotêxtil;
- Trincheira com tubo envolvido por agregados, mas sem a manta geotêxtil.

Estes sistemas são necessários geralmente quando camadas de bases drenantes são utilizadas, conforme Wisconsin e Iowa. Tais sistemas interceptam e removem a água do interior do pavimento. A localização destes dispositivos em geral se dá na borda do pavimento da pista principal, na interface com o acostamento, em uma profundidade adequada para interceptar a água da camada de base granular e da junta longitudinal com o acostamento. Em Illinois, a prática existente é de localizar os drenos na borda do acostamento se a rodovia tiver um período de projeto de 30 anos, caso contrário, a localização se dá na borda da pista principal. Michigan localiza o sistema de drenagem subsuperficial a 2 ft (0,60m) de distância da interface da pista principal com o acostamento para vias sem guia e sarjeta, ou sob a guia e a sarjeta se especificado. O tubo mais comumente utilizado é o PVC corrugado.

6 DEFEITOS E AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS

6.1 PRINCIPAIS DEFEITOS RELACIONADOS AOS ACOSTAMENTOS

A seguir serão apresentados os defeitos de pavimentos tratados no presente estudo, geralmente causados pela ausência de acostamento ou por drenagem ineficiente.

6.1.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

6.1.1.1 TRINCAS COURO DE JACARÉ

Série de trincas interconectadas causadas pela fadiga do revestimento asfáltico ou da base estabilizada, sob a repetição do tráfego. É um indicador da falência estrutural. Este defeito causa irregularidade da superfície ao rolamento e ainda favorece a entrada de água no pavimento, sendo que seu progresso resulta em panelas. Uma das causas de sua ocorrência é a redução de suporte estrutural causado por drenagem ineficiente.

6.1.1.2 PANELAS OU BURACOS

As panelas ou buracos são cavidades formadas no revestimento que podem atingir toda a sua espessura, pois progridem com a ação do tráfego. Uma de suas principais causas é a ruptura da base associada à drenagem ineficiente.

As principais conseqüências deste defeito são as irregularidades que podem causar danos severos aos veículos e prejudicar a segurança viária, além da maior exposição do pavimento para infiltração de água.

6.1.1.3 BOMBEAMENTO DE FINOS

Caracteriza-se pela saída de água infiltrada no pavimento através de juntas, trincas ou porosidade excessiva da camada de concreto asfáltico. Junto com a água também são expulsos os materiais finos das camadas inferiores. Este defeito gera redução de resistência à derrapagem e redução da capacidade de suporte do pavimento. Uma das principais causas é a drenagem ineficiente que retém a água no interior da estrutura do pavimento, fazendo com que haja a expulsão dos materiais quando da passagem de carga.

6.1.1.4 AFUNDAMENTOS

Caracterizam-se pela deformação permanente denotada através de depressões na superfície do pavimento, acompanhadas ou não de solevamentos. Os afundamentos

podem ser originados por fluência plástica ou por consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento.

6.1.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS

6.1.2.1 BOMBEAMENTO DE FINOS

Expulsão de finos plásticos existentes no solo de fundação do pavimento através das juntas, bordas ou trincas do pavimento, sob a forma de lama fluida, quando da passagem das cargas solicitantes. É identificado no pavimento através de manchas terrosas ao longo das juntas, bordas ou trincas.

É causado por condições de drenagem ineficientes que ocasionam o acúmulo de água sob a placa. Esta água é expulsa através da passagem de carga, levando consigo os finos do solo de fundação, resultando em redução da capacidade de suporte devido ao descalçamento das placas, gerando trincas em toda a sua área, fissura de canto e escalonamento das juntas.

6.1.2.2 FISSURAS DE CANTO

Fissuras que interceptam as juntas a uma distância menor ou igual à metade do comprimento das bordas ou juntas do pavimento (longitudinal e transversal), atingindo toda a espessura da placa. Estas fissuras causam irregularidade da superfície ao rolamento, infiltração de umidade e desintegração da placa.

Geralmente são geradas por tensões excessivas no canto da placa causadas pela repetição do tráfego associada à perda de suporte por descalçamento das placas, transferência de carga ineficiente através da junta, tensões de empenamento.

6.1.2.3 ESCALONAMENTO DAS JUNTAS

Deslocamentos verticais diferenciados permanentes de uma placa em relação à adjacente, na região da junta. Geralmente é causado pelo efeito do bombeamento, porém pode ser causado por assentamento e empenamento. Estes escalonamentos geram irregularidade da superfície ao rolamento.

6.1.2.4 DESNÍVEL PAVIMENTO-ACOSTAMENTO

Degrau formado entre o acostamento e a borda do pavimento, geralmente acompanhado de uma separação dessas bordas. Da mesma forma do escalonamento das juntas, pode ser causado pelo efeito do bombeamento de finos e assentamento ou empenamento das placas. Porém, sua principal ocorrência se dá quando o tipo do pavimento do acostamento é diferente do tipo do pavimento da pista, pois ocorrem movimentações diferenciais entre as duas estruturas, produzindo o degrau ou a separação das bordas mencionadas.

6.1.3 DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

Serão apresentadas a seguir fotos evidenciando defeitos em pavimentos asfálticos e de concreto, relacionados à ausência ou deficiência de acostamentos.

6.1.3.1 DEFEITOS NA PISTA DEVIDOS À AUSÊNCIA DE ACOSTAMENTOS

Figura 6.1 - Trincamento e Panela em Pavimento Flexível

Figura 6.2 - Trincamento, Afundamento e Remendos em Pavimento Flexível

Figura 6.3 - Afundamento de Trilha de Roda e Trincamento em Pavimento Flexível

Figura 6.4 - Trincamento Couro de Jacaré em Pavimento Flexível

Os defeitos apresentados nas figuras 6.1 a 6.4 são causados basicamente por falta de proteção ao pavimento devido à ausência de acostamentos. Nestes casos a água que infiltra lateralmente à pista, migra horizontalmente para o interior da estrutura do pavimento, causando a redução da sua capacidade de suporte. Esta deficiência estrutural provoca a ruptura precoce do revestimento por fadiga, favorecendo ainda mais a entrada de água no pavimento, ocasionando bombeamento e formação de panelas.

Em todas as fotografias apresentadas nota-se a presença de vegetação adjacente, que impede o rápido escoamento superficial das águas precipitadas para fora da pista. Durante a chuva, esta vegetação retém a lâmina d'água por mais tempo sobre o pavimento, favorecendo a infiltração de água pela sua borda do pavimento e ainda prejudicando as condições de segurança viária.

Na foto 6.2 verifica-se a má condição de drenagem superficial causada também pela ausência de sarjeta de pé de corte que seria necessária para conduzir o volume intenso de águas superficiais que escoam pelos taludes. Ainda, possivelmente não foram implantados os drenos profundos que seriam necessários para rebaixamento do lençol freático, visto que o pavimento encontra-se já remendado e com novos

afundamentos denunciando sua incapacidade estrutural causada pelo encharcamento de suas camadas.

6.1.3.2 DEFEITOS NO ACOSTAMENTO

Figura 6.5 - Degrau, Trincas e Afundamentos em Acostamento Flexível Adjacente à Pavimento Flexível

Figura 6.6 - Abertura e Formação de Degrau na Junta Longitudinal em Acostamento Flexível Adjacente à Pavimento Rígido

A figura 6.5 mostra a situação de acostamento flexível adjacente ao pavimento flexível, onde os defeitos no acostamento são oriundos de sua baixa capacidade de suporte em vista do tráfego solicitante. Ainda, a baixa declividade transversal do acostamento e a ausência de drenagem superficial adequada, já que não há sarjeta de corte, propiciam o acúmulo de detritos e a formação de poças nas bordas, favorecendo a infiltração de água na sua estrutura, o que reduz ainda mais a sua capacidade de suporte.

Já na figura 6.6, onde há acostamento flexível adjacente ao pavimento rígido verifica-se a abertura na junta longitudinal entre a pista e o acostamento devida à movimentação diferencial destas duas estruturas. Esta abertura da junta aumenta a infiltração de água na estrutura do pavimento, reduzindo sua capacidade de suporte, causando afundamento. Ainda, devido à inexistência de camada drenante ou dreno subsuperficial no pavimento de concreto, a água infiltrada pela sua junta transversal, migra até a junta longitudinal com o acostamento, aumentando os defeitos nesta região. Este fenômeno poderia também causar bombeamento de finos da base do pavimento rígido, descalçando suas placas, o que resultaria em trincas de canto.

6.1.3.3 DEFEITOS DEVIDOS AO USO DOS ACOSTAMENTOS COMO FAIXA ADICIONAL

Figura 6.7 - Trincamento e Formação de Painéis na Faixa Adicional e Degrau na Junta Longitudinal Entre a Pista e a Faixa Adicional

Figura 6.8 - Degrau e Afundamentos em Acostamento Flexível Adjacente à Pavimento Flexível

Evidencia-se nas figuras 6.7 e 6.8 o uso dos acostamentos como faixa adicional. Os defeitos apresentados denotam que os pavimentos dos acostamentos não apresentam estrutura adequada para suportar as cargas do tráfego e, provavelmente, tiveram apenas um aumento de espessura no revestimento.

A falta de capacidade de suporte, em presença do tráfego de veículos pesados, resulta rapidamente em defeitos como os apresentados.

6.2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS ATRAVÉS DO ÍNDICE DE QUALIDADE FINAL (IQF)

O Índice de Qualidade Final foi proposto para o Sistema de Gerência de Pavimentos do Departamento de Estradas de Rodagem, com o objetivo de classificar qualitativamente um conjunto de pavimentos de determinada malha viária. Sua escala possui cinco níveis de classificação, variando de ótimo a péssimo. Esta classificação é feita com base no levantamento de parâmetros para avaliação das condições funcionais e estruturais do pavimento, expressas através da Irregularidade Longitudinal (IRI), do Índice de Defeitos de Superfície (IDS) e da Deflexão Máxima (D_0).

Cada condição funcional ou estrutural também foi classificada em cinco níveis, atribuindo-se conceitos variando de A até E, representativos aos estados do pavimento de ótimo a péssimo, em relação ao parâmetro avaliado.

A seguir serão apresentados os parâmetros de avaliação mencionados e a metodologia de cálculo do Índice de Qualidade Final (IQF).

6.2.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)

A Irregularidade Longitudinal (IRI – *International Roughness Index*) consiste em um parâmetro representativo do perfil da superfície do pavimento. Correlaciona-se à qualidade e conforto ao rolamento e, conseqüentemente, aos componentes dos custos operacionais dos veículos. É expressa em m/km ou mm/m.

A tabela 6.1 apresenta a classificação do estado do pavimento para o cálculo do Índice de Qualidade Final em função dos valores obtidos de IRI.

Tabela 6.1 – Classificação do estado do pavimento em função dos valores de IRI

IRI (mm/m)	ESTADO	CONCEITO
$IRI \leq 2,0$	ÓTIMO	A
$2,0 < IRI \leq 3,5$	BOM	B
$3,5 < IRI \leq 5,0$	REGULAR	C
$5,0 < IRI \leq 6,5$	RUIM	D
$IRI > 6,5$	PÉSSIMO	E

6.2.2 ÍNDICE DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE (IDS)

O Índice de Defeitos de Superfície reflete o estado das condições de superfície do pavimento em termos de frequência e severidade das patologias encontradas durante o inventário no campo, efetuado pelo Levantamento Visual Contínuo (LVC), normalizado na Instrução de Projeto do DER/SP, IP-DE-P00-004 (DER, 2006).

O cálculo do Índice de Defeito de Superfície (IDS) é determinado pelo somatório da ponderação das frequências e pesos dos defeitos individuais obtidos no levantamento, utilizando-se a equação apresentada a seguir.

$$IDS = \sum (F_i \times P_i) + \sum (N_j \times P_j)$$

Onde:

- Fi - Frequência individual dos seguintes defeitos: trincamento, afundamento, desgaste, ondulação e exsudação;
- Pi - Severidade individual dos seguintes defeitos: trincamento, afundamento, desgaste, ondulação e exsudação;
- Nj - Número de ocorrências individual dos seguintes defeitos: panelas e remendos;
- Pj - Severidade individual dos seguintes defeitos: panelas e remendos.

Com relação ao trincamento, deve-se considerar somente o tipo (TR, TB ou TJ) cujo produto entre a frequência e a severidade implicar em maior valor na somatória para a determinação do IDS.

Este índice classifica a condição da superfície em 5 condições do pavimento, com valores variando de 0, caracterizando o pavimento sem defeitos, até 1000, representativo do pavimento com todos os tipos de defeitos na máxima frequência e severidade.

Para o cálculo do Índice de Qualidade Final (IQF), cada uma destas condições recebeu um conceito, conforme apresenta a tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Classificação do estado do pavimento em função dos valores de IDS

IDS	ESTADO	CONCEITO
$IDS \leq 65$	ÓTIMO	A
$65 < IDS \leq 160$	BOM	B
$160 < IDS \leq 300$	REGULAR	C
$300 < IDS \leq 530$	RUIM	D
$IDS > 530$	PÉSSIMO	E

6.2.3 DEFLEXÃO MÁXIMA (D_0)

A deflexão recuperável máxima (D_0) representa o comportamento global do pavimento em termos de capacidade estrutural e deslocamento vertical da superfície, em resposta à solicitação da carga equivalente ao eixo padrão de 8,2 tf.

Esta deflexão indica tanto as condições do subleito como o estado e características mecânicas dos materiais constituintes do pavimento. É expressa em 10^{-2} mm .

Com o intuito de efetuar o cálculo do Índice de Qualidade Final, os valores de deflexão máxima (D_0) foram separados em cinco classes representativas do estado estrutural do pavimento, conforme apresentado na tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Classificação do estado do pavimento em função dos valores de D_0

D_0 (10^{-2} mm)	ESTADO	CONCEITO
$D_0 \leq 30$	ÓTIMO	A
$30 < D_0 \leq 45$	BOM	B
$45 < D_0 \leq 90$	REGULAR	C
$90 < D_0 \leq 150$	RUIM	D
$D_0 > 150$	PÉSSIMO	E

6.2.4 ÍNDICE DE QUALIDADE FINAL (IQF)

O Índice de Qualidade Final (IQF) é determinado através da ponderação das notas obtidas pelos parâmetros de avaliação funcional e estrutural supra citados.

Estas notas são calculadas através da aplicação de pesos em função do estado do pavimento em relação a cada parâmetro.

Ou seja, para cada parâmetro de avaliação do pavimento levantado em toda a extensão da malha em análise, verifica-se qual porcentagem da extensão recebeu

cada conceito, de A até E. Os pesos definidos para cada conceito estão apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Pesos atribuídos aos conceitos obtidos pelo pavimento

CONCEITO	ESTADO	PESO
A	ÓTIMO	5
B	BOM	4
C	REGULAR	3
D	RUIM	2
E	PÉSSIMO	1

Portanto, as notas de cada parâmetro de avaliação funcional e estrutural são obtidas através da eq. (2):

$$N_{\text{PARÂMETRO}} = 5 \cdot (\%A) + 4 \cdot (\%B) + 3 \cdot (\%C) + 2 \cdot (\%D) + 1 \cdot (\%E) \quad (2)$$

Onde:

$N_{\text{PARÂMETRO}}$ = nota atribuída ao parâmetro de avaliação da condição estrutural ou funcional do pavimento de toda a malha considerada, sendo N_{IRI} , N_{IDS} e N_{Do} ;

(%A) = Porcentagem da extensão da malha cujo pavimento apresenta condição estrutural ou funcional em estado ótimo em relação à extensão total da malha;

(%B) = Porcentagem da extensão da malha cujo pavimento apresenta condição estrutural ou funcional em estado bom em relação à extensão total da malha;

(%C) = Porcentagem da extensão da malha cujo pavimento apresenta condição estrutural ou funcional em estado regular em relação à extensão total da malha;

(%D) = Porcentagem da extensão da malha cujo pavimento apresenta condição estrutural ou funcional em estado ruim em relação à extensão total da malha;

(%E) = Porcentagem da extensão da malha cujo pavimento apresenta condição estrutural ou funcional em estado péssimo em relação à extensão total da malha.

Estabelecidas as notas de cada parâmetro, calcula-se o Índice de Qualidade Final (IQF) através da ponderação das mesmas com os seguintes pesos:

Tabela 6.5 – Pesos atribuídos às notas de cada parâmetro de avaliação

NOTA	PESO
N_{IRI}	1
N_{IDS}	2
N_{D_0}	3

Portanto, o Índice de Qualidade Final (IQF) atribuído para a malha considerada é dado pela eq. (3):

$$IQF = \frac{1 \cdot N_{IRI} + 2 \cdot N_{IDS} + 3 \cdot N_{D_0}}{6} \quad (3)$$

Assim sendo, o Índice de Qualidade Final (IQF) correlaciona-se com a qualidade do pavimento conforme apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Correlação entre o IQF e a qualidade do pavimento da malha analisada

IQF	QUALIDADE
0 – 1	PÉSSIMO
1 – 2	RUIM
2 – 3	REGULAR
3 – 4	BOM
4 – 5	ÓTIMO

7 INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA VIA E NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

O presente capítulo tratará das análises realizadas com o objetivo de mensurar a influência do acostamento, tanto nas condições operacionais da via, quanto no desempenho dos pavimentos.

Também, apresentará uma análise de custo efetuada com o objetivo de determinar o tráfego a ser considerado para o dimensionamento do pavimento dos acostamentos.

Tais análises embasaram a proposição do Fluxograma para Projetos de Acostamentos, apresentado no próximo capítulo, cujo objetivo é orientar a decisão de implantar ou não acostamentos e ainda fornecer as recomendações a serem seguidas em ambos os casos.

7.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA RODOVIA

Com o objetivo de verificar a influência da restrição de largura do acostamento nas condições operacionais das rodovias, foram realizados dois estudos apresentados a seguir.

O primeiro estudo visou mensurar a perda de capacidade viária em função da redução das larguras de faixa e acostamento. O segundo estudo teve como foco verificar o aumento do índice de acidentes em função da redução das larguras de faixa e acostamento.

7.1.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NA CAPACIDADE DA VIA

Conforme exposto anteriormente no capítulo 3, o Manual de Capacidade Viária (HCM, 2000) considera que reduções da largura da faixa de rolamento, assim como da largura do acostamento em relação às larguras estabelecidas na condição base, impõem redução da capacidade da via.

Com o objetivo de mensurar a influência exercida pela redução ou até mesmo supressão do acostamento sobre a capacidade da via, apresenta-se a figura 7.1 que define os valores de capacidade da via em função da largura do acostamento, para diferentes larguras de faixa de rolamento. Para esta análise foi considerada a densidade da via para o nível de serviço D estabelecida no HCM, visto que este é o nível de serviço que tem sido estabelecido para projetos das rodovias do Estado de São Paulo (DER/SP) e sob concessões particulares. Foi considerada rodovia de múltiplas faixas e velocidade de fluxo livre (VFL) igual a 100 km/h.

Figura 7.1 – Variação da capacidade em função das larguras da faixa de rolamento e do acostamento

Desta análise, verifica-se que para todas as larguras de faixa de rolamento estudadas, a supressão dos acostamentos reduz a capacidade da via em 7%. Ainda, constata-se que para a condição de faixa mais estreita considerada no estudo, a ausência de acostamento acarreta a perda de 15% da capacidade máxima da via.

O gráfico apresentado na figura 7.1 evidencia também que a capacidade viária é mais sensível à redução da largura do acostamento para larguras inferiores a 0,60m.

Assim sendo, para a tomada de decisão sobre a implantação de acostamento, recomenda-se que sempre seja feita a avaliação da perda de capacidade viária em função das necessidades do tráfego ao longo da vida útil de projeto, procurando-se evitar a implantação de faixas adicionais e duplicações.

7.1.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ACOSTAMENTO NO ÍNDICE DE ACIDENTES

De acordo com a eq. (1) que representa o modelo de previsão de acidentes proposto por Zegeer e Deacon (1987), apresentada no capítulo 3, foi realizada a análise da influência de acostamentos nos índices de acidentes esperados para determinada rodovia.

Para tanto, foram calculados os Índices de Acidentes para rodovias com faixas de rolamento com larguras de 3,60m, 3,30m e 3,00m, variando-se a largura do acostamento desde o valor considerado ideal (1,80m) até a situação sem acostamento, conforme figura 7.2.

Figura 7.2 – Variação do índice de acidentes em função das larguras da faixa de rolamento e do acostamento

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o acostamento exerce influência significativa nos índices de acidentes previstos, aumentando em torno de 18%, 23% e 28% os índices de acidentes para rodovias com faixa de rolamento com 3,60m, 3,30m e 3,00m de largura, respectivamente, quando comparadas as situações: i) acostamento com largura de 1,80m; ii) sem acostamento.

Entretanto, ressalta-se que esta análise deve ser realizada em caráter orientativo, não sendo aplicável a todas as situações, visto que a presença de acostamentos aumentam o afastamento dos veículos das obstruções laterais, conferindo aos motoristas maior sensação de segurança e conseqüente aumento da velocidade, podendo aumentar o número de acidentes em relação às rodovias sem acostamento.

7.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS

Neste capítulo será analisado o desempenho de pavimentos tendo em vista os efeitos dos acostamentos, através da análise de pavimentos existentes e de modelos de dimensionamento.

As análises dos pavimentos existentes apontam para um pior desempenho dos segmentos sem acostamentos. Para justificar esta constatação, foram então verificados os desempenhos dos pavimentos através de modelos.

7.2.1 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS EXISTENTES

Para o estudo foi selecionada a malha rodoviária da Divisão Regional de Itapetininga do DER/SP (DR-2).

Através do banco de dados do Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP-DER/SP) foram obtidas as informações sobre as condições dos pavimentos existentes da referida malha, cujos levantamentos foram efetuados no primeiro semestre de 2005. Estas informações foram ordenadas de modo a considerar a malha total da regional em estudo em duas submalhas:

- submalha constituída por rodovias com acostamento;
- submalha constituída por rodovias sem acostamento.

Esta análise possibilitará o cálculo do Índice de Qualidade Final (IQF) para as duas submalhas, resultando na comparação entre o desempenho dos pavimentos de rodovias com e sem acostamento. A seguir apresentam-se os levantamentos e cálculos efetuados.

7.2.1.1 LEVANTAMENTOS DAS CONDIÇÕES FUNCIONAIS E ESTRUTURAIS DOS PAVIMENTOS

7.2.1.1.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)

Figura 7.3 – Distribuição dos segmentos de pavimentos da malha rodoviária do DR-2 segundo o conceito obtido na avaliação do IRI, para as situações com e sem acostamento

7.2.1.1.2 ÍNDICE DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE (IDS)

Figura 7.4 – Distribuição dos segmentos de pavimentos da malha rodoviária do DR-2 segundo o conceito obtido na avaliação do IDS, para as situações com e sem acostamento

7.2.1.1.3 DEFLEXÃO MÁXIMA (D₀)

Figura 7.5 – Distribuição dos segmentos de pavimentos da malha rodoviária do DR-2 segundo o conceito obtido na avaliação do D₀, para as situações com e sem acostamento

7.2.1.2 CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE FINAL (IQF)

7.2.1.2.1 SUBMALHA COM ACOSTAMENTOS

De acordo com a eq. (2) calculam-se as notas de cada conceito funcional e estrutural:

$$N_{IRI} = 5 \cdot (0,23) + 4 \cdot (0,19) + 3 \cdot (0,34) + 2 \cdot (0,19) + 1 \cdot (0,04) = 3,35$$

$$N_{IDS} = 5 \cdot (0,24) + 4 \cdot (0,38) + 3 \cdot (0,29) + 2 \cdot (0,09) + 1 \cdot (0) = 3,77$$

$$N_{D_0} = 5 \cdot (0,35) + 4 \cdot (0,05) + 3 \cdot (0,36) + 2 \cdot (0,20) + 1 \cdot (0,04) = 3,47$$

A partir da eq. (3) determina-se o Índice de Qualidade Final (IQF) para a malha considerada:

$$IQF_{\text{com acost}} = \frac{1 \cdot 3,35 + 2 \cdot 3,77 + 3 \cdot 3,47}{6} = 3,55$$

7.2.1.2.2 SUBMALHA SEM ACOSTAMENTOS

De acordo com a eq. (2), calculam-se as notas de cada conceito funcional e estrutural:

$$N_{IRI} = 5 \cdot (0,13) + 4 \cdot (0,35) + 3 \cdot (0,32) + 2 \cdot (0,13) + 1 \cdot (0,06) = 3,33$$

$$N_{IDS} = 5 \cdot (0,09) + 4 \cdot (0,28) + 3 \cdot (0,49) + 2 \cdot (0,14) + 1 \cdot (0) = 3,32$$

$$N_{D_0} = 5 \cdot (0,10) + 4 \cdot (0,08) + 3 \cdot (0,33) + 2 \cdot (0,33) + 1 \cdot (0,16) = 2,63$$

A partir da eq. (3) determina-se o Índice de Qualidade Final (IQF) para a malha considerada:

$$IQF_{\text{sem acost}} = \frac{1 \cdot 3,33 + 2 \cdot 3,32 + 3 \cdot 2,63}{6} = 2,98$$

7.2.1.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base na análise dos pavimentos existentes na malha rodoviária pertencente à Divisão Regional de Itapetininga (DR-2) do DER/SP verifica-se que os segmentos desprovidos de acostamentos apresentam qualidade inferior (IQF=2,98) a daqueles dotados destes dispositivos (IQF=3,55). Constata-se também que a condição estrutural, representada pela deflexão máxima (D_0), é mais prejudicada quando da ausência de acostamentos.

Portanto, a presença de acostamentos adjacentes aos pavimentos contribui para a melhoria do desempenho destes, devendo ser levada em conta através de análise de custos de manutenção ao longo da sua vida útil.

7.2.2 ESTIMATIVAS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ATRAVÉS DE MODELOS

Os métodos de dimensionamento de pavimentos, direta ou indiretamente, levam em consideração a influência da presença e tipo de acostamentos, seja por sua contribuição às condições de drenagem ou de transferências de carga. Em linhas gerais, estes métodos consideram que a presença de acostamentos melhora o desempenho dos pavimentos das pistas adjacentes.

Para evidenciar tal fato, serão apresentados os seguintes estudos:

- Estimativa da vida útil de pavimentos rígidos e flexíveis;
- Análise da estrutura de pavimento rígido necessária para a pista em função do tipo de acostamento adotado:
 - Através do cálculo da espessura do pavimento;
 - Através das tensões atuantes nas placas de concreto da pista em virtude das cargas oriundas do tráfego.

7.2.2.1 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS

7.2.2.1.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL

Efetuuou-se a estimativa de vida útil para três estruturas de pavimento flexível, através do método da AASHTO (1993), de modo a contemplar situações de baixo, médio e alto tráfegos. Para cada uma das estruturas foram consideradas três condições de drenagem, conforme tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Coeficientes de drenagem utilizados na análise

Condição de Drenagem	Coeficiente Utilizado
Sem consideração dos efeitos da drenagem	1,00
Péssima	0,40
Excelente	1,40

As tabelas 7.2, 7.3 e 7.4 a seguir, apresentam as estruturas consideradas na análise e os seus números estruturais (SN) calculados para as três condições de drenagem em estudo.

Tabela 7.2 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil e valores do número estrutural (SN) para as condições de drenagem consideradas – 1ª Estrutura (Baixo Tráfego)

D _i (cm)	D _i (pol)	a _i	D _i x a _i	m _i		
				0,4	1	1,4
5,00	1,97	0,44	0,87	0,87	0,87	0,87
15,00	5,91	0,13	0,77	0,31	0,77	1,07
15,00	5,91	0,11	0,65	0,26	0,65	0,91
SN			2,28	1,43	2,28	2,85

Tabela 7.3 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil e valores do número estrutural (SN) para as condições de drenagem consideradas – 2ª Estrutura (Médio Tráfego)

D _i (cm)	D _i (pol)	a _i	D _i x a _i	m _i		
				0,4	1	1,4
10,00	3,94	0,44	1,73	1,73	1,73	1,73
18,00	7,09	0,13	0,92	0,37	0,92	1,29
20,00	7,87	0,11	0,87	0,35	0,87	1,21
SN			3,52	2,45	3,52	4,23

Tabela 7.4 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil e valores do número estrutural (SN) para as condições de drenagem consideradas – 3ª Estrutura (Alto Tráfego)

D _i (cm)	D _i (pol)	a _i	D _i x a _i	m _i		
				0,4	1	1,4
15,00	5,91	0,44	2,60	2,60	2,60	2,60
20,00	7,87	0,13	1,02	0,41	1,02	1,43
30,00	11,81	0,11	1,30	0,52	1,30	1,82
SN			4,92	3,53	4,92	5,85

Ressalta-se que o coeficiente de drenagem (m_i) foi aplicado apenas às camadas granulares, pois a camada de revestimento do pavimento não deve ser considerada drenante.

Assim sendo, com base nos números estruturais calculados e na equação de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO (1993), foram realizados os seguintes procedimentos:

- Para cada estrutura e coeficiente de drenagem variou-se a perda de serventia (Δ PSI) de 0,2 em 0,2, dentro do intervalo de 0 a 2,2, admitindo-se, portanto, a serventia final igual a 2,0.
- Obteve-se o número de solicitações em cada valor do índice de serventia estipulado e para cada condição de drenagem
- Os parâmetros considerados para os cálculos dos números de solicitações foram:
 - $Z_r = -1,037$ (para $R=85\%$)
 - $S_0 = 0,45$
 - $p_t = 2,0$
 - $\Delta\text{PSI} = 2,2$
 - $M_R = 7000$ psi

Os resultados estão apresentados na tabela 7.5 e na figura 7.6.

Tabela 7.5 - Número de solicitações calculado para cada estrutura analisada, em função do PSI e do coeficiente de drenagem

Coeficiente de Drenagem	Δ PSI	PSI	W_{18}		
			Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3
$m_i = 0,4$	0,00	4,2	0	0	0
	0,20	4,00	4,94E+03	4,98E+04	9,20E+04
	0,40	3,80	5,25E+03	6,85E+04	2,12E+05
	0,60	3,60	5,44E+03	8,26E+04	3,45E+05
	0,80	3,40	5,58E+03	9,43E+04	4,89E+05
	1,00	3,20	5,69E+03	1,04E+05	6,39E+05
	1,20	3,00	5,78E+03	1,14E+05	7,96E+05
	1,40	2,80	5,86E+03	1,22E+05	9,58E+05
	1,60	2,60	5,93E+03	1,30E+05	1,13E+06
	1,80	2,40	5,99E+03	1,37E+05	1,30E+06
	2,00	2,20	6,05E+03	1,44E+05	1,47E+06
	2,20	2,00	6,10E+03	1,50E+05	1,65E+06
$m_i = 1,0$	0,00	4,2	0	0	0
	0,20	4,00	3,92E+04	9,18E+04	1,53E+05
	0,40	3,80	5,07E+04	2,11E+05	6,00E+05
	0,60	3,60	5,90E+04	3,42E+05	1,33E+06
	0,80	3,40	6,56E+04	4,83E+05	2,35E+06
	1,00	3,20	7,12E+04	6,31E+05	3,65E+06
	1,20	3,00	7,62E+04	7,84E+05	5,23E+06
	1,40	2,80	8,07E+04	9,43E+05	7,09E+06
	1,60	2,60	8,48E+04	1,11E+06	9,23E+06
	1,80	2,40	8,86E+04	1,27E+06	1,16E+07
	2,00	2,20	9,21E+04	1,45E+06	1,43E+07
	2,20	2,00	9,54E+04	1,62E+06	1,73E+07
$m_i = 1,4$	0,00	4,2	0	0	0
	0,20	4,00	7,20E+04	1,09E+05	3,13E+05
	0,40	3,80	1,18E+05	3,44E+05	1,46E+06
	0,60	3,60	1,58E+05	6,73E+05	3,59E+06
	0,80	3,40	1,94E+05	1,08E+06	6,81E+06
	1,00	3,20	2,27E+05	1,57E+06	1,12E+07
	1,20	3,00	2,59E+05	2,12E+06	1,67E+07
	1,40	2,80	2,89E+05	2,74E+06	2,36E+07
	1,60	2,60	3,17E+05	3,41E+06	3,17E+07
	1,80	2,40	3,45E+05	4,15E+06	4,12E+07
	2,00	2,20	3,72E+05	4,94E+06	5,21E+07
	2,20	2,00	3,98E+05	5,78E+06	6,43E+07

Figura 7.6 – Gráfico da variação da serventia em função do número de solicitações calculado para as estruturas analisadas nas condições de drenagem consideradas

De acordo com os resultados obtidos, evidencia-se através do gráfico que as condições de drenagem a que os pavimentos estão submetidos exercem grande influência na sua vida útil.

Outra análise desenvolvida foi através da consideração dos números de solicitações obtidos para serventia final igual a 2,0 e coeficiente de drenagem igual a 1, como sendo o valor projetado para o período de vida útil de 10 anos e, a partir daí, pôde-se mensurar a influência da variação do coeficiente de drenagem na vida útil do projeto. A tabela 7.6 e a figura 7.7 a seguir apresentam esta análise.

Tabela 7.6 – Relação entre a vida útil de projeto para as condições de drenagem péssima e excelente em relação à vida útil de projeto para coeficiente de drenagem igual a 1,0

Coeficiente de Drenagem	Δ PSI	PSI	Vida Útil _{mi=X,X} / Vida Útil _{mi=1,0} (anos)		
			Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3
$m_i = 0,4$	0,00	4,2	0,00	0,00	0,00
	0,20	4,00	0,52	0,31	0,05
	0,40	3,80	0,55	0,42	0,12
	0,60	3,60	0,57	0,51	0,20
	0,80	3,40	0,58	0,58	0,28
	1,00	3,20	0,60	0,64	0,37
	1,20	3,00	0,61	0,70	0,46
	1,40	2,80	0,61	0,75	0,55
	1,60	2,60	0,62	0,80	0,65
	1,80	2,40	0,63	0,85	0,75
	2,00	2,20	0,63	0,89	0,85
	2,20	2,00	0,64	0,93	0,95
$m_i = 1,0$	0,00	4,2	0,00	0,00	0,00
	0,20	4,00	4,11	0,57	0,09
	0,40	3,80	5,31	1,30	0,35
	0,60	3,60	6,18	2,11	0,77
	0,80	3,40	6,88	2,98	1,36
	1,00	3,20	7,46	3,90	2,11
	1,20	3,00	7,99	4,84	3,02
	1,40	2,80	8,46	5,82	4,10
	1,60	2,60	8,89	6,85	5,34
	1,80	2,40	9,29	7,84	6,71
	2,00	2,20	9,65	8,95	8,27
	2,20	2,00	10,00	10,00	10,00
$m_i = 1,4$	0,00	4,2	0,00	0,00	0,00
	0,20	4,00	7,55	0,67	0,18
	0,40	3,80	12,37	2,12	0,84
	0,60	3,60	16,56	4,15	2,08
	0,80	3,40	20,34	6,67	3,94
	1,00	3,20	23,79	9,69	6,47
	1,20	3,00	27,15	13,09	9,65
	1,40	2,80	30,29	16,91	13,64
	1,60	2,60	33,23	21,05	18,32
	1,80	2,40	36,16	25,62	23,82
	2,00	2,20	38,99	30,49	30,12
	2,20	2,00	41,72	35,68	37,17

Figura 7.7 – Gráfico da variação da vida útil do pavimento em função da condição de drenagem

Tabela 7.7 – Quadro resumo da variação da vida útil do pavimento considerando-se os efeitos da drenagem em relação à vida útil para $m_i=1,0$

Estrutura	Solicitações			Variação da Vida Útil Considerando-se Efeitos da Drenagem em Relação a $m_i=1,0$	
	$m_i=1,0$	$m_i=0,4$	$m_i=1,4$	$m_i=0,4$	$m_i=1,4$
1	9,54E+04	6,10E+03	3,98E+05	6%	417%
2	1,62E+06	1,50E+05	5,78E+06	9%	357%
3	1,73E+07	1,65E+06	6,43E+07	10%	372%

A partir da análise deste gráfico, verifica-se que a pior condição de drenagem ($m_i=0,4$) diminui a vida útil do pavimento em média para 8% em relação à expectativa de projeto ($m_i=1,0$).

Por outro lado, ao considerar uma excelente condição de drenagem ($m_i=1,4$), a vida útil do pavimento aumentaria em cerca de 400%, caso não ocorressem outros problemas, tais como ação de intempéries e cargas não previstas na época do projeto, após cerca de 20 anos de sua vida.

Assim sendo, avaliando-se apenas a influência da drenagem, verifica-se que, em situações extremas, pode ocorrer um aumento da vida útil do pavimento da ordem de 40 vezes para estruturas médias e pesadas, e de 65 vezes para estruturas mais delgadas.

7.2.2.1.2 PAVIMENTO RÍGIDO

Semelhantemente ao estudo anterior, efetuou-se a estimativa de vida útil para duas estruturas de pavimento rígido, através do método da AASHTO (1993), de modo a contemplar situações de médio e alto tráfegos. Para cada uma das estruturas foram consideradas as seguintes situações:

- Presença de acostamento de concreto;
- Presença de acostamento asfáltico;
- Ausência de acostamento.

Estas condições são representadas na equação de dimensionamento através do coeficiente de transferência de carga, J , tendo sido adotados os valores apresentados na tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Coeficientes de transferência de carga (J) utilizados na análise

Acostamento	J
Concreto	2,50
Asfáltico	3,20
Sem Acostamento	4,00

As tabelas 7.9 e 7.10 apresentam as estruturas consideradas na análise.

Tabela 7.9 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil – 1ª Estrutura (Médio Tráfego)

Camada	Espessura (cm)
Concreto de Cimento Portland	20
Concreto Compactado a Rolo	10
Brita Graduada Simples	15

Tabela 7.10 - Estrutura utilizada na estimativa de vida útil – 2ª Estrutura (Alto Tráfego)

Camada	Espessura (cm)
Concreto de Cimento Portland	24
Concreto Compactado a Rolo	10
Brita Graduada Simples	15

Com base nas estruturas consideradas e na equação de dimensionamento de pavimentos rígidos da AASHTO, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Para cada estrutura e coeficiente de transferência de carga variou-se a perda de serventia (Δ PSI) de 0,25 em 0,25, dentro do intervalo de 0 a 2,0, admitindo-se, portanto, a serventia final igual a 2,5.
- Obteve-se o número de solicitações em cada valor do índice de serventia estipulado e para cada coeficiente de transferência de carga.
- Os parâmetros considerados para os cálculos dos números de solicitações foram:
 - $Z_r = -0,841$ (para $R=80\%$)
 - $S_0 = 0,30$
 - $p_t = 2,5$
 - $\Delta PSI = 2,0$
 - $E_C = 4351200$ psi

Os resultados estão apresentados na tabela 7.11 e na figura 7.8.

Tabela 7.11 - Número de solicitações calculado para cada estrutura analisada, em função do PSI e do coeficiente de transferência de carga

Coeficiente de Transferência de Carga	Δ PSI	PSI	W_{18}	
			Estrutura 1	Estrutura 2
J = 2,50 com acostamento de concreto	0,00	4,50	3,08E+05	5,37E+05
	0,25	4,25	5,32E+06	1,27E+07
	0,50	4,00	1,03E+07	2,63E+07
	0,75	3,75	1,57E+07	4,13E+07
	1,00	3,50	2,15E+07	5,80E+07
	1,25	3,25	2,78E+07	7,64E+07
	1,50	3,00	3,47E+07	9,69E+07
	1,75	2,75	4,23E+07	1,19E+08
	2,00	2,50	5,07E+07	1,44E+08
J = 3,20 com acostamento asfáltico	0,00	4,50	1,55E+05	2,70E+05
	0,25	4,25	2,63E+06	6,26E+06
	0,50	4,00	5,01E+06	1,27E+07
	0,75	3,75	7,44E+06	1,96E+07
	1,00	3,50	9,98E+06	2,70E+07
	1,25	3,25	1,27E+07	3,49E+07
	1,50	3,00	1,55E+07	4,33E+07
	1,75	2,75	1,85E+07	5,24E+07
	2,00	2,50	2,18E+07	6,21E+07
J = 4,00 sem acostamento	0,00	4,50	8,34E+04	1,45E+05
	0,25	4,25	1,39E+06	3,31E+06
	0,50	4,00	2,60E+06	6,61E+06
	0,75	3,75	3,79E+06	1,00E+07
	1,00	3,50	5,00E+06	1,35E+07
	1,25	3,25	6,23E+06	1,71E+07
	1,50	3,00	7,50E+06	2,09E+07
	1,75	2,75	8,80E+06	2,49E+07
	2,00	2,50	1,02E+07	2,89E+07

Figura 7.8 – Gráfico da variação da serventia em função do número de solicitações calculado para as estruturas analisadas nas condições de transferência de carga consideradas

Tabela 7.12 – Quadro resumo da variação da vida útil do pavimento considerando-se os efeitos do acostamento em relação à vida útil do pavimento sem acostamento

Estrutura	Espessura	Solicitações			Aumento da vida útil do pavimento em relação à ausência de acostamento	
		Acostamento Concreto	Acostamento Asfáltico	Sem Acostamento	Acostamento Concreto	Acostamento Asfáltico
1	20 cm	5,07E+07	2,18E+07	1,02E+07	397%	114%
2	24 cm	1,44E+08	6,21E+07	2,89E+07	398%	115%

Verifica-se que a presença do acostamento de concreto propiciou um aumento na vida útil do pavimento em quase 400% em relação ao pavimento sem acostamento. Já o acostamento asfáltico aumentou a vida útil do pavimento em 115%. Como esperado, a presença de acostamento aumenta substancialmente a vida útil do pavimento.

7.2.2.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO NECESSÁRIA PARA A PISTA EM FUNÇÃO DO TIPO DE ACOSTAMENTO ADOTADO

Esta análise foi realizada apenas para pavimentos rígidos, já que os métodos de dimensionamento tratam de maneira mais explícita a influência da presença e do tipo de acostamento na espessura final da placa de concreto da pista.

Para as análises, utilizou-se o tráfego projetado para o período de 20 anos do Trecho Sul do Rodoanel Mario Covas.

7.2.2.2.1 DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS DO PAVIMENTO DE CONCRETO

Foi proposto o dimensionamento da placa de concreto para a seguinte estrutura apresentada na figura 7.9.

Figura 7.9 – Estrutura do pavimento proposta para o dimensionamento da espessura da placa em função do acostamento

As espessuras das placas do pavimento de concreto foram determinadas através dos métodos da AASHTO (1993) e da PCA (1984), para valores de módulos de reação do sistema variando de 40 a 140 MPa/m.

A partir do método da AASHTO (1993) é possível estudar três situações de acostamento:

- Presença de acostamento de concreto;
- Presença de acostamento asfáltico;
- Ausência de acostamento.

Já com o método da PCA (1984), apenas é possível estudar as situações:

- Presença de acostamento de concreto;
- Ausência de acostamento de concreto.

Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 7.10, 7.11 e 7.12 a seguir.

AASHTO					
$\Delta PSI = 2.0$ $S_o = 0.3$ $R = 80\%$ $J = 2.5$ f_{ctm} do concreto = 5,2 MPa $C_d = 1,25$ $W_{18} = 1,44 \times 10^8$					
K	Espessura da Placa			Aumento da espessura da placa devido à presença de acostamento asfáltico (%)	Aumento da espessura da placa devido à ausência de acostamento (%)
	Com acostamento de concreto	Com acostamento asfáltico	Sem acostamento		
40	26,01	29,59	33,22	14%	28%
60	25,50	29,11	32,74	14%	28%
80	25,10	28,73	32,36	14%	29%
100	24,74	28,40	32,03	15%	29%
120	24,44	28,09	31,75	15%	30%
140	24,00	27,81	31,47	16%	31%
Média				15%	29%

Figura 7.10 – Quadro resumo do dimensionamento da espessura da placa de concreto através do método da AASHTO (1993) em função do acostamento e do módulo de reação do sistema

PCA			
Resistência Caract. à Tração na Flexão, f_{ctMk} :	5,2	MPa	
Juntas com BT:	sim	x	não
Período de projeto (anos):	20		
Fator de segurança de cargas	F_{SC} :	1,3	

K	Espessura da Placa		Aumento da espessura da placa devido à ausência de acostamento %
	Acostamento de concreto	Sem acostamento	
40	28	35	25%
60	27	33	22%
80	26	32	23%
100	25	31	24%
120	24	31	29%
140	23	30	30%
	Média		26%

Figura 7.11 – Quadro resumo do dimensionamento da espessura da placa de concreto através do método da PCA (1984) em função do acostamento e do módulo de reação do sistema

Figura 7.12 – Gráfico comparativo das espessuras da placa de concreto calculadas através dos métodos da AASHTO (1993) e da PCA (1984) em função do acostamento e do módulo de reação do sistema

Com base nas análises efetuadas, verifica-se que o aumento da espessura da placa de concreto devido à ausência de acostamento é de cerca de 27%, com relação ao pavimento com acostamento em concreto (média entre o dimensionamento pela AASHTO e pela PCA). Quando a opção é implantar acostamento asfáltico, o aumento da espessura da placa com relação ao pavimento com acostamento em concreto é de cerca de 15%.

Portanto, em virtude do exposto, a alternativa de implantação de acostamento sempre deve ser analisada, uma vez que pode apresentar custo menor de implantação e desempenho mais satisfatório.

7.2.2.2.2 VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES NAS PLACAS DE CONCRETO

A presença de acostamento de concreto adjacente ao pavimento também de concreto, reduz as tensões atuantes nas placas da pista principal em relação às tensões geradas na placa quando não há acostamento.

Para verificar e mensurar esta ocorrência foi realizada a análise através do programa EVERFE 2.24 para cálculo de tensões por modelo de elementos finitos.

A estrutura considerada para o estudo foi placa de concreto de cimento Portland com 24 cm de espessura e sub-base de concreto compactado com rolo com 10 cm de espessura. A placa apresenta as dimensões 5,50 m de comprimento e 3,60 m de largura. As figuras 7.13 a 7.16 apresentam as situações de carregamentos consideradas no estudo.

Figura 7.13 – Situação de carregamento analisada, considerando pista sem acostamento e carga aplicada no centro da placa

Figura 7.14 – Situação de carregamento analisada, considerando pista sem acostamento e carga aplicada no bordo da placa

Figura 7.15 – Situação de carregamento analisada, considerando pista com acostamento e carga aplicada no centro da placa

Figura 7.16 – Situação de carregamento analisada, considerando pista com acostamento e carga aplicada no bordo da placa

Inicialmente, foram calculadas as tensões máximas para duas posições de carga de uma mesma estrutura, sendo uma no centro e outra no bordo da placa e consideradas as situações com acostamento de largura de 3,60 m e sem acostamento. Variaram-se os diferenciais térmicos de 0°, 3°, 6°, 9° e 12°. Os resultados obtidos para a situação de carga aplicada no centro estão apresentados

na tabela 7.13, enquanto que a tabela 7.14 apresenta os resultados para a situação de carga aplicada no bordo.

Tabela 7.13 – Tensões máximas na placa de concreto para carga aplicada no centro da placa

Diferencial Térmico	TENSÃO MÁXIMA (MPa)			Aumento da Tensão na Placa da Pista Devido à Ausência de Acostamento (%)
	Com Acostamento		Sem Acostamento	
	Pista	Acostamento	Pista	
0º	1,601	0,189	1,608	0%
3º	2,01	0,762	2,056	2%
6º	2,459	1,179	2,505	2%
9º	2,942	1,56	2,953	0%
12º	3,349	1,918	3,402	2%

Tabela 7.14 – Tensões máximas na placa de concreto para carga aplicada no bordo

Diferencial Térmico	TENSÃO MÁXIMA (MPa)			Aumento da Tensão na Placa da Pista Devido à Ausência de Acostamento (%)
	Com Acostamento		Sem Acostamento	
	Pista	Acostamento	Pista	
0º	1,918	0,332	2,528	32%
3º	2,297	0,802	2,952	29%
6º	2,714	1,271	3,384	25%
9º	3,143	1,605	3,807	21%
12º	3,627	1,879	4,218	16%

Com base nesta análise mecanicista, pode-se verificar que para a aplicação da carga no bordo da placa, a situação sem acostamento fornece valores de tensões na placa da pista, em média, 25% maiores do que a situação com acostamento em concreto e com barras de ligação.

Já para a análise com a carga aplicada no centro da placa, o aumento de tensões devido à ausência de acostamentos adjacentes pode ser considerado desprezível.

Verifica-se também que a influência da presença de acostamentos na redução das tensões na placa da pista é gradativamente reduzida com o aumento do diferencial térmico a que o pavimento está submetido. Mesmo assim, para caso de diferencial térmico máximo considerado nos projetos igual a 12º, a ausência de acostamento gera um aumento de 16% na tensão máxima da placa de concreto da pista.

Destas análises, ainda pode-se constatar que o afastamento da carga da borda da pista, mesmo na situação sem acostamento, reduz a tensão máxima a que a placa é submetida. Assim sendo, propõe-se como alternativa à implantação de acostamentos em concreto em casos de necessidade de redução de custos, a implantação acostamentos estreitos adjacentes à pista para afastar o tráfego da borda da placa.

Para tanto, foi efetuado estudo considerando a mesma estrutura apresentada e configurações de placa, com as situações sem acostamento e acostamento com largura de 0,15 m, 0,30 m, 0,60 m, 1,20 m e 3,60 m. Através do programa EVERFE 2.24 foram calculadas as tensões máximas atuantes para a situação crítica de carregamento que aplica a carga no bordo da placa. As tensões foram calculadas para os diferenciais térmicos de 0º, 3º, 6º, 9º e 12º. A partir destes resultados, foram calculados os números máximos de solicitações tendo em vista a tensão admissível no concreto igual a 5,0 MPa. Os resultados estão apresentados na figura 7.17.

ESTUDO DE TENSÕES SOLICITANTES EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA LARGURA DO ACOSTAMENTO DE CCP

Espessura da placa de CCP= 24cm

Tensão Admissível 5,0 MPa

Comprimento da Placa = 5,5 m

Largura da Placa = 3,6 m

Tipo de Eixo : ESRD

Carga por eixo = 13 tf

Pressão de contato = 7,0 kgf/ cm²

Sub-base de CCR = 10 cm

Posição do carregamento: Tangente à borda da placa

Diferencial térmico	Localização	Tensão Máxima de tração (Mpa)					
		3,60	1,20	0,60	0,30	0,15	0,00
0	Borda	1,92	2,05	2,10	2,17	2,33	2,53
3	Borda	2,30	2,49	2,56	2,61	2,75	2,95
6	Borda	2,71	2,94	2,98	3,06	3,16	3,38
9	Borda	3,14	3,39	3,43	3,50	3,58	3,81
12	Borda	3,63	3,82	3,87	3,95	4,00	4,22

Figura 7.17 – Quadro resumo do número de solicitações admissíveis para placas de concreto considerando-se a carga aplicada em seu bordo, em função do diferencial térmico e da largura do acostamento

Verifica-se que a implantação de faixa estreita de concreto adjacente à pista implica em aumento da vida útil do pavimento, tendo em vista o número de solicitações máximas a que a estrutura pode ser submetida. Portanto, recomenda-se a implantação de faixa adjacente com, no mínimo, 0,60 m por razões construtivas, devendo esta largura ser estabelecida através de análise de custo e desempenho do pavimento.

7.3 ANÁLISE DE CUSTOS PARA A DEFINIÇÃO DO TRÁFEGO A SER CONSIDERADO NO DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DO ACOSTAMENTO

De modo geral, verifica-se que muitos acostamentos implantados nas rodovias brasileiras apresentam defeitos antes do tempo previsto, ao passo que publicações estrangeiras afirmam que há desempenho satisfatório em seus acostamentos. Um dos motivos para estas ocorrências é a consideração do tráfego previsto nos projetos de acostamentos no Brasil ser inferior àquele considerado internacionalmente. Ou seja, enquanto outros países utilizam para o projeto de dimensionamento do acostamento entre 2 a 8% do tráfego projetado para a pista, os manuais de projeto brasileiros recomendam o uso de 1%.

Assim sendo, com o objetivo de estabelecer uma porcentagem de tráfego maior para o dimensionamento dos acostamentos, foi realizada uma análise de sensibilidade dos efeitos do aumento do tráfego nos projetos em relação aos custos do acostamento.

As análises de custos foram realizadas com base em estrutura de pavimento flexível dimensionada através do método do DNER, considerando-se rodovia de pista simples, duas mãos de direção, com largura de 7 metros e acostamentos laterais com largura de 3 metros de cada lado, como apresentado na figura 7.18. O tráfego da pista principal foi considerado igual a 10^8 e para o acostamento foram estudados os tráfegos de 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50% e 100% do tráfego total da pista. Foi considerado subleito com CBR igual a 5%.

Figura 7.18 – Seção da plataforma da rodovia considerada na análise

Para o detalhamento das camadas do pavimento dos acostamentos foram consideradas duas situações, ambas sem degraus entre a pista e o acostamento:

1. Dimensionamento de uma estrutura para o acostamento com espessuras diferentes das dimensionadas para a pista;
2. Consideração da camada de sub-base igual à da pista e variação das espessuras do revestimento e da base para compensar a redução do revestimento em relação à pista.

A figura 7.19 ilustra tais situações.

Figura 7.19 – Estruturas de pavimento consideradas na análise de custo em função do tráfego considerado no projeto do acostamento

Para cada estrutura dimensionada, foram calculados seus preços por metro quadrado e por metro linear de pista, com base na Tabela de Preços Unitários do DER/SP referente a 30/06/2006, cujos resultados estão apresentados nas tabelas 7.15 e 7.16 a seguir.

Tabela 7.15 – Custos em função do tráfego considerado no acostamento para a situação 1 de dimensionamento da estrutura

Tráfego no Acostamento (% Pista)	Preço Pista		Preço Acostamento		Custo Acostamento Relativo ao Custo Total do Pavimento (%)
	(R\$/m ²)	(R\$/m)	(R\$/m ²)	(R\$/m)	
1	94,61	662,25	60,04	360,24	54%
2	94,61	662,25	61,97	371,82	56%
5	94,61	662,25	62,66	375,95	57%
10	94,61	662,25	73,14	438,84	66%
20	94,61	662,25	83,44	500,64	76%
50	94,61	662,25	84,30	505,80	76%
100	94,61	662,25	94,61	567,64	86%

Tabela 7.16 – Custos em função do tráfego considerado no acostamento para a situação 2 de dimensionamento da estrutura

Tráfego no Acostamento (% Pista)	Preço Pista		Preço Acostamento		Custo Acostamento Relativo ao Custo Total do Pavimento (%)
	(R\$/m ²)	(R\$/m)	(R\$/m ²)	(R\$/m)	
1	94,61	662,25	64,85	389,10	59%
2	94,61	662,25	67,28	403,68	61%
5	94,61	662,25	67,28	403,68	61%
10	94,61	662,25	77,10	462,60	70%
100	94,61	662,25	94,61	567,64	86%

Figura 7.20 – Gráfico comparativo do custo do acostamento relativo ao custo total do pavimento em função do tráfego considerado no acostamento, para as duas situações de dimensionamento

A partir dos resultados obtidos e com base no gráfico apresentado na figura 7.20, verifica-se que, variando-se o tráfego de projeto para o dimensionamento dos acostamentos desde o valor mínimo de 1%, recomendado pelo manual de projeto brasileiro, até 100%, correspondente à mesma estrutura da pista, de 1% até 5% tem-se um acréscimo pequeno nos custos totais de implantação do pavimento. Daí em diante, verifica-se um maior aumento de custo para pequenos aumentos no tráfego considerado.

Ainda, ressalta-se que a diferença no custo total da pavimentação entre o tráfego recomendado nas normas brasileiras, que é de 1%, e o tráfego de 5% do tráfego da pista, é de cerca de 2 a 3%, sendo recomendável projetar o acostamento para o tráfego de 5% do total.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os estudos desenvolvidos verificou-se que:

- a ausência de acostamentos reduz a segurança viária e piora as condições operacionais do fluxo;
- a redução de capacidade viária é mais expressiva para acostamento com largura inferior a 0,60 metro;
- a ausência de acostamentos ou a sua implantação de maneira inadequada causa defeitos na pista por deficiência de drenagem (pavimentos flexíveis asfálticos) e de transferência de carga (pavimentos rígidos de concreto);
- o adequado detalhamento das camadas do pavimento do acostamento melhora as condições de drenagem subsuperficial da estrutura e aumenta os desempenhos funcional e estrutural dos pavimentos, sendo este último o mais afetado;
- conforme o método de dimensionamento de pavimento da AASHTO (1993), é sensível a redução da vida útil dos pavimentos rígido e flexível em função da ausência e escolha do tipo adequado de estruturas para o acostamento, podendo haver variação de até 400% na vida útil do pavimento;
- os acostamentos adjacentes aos pavimentos rígidos de concreto atuam melhorando as condições de transferência de carga, reduzindo as tensões atuantes nas placas e, conseqüentemente, reduzindo a espessura necessária da placa de concreto do pavimento da pista principal;
- mesmo nos países mais desenvolvidos não existe um critério consagrado e difundido para a escolha e o detalhamento estrutural dos acostamentos de rodovias;
- com relação ao dimensionamento do pavimento dos acostamentos, os demais países consideram uma porcentagem maior do tráfego da pista para o projeto do que o valor utilizado no Brasil. Verificou-se que o aumento do custo total

da pavimentação considerando o acostamento dimensionado para o tráfego de 5% do total da pista em relação ao recomendado pelo manual de projeto de pavimentação do DNIT (igual a 1%) é cerca de 2 a 3%.

Portanto, constatou-se que a presença de acostamentos pavimentados oferece inúmeras vantagens, tanto com relação à segurança e à capacidade viária, quanto com relação às condições do pavimento da pista. Isto é, os acostamentos pavimentados oferecem espaço para refúgio de veículos em situações de emergência, eliminam ou reduzem os degraus adjacentes à borda da faixa de rolamento, proporcionam declividade transversal adequada para uma drenagem eficiente da pista, reduzem as manutenções necessárias e, ainda, proporcionam suporte lateral para a base e o revestimento da pista principal.

Porém, principalmente em virtude dos custos de implantação, os acostamentos nem sempre são utilizados. Outras vezes, são implantados de maneira inadequada, com tipo de pavimento incompatível ao da pista, estrutura insuficiente às necessidades de tráfego ou com espessuras de camadas diferentes das camadas da pista, aprisionando água livre em seu interior, não exercendo satisfatoriamente as funções a que se destinam.

Com o intuito de orientar a decisão sobre a implantação de acostamentos, assim como o tipo e demais considerações relevantes, com base nas pesquisas e análises realizadas neste trabalho, propõe-se o Fluxograma para Projetos de Acostamentos com as devidas recomendações a serem seguidas, apresentado na figura 8.1.

Figura 8.1 – Fluxograma para projeto de acostamentos

Este fluxograma procura dividir as questões a serem analisadas quando da necessidade de tomada de decisão sobre a implantação de acostamentos em duas etapas.

A primeira etapa consiste na avaliação dos critérios que deverão ser considerados para a decisão de implantar ou não os acostamentos e definir qual o tipo de pavimento mais recomendável. Deverão ser analisados:

- Tráfego:
 - Avaliar as perdas de capacidade da via em função da redução da largura ou até supressão dos acostamentos, conforme apresentado no capítulo 7.
- Segurança:
 - Deve ser avaliado o índice de acidentes previsto com base no modelo proposto pela eq. (1) que leva em consideração a largura da pista e do acostamento, assim como a largura pavimentada do acostamento. Entretanto, devido à complexidade da definição das causas dos acidentes, este modelo deverá ser utilizado apenas em caráter orientativo, não sendo propostos valores limites.

- Desempenho do Pavimento da Pista:
 - Efetuar análises como as desenvolvidas no capítulo 7 deste trabalho, comparando o desempenho das situações com e sem acostamento e, ainda, quando se tratar de pavimento de concreto, verificar o desempenho com o uso de acostamento em pavimento flexível.
 - É recomendável que os acostamentos sejam construídos do mesmo material da pista, pois facilita a construção e melhora o desempenho do pavimento da pista, reduzindo os custos de manutenção.
- Custos:
 - Para as situações de melhor desempenho do pavimento da pista, efetuar análise dos custos de implantação e de manutenção ao longo de sua vida útil para a definição final do acostamento.

Caso se opte nesta primeira etapa convirja para a implantação do acostamento, seu tipo já estará definido. Assim sendo, apresentam-se as considerações que deverão ser feitas para as definições dos critérios de projeto das disciplinas envolvidas:

- Características Geométricas:
 - Largura do Acostamento:
 - Utilizar as recomendações do Manual de Projeto Geométrico do DNER (DNER, 1999) em função da Classe de Projeto e tipo de relevo.
 - Largura do Acostamento a Pavimentar:
 - Considera-se ideal pavimentar a largura total do acostamento.
 - Em casos de restrição de ordem financeira, recomenda-se que sejam executadas faixas de rolamento mais largas, com mínimo de 0,60 metro além da borda da pista, com a mesma estrutura de pavimento e com dispositivos que desencorajem o tráfego, tais

como zebrados. Esta faixa alargada tem a função de afastar as cargas solicitantes de tráfego da borda do pavimento e, também, de proteger o pavimento contra infiltrações de água, sejam através da junta entre pista e o acostamento ou infiltrações horizontais provenientes da lateral da pista.

- Embasar a definição da largura a pavimentar em estudos de desempenho do pavimento e de custos envolvidos.
- Declividade Transversal:
 - Utilizar declividade sempre maior do que a da pista, com valor máximo de 8%.
 - Diferença algébrica entre a declividade transversal da pista e do acostamento nunca deverá ser maior do que 7%.
 - Seguir as demais recomendações do Manual de Projeto Geométrico do DNER (DNER, 1999).
- Degrau entre a Pista e o Acostamento:
 - Os degraus devem sempre ser evitados. Caso não seja possível evita-los, os mesmos deverão ter altura máxima de 5 centímetros e, preferencialmente, deverão ter a borda chanfrada ou arredondada.
- Características do Pavimento do Acostamento:
 - Tipo do Pavimento:
 - Já definido na fase anterior com base na análise de desempenho da pista.
 - Dimensionamento do Pavimento:
 - Deve ser dimensionado para o tráfego correspondente a 5% do tráfego total projetado para a pista, quando não se prevê de imediato a implantação futura de faixas adicionais de rolamento.

- Drenagem:
 - Subsuperficial:
 - Preferencialmente, deve ser contemplada em todos os projetos a camada drenante prolongada sob os acostamentos, interligada aos drenos de pavimento instalados sob a junta longitudinal entre a pista e o acostamento.
 - Os acostamentos devem ser projetados conforme a Situação 2 do item 7.3 do presente trabalho, cujas camadas inferiores da pista encontram continuidade através dos acostamentos, evitando-se assim, o acúmulo de água livre na estrutura do pavimento.
 - Quando houver restrições de custos, no mínimo, implantar drenos de pavimento sob a junta longitudinal entre a pista e o acostamento.
 - Em regiões de pluviosidade mais intensa, devem ser preferidas as camadas drenantes em relação aos drenos de pavimento.
 - Dimensionar hidraulicamente tanto os drenos de pavimento como as camadas drenantes de acordo com as recomendações do Manual de Projeto de Drenagem do DNIT (DNIT, 2006).
 - Superficial:
 - Implantar as sarjetas adequadamente, de acordo com as instruções do Manual de Drenagem do DNIT (DNIT, 2006), para garantir rápido escoamento das águas superficiais precipitadas e não permitir a formação de poças na pista e nas regiões adjacentes, pois favoreceriam o fenômeno de aquaplanagem e a infiltração de água no pavimento.
 - Em regiões de alta pluviosidade, deve-se evitar o projeto das sarjetas considerando a largura de inundação maior do que a sua capacidade, para não expor o pavimento a freqüentes acúmulos de água.

Entretanto, se a análise da primeira etapa resultar na decisão de não implantar acostamento pavimentado, devem ser seguidas as recomendações apresentadas:

O DNER recomenda que quando os acostamentos não forem pavimentados, seja executado o revestimento de uma faixa de 0,30m a 0,50m de largura adjacente à pista para estimular o uso total da faixa de rolamento. Além disso, esta faixa adicional serve para conferir alguma proteção ao pavimento com relação à drenagem e para oferecer segurança para veículos eventualmente parados ou para manobras de conversão.

A partir do exposto neste trabalho, recomenda-se que os acostamentos não pavimentados sejam mantidos limpos e sem vegetação para evitar empoçamentos na borda da pista que favorecem a infiltração de água no pavimento. Também, deve ser executado com declividade transversal superior à da pista de modo a facilitar o escoamento superficial.

Ainda, em regiões de alta pluviosidade, devem ser implantados drenos subsuperficiais na borda dos pavimentos em todas as regiões de corte.

Entretanto, a decisão de não implantar acostamentos não é recomendada em virtude das evidências de redução do desempenho do pavimento já apresentadas. Considerando-se que o maior custo dos pavimentos flexíveis reside na camada de revestimento, recomenda-se que as camadas inferiores do pavimento sejam prolongadas transversalmente em cerca de 0,60 m e, esta sobrelargura seja revestida com alguma solução de menor custo, sendo sugerido o uso de:

- Tratamentos Superficiais Asfálticos;
- Agente Anti-Pó.

Os tratamentos superficiais asfálticos consistem no espalhamento de ligante asfáltico sobre a base de um pavimento, seguido do espalhamento do agregado e compactação com rolo de pneus. Em função do número de camadas executadas, eles podem ser divididos em simples, duplos ou triplos. Este tratamento melhora o índice de conforto, apresentando durabilidade com custos reduzidos.

O agente anti-pó é um derivado de óleo de xisto com frações de material asfáltico, que adere firmemente ao solo formando uma camada impermeável. Indicado para

vários tipos de solo, o produto permite a eliminação de poeira, proveniente do deslocamento dos veículos, além de prevenir a ocorrência de lama em dias chuvosos, reduzindo as infiltrações no pavimento. O anti-pó ainda tem a vantagem de permitir a manutenção da capa selante formada pelo produto mantendo a base íntegra. Isto permite a pavimentação por etapas, pois as camadas inferiores do pavimento estarão prontas para receber a aplicação do revestimento asfáltico convencional quando surgir a necessidade de aumento da capacidade viária ou outra que justifique o uso do acostamento como faixa de rolamento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, D.C., 1986. 1v.

_____. **AASHTO guide for design of pavement structures 1993**. Washington, D.C., 1993. 1 v.

_____. **A police on geometric design of highways and streets**. 4th ed. Washington, D.C., 2001. xlii, 905 p.

BALBO, J. T. Análise crítica dos métodos para dimensionamento estrutural de pavimentos de concreto simples. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 2003. 20 p.

BRASIL. Departamento de Estradas de Rodagem. **Instrução de projeto**: avaliação de pavimentos flexíveis e semi-rígidos por meio de levantamento visual contínuo de defeitos da superfície. São Paulo, 2006. 28p.

_____. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de drenagem de rodovias**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 337 p. Publicação IPR-724.

_____. _____. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 278 p. Publicação IPR-719.

_____. _____. **Manual de pavimentos rígidos**: projeto e dimensionamento operação e conservação. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1989. v. 2.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de implantação básica**. Rio de Janeiro: DNER, 1996. 1 v.

_____. _____. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: DNER, 1999. 195 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003-TER**: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 12 p.

_____. **DNIT 061/2004-TER**: pavimentos rígidos: defeitos: terminologia. Rio de Janeiro, 2004. 13 p.

GLENNON, J. C. **Relationship between safety and key highway features**: state of the art report 6: effect of pavement/shoulder dropp-offs on highway safety. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1987. 110 p.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1993. ix, 805 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.). Highway Research Board. **Highway capacity manual**: special report 87. Washington, D.C., 1965.

_____. _____. **Highway capacity manual**: special report 209. Washington, D.C., 1985.

_____. _____. **Highway capacity manual**: special report 209. Washington, D.C., 2000.

OWUSU-ABABIO, S.; SCHMITT, R. L.; OSTHUS, J. **Paved shoulders adjacent to concrete pavements**: synthesis of current practices in the Midwest. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2003. 17 p.

PACKARD, R. G. **Thickness design for concrete highway and street pavements**. Skokie, Ill.: Portland Cement Association, 1984. 109 p.

PEREIRA, A. C. O. **Influência da drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos**. 2003. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SEEDS, S. B.; HICKS, R. G. Development of drainage coefficients for the 1986: AASHTO guide for design of pavement structures. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., n. 1307, p. 256-267, 1991.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. National Cooperative Highway Research Program. **NCHRP Synthesis 63**: design and use of highway shoulders. Washington, D.C., 2001. 26 p. (NCHRP Synthesis of Highway Practice).

_____. National Research Council. **Design safer roads**: practices for resurfacing, restoration and rehabilitation: special report 214. Washington, D.C., 1987. 319 p.

_____. National Research Council. **Shoulder geometrics and use guidelines**: report 254. Washington, D.C., 1982. 71 p.

UNITED STATES. Federal Highway Administration. **Structural design of roadway shoulders**. Ohio, 1986. 203 p. (Report n. FHWA/RD-86/089).

UNITED STATES. Bureau of Design and Environment Manual. **Pavement Rehabilitation**. Illinois, 2002. 72p.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975. xiii, 711 p.

ZEGEER, C. V.; DEACON, J. A. **Relationship between safety and key highway features**: state of the art report 6: effect of lane width, shoulder width, and shoulder type on highway safety. Washington, D.C.: Transportation Research Board; National Research Council, 1987. 110 p.