ANTONIO CARLOS OQUENDO PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUBSUPERFICIAL NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

São Paulo

2003

ANTONIO CARLOS OQUENDO PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUBSUPERFICIAL NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

Área de Concentração:
Engenharia de Transporte

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo

2003

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Antonio Carlos Oquendo

Influência da drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos / A.C.O. Pereira. -- São Paulo, 2003.
194 p.

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

1.Drenagem de pavimentos I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica Departamento de Engenharia de
Transportes II.t.

A

Angel Antonio Oquendo Garcia e

Joaquim Rodrigues Pereira.

Saudades...

AGRADECIMENTOS

À PLANSERVI Engenharia pelo apoio incondicional e irrestrito em todas as fases deste trabalho.

À IMPERPAV Engenharia pelo apoio e pelo incentivo.

À DYNATEST Engenharia, ao engenheiro André Vale e aos técnicos Ronaldo e Rui pela realização dos levantamentos deflectométricos.

Aos meus alunos da Escola de Engenharia Mauá, pelo constante estímulo ao meu aperfeiçoamento técnico.

À Cristiane e David pela paciência e dedicação na execução dos desenhos.

À Cibele e Ângela pelas atenciosas revisões e preciosas sugestões que tanto enriqueceram este trabalho.

À Bruna Tsu pelos constantes incentivos ao longo de todo o período de elaboração desta dissertação.

A André, Ronaldo, Victorino e Luis Roberto, pelas discussões, fundamentais para a elaboração deste trabalho.

Ao amigo Augusto, pelas proposições e discussões de grande utilidade, não só a este trabalho mas também à minha carreira profissional.

Ao amigo e companheiro André Pita, com admiração, pela amizade e pela dedicação profissional, que permitiu-me uma maior dedicação a este estudo.

Ao Professor Ignácio Tadayoshi Moriguchi pelos ensinamentos, pelo apoio e pela confiança em mim depositada nesse meu início de carreira docente.

Ao Professor e amigo Fernando Augusto Júnior, com quem iniciei minha carreira de engenheiro, por todas as lições que tive, tenho e terei, e que não se limitam apenas à área técnica ou profissional, mas acima de tudo, pela nossa amizade.

Ao Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki, antes de mais nada pela confiança e compreensão diárias. Como orientador, pela dedicação, empenho e perseverança, sendo o principal responsável pelos pontos fortes deste trabalho.

À minha irmã Luciana e meu cunhado Júnior, pelas conversas, pelos conselhos e pelos exemplos a serem seguidos, mas principalmente, pelo prazer de sermos da mesma Família.

Ao meu irmão Luis Mauro que em muitas vezes, e na maioria delas sem saber, me mostra a simplicidade da vida, o que me auxilia em muitas decisões. “Magro”, obrigado pelo orgulho que tenho em ser seu irmão.

Ao meu Pai, Antonio Carlos Pereira e minha Mãe, Leda Oquendo Pereira, pela base familiar sólida, meu “porto seguro”. Obrigado! Amo vocês!!!

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para concretização deste trabalho, meu Muito Obrigado!

RESUMO

Desde a implantação das primeiras obras, há indicações de que seus construtores já apresentavam conhecimentos acerca da influência da drenagem no desempenho dos pavimentos.

Muitos países, onde os custos rodoviários são avaliados criteriosamente ao longo de toda a vida de serviço do pavimento, vêm desenvolvendo pesquisas objetivando a consideração dos efeitos prejudiciais da água em excesso no interior de sua estrutura.

Métodos consagrados como, por exemplo, o da AASHTO, já consideram a influência da eficiência do sistema de drenagem no dimensionamento das estruturas de pavimentos.

Neste trabalho, são apresentados um breve histórico e uma análise dos métodos de dimensionamento nacionais e estrangeiros, com vistas às considerações da influência do sistema de drenagem e da variação sazonal do teor de umidade no desempenho estrutural dos pavimentos.

Fazendo-se uso do *Falling Weight Defectometer*, foi realizado levantamento deflectométrico em trecho experimental, com extensão aproximada de 900 m, direcionado para a avaliação da variação dos módulos resilientes das camadas e do comportamento estrutural diante da infiltração d'água pela borda do pavimento.

A partir dos dados obtidos no segmento experimental, pôde-se avaliar a magnitude desses parâmetros e assim efetuar, através de modelos analíticos que expressam os métodos de dimensionamento vigentes no país, a estimativa de redução da vida útil do pavimento analisado.

Finalmente, propõe-se a introdução de um parâmetro de ajuste da espessura, denominado Fator de Ajuste de Drenagem, para consideração das condições adversas de drenagem no procedimento de dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis preconizado pelo DNER.

ABSTRACT

Since the implementation of the first roads, there are indications that constructors already had knowledge concerning drainage influence in the pavement performance.

Many countries, where highway administration costs are criteriously available along pavement lifetime, have been developing researches regarding considerations about harmful effects from excessive water in the pavement structure.

Renowned methods such as AASHTO, already consider the influence of drainage system efficiency in the pavement structures design.

In this work, brief historic and an analysis about national and foreign design methods are presented, taking into account considerations concerning influence of drainage system and seasonal variations of moisture content in the structural pavement performance.

Employing the Falling Weight Deflectometer, deflection measurements were carried out in a test section, about 900 m long, in order to evaluate the resilient modulus layers and the structural behavior variations due to water infiltration from pavement edge.

From experimental sections data obtained, it was possible to evaluate the magnitude of these parameters and then realize, through analytical models that represent the actual national design methods, the reduction estimate of evaluated pavement lifetime.

Finally, this work propose the introduction of a thickness adjustment parameter, called Drainage Adjustment Factor, to consider the adverse drainage conditions in the flexible pavement structure design procedure advocated by DNER.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Considerações Iniciais	01
1.2. Apresentação do Trabalho	03
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	07
3. A ÁGUA NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO	08
3.1. Breve Histórico	08
3.2. Infiltração D'Água	11
3.2.1. Infiltração D'Água Através da Superfície.....	13
3.2.2. Infiltração de Água pela Borda do Pavimento	24
3.2.3. Fluxos D'Água Ascendentes.....	32
3.2.4. Capilaridade	33
3.3. Os Problemas da Drenagem Inadequada - Mecanismo dos Danos	36
3.3.1. Considerações Especiais	36
3.3.2. Poro-Pressão.....	41
3.3.3. Perda de Suporte	44
3.3.4. Solução para Minimização dos Problemas	50

4. SISTEMA DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL	52
4.1. Elementos Constituintes.....	52
4.1.1. Camada Drenante	53
4.1.2. Drenos Longitudinais de Borda	58
4.2. Critérios de Dimensionamento	64
4.2.1. Camada Drenante	64
4.2.1.1. Considerações Gerais	64
4.2.1.2. Dimensionamento Hidráulico da Camada Drenante.....	76
4.2.1.2.1. Critério da Continuidade de Fluxo	77
4.2.1.2.2. Critério do Tempo de Drenagem.....	82
4.2.1.3. Verificação quanto ao Critério de Filtro	88
4.2.2. Drenos Longitudinais Rasos	90
4.2.2.1. Dreno Cego	90
4.2.2.2. Dreno Tubular	90
4.2.2.3. Verificação quanto ao Critério de Filtro	92
4.3. Manutenção.....	93
5. CONCEPÇÃO DOS PAVIMENTOS QUANTO À DRENAGEM	94
6. LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO REALIZADO NO TRECHO EXPERIMENTAL	100
6.1. Características do Trecho.....	100
6.2. Levantamento Deflectométrico Realizado.....	105

6.3. Apresentação dos Resultados.....	108
6.4. Análise dos Resultados	112
7. AS CONSIDERAÇÕES DA DRENAGEM NOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	121
7.1. Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Asfáltico.....	122
7.1.1. AASHTO 1972/1981/1986/1993	122
7.1.2. Métodos do DNER.....	127
7.1.2.1. Método do DNER de 1966.....	128
7.1.2.2. Método do DNER de 1996.....	129
7.1.3. Método da Resiliência.....	131
7.1.4. Método do DNER para Dimensionamento de Pavimento Semi- rígido	132
7.1.5. Método do DER-SP	133
7.1.6. Procedimentos da PMSP para Pavimentos Asfálticos	135
7.1.6.1. Procedimento de 1992 para Vias de Tráfego Leve e Muito Leve.....	135
7.1.6.2. Procedimento PMSP de 1999	136
7.2. Dimensionamento de Reforço Estrutural em Concreto Asfáltico.....	140
7.2.1. Procedimento DNER PRO-11/79	140
7.2.2. Procedimento DNER PRO-10/79	142
7.2.3. Procedimento DNER PRO-269/94 – TECNAPAV	142
7.3. Outros Métodos.....	143

7.3.1. AASHTO/93 para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego.....	143
7.3.1.1. Duração das Seções Climáticas.....	143
7.3.1.2. Módulo Resiliente Efetivo do Subleito	145
7.3.2. Método da PMSP para Pavimentos com Camada de Rolamento de Peças Pré-Moldadas de Concreto	146
8. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS COEFICIENTES DE DRENAGEM.....	148
8.1. AASHTO 1986	148
8.1.1. Pavimentos de Concreto Asfáltico	150
9. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PROCEDIMENTOS QUE CONSIDERAM O EFEITO DA DRENAGEM NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO	152
9.1. Métodos de Dimensionamento da AASHTO 86/93	152
9.2. Procedimento de Dimensionamento de Reforço Estrutural em Concreto Asfáltico – DNER PRO 11/79	153
10. SUGESTÃO DE ADAPTAÇÃO DOS MÉTODOS VIGENTES NO PAÍS .	161
10.1.Desenvolvimento do Coeficiente de Drenagem, Cd	161
10.2.Calibração dos Fatores de Ajuste de Drenagem, Fd	169
10.2.1.1. Método de dimensionamento do DNER para pavimentos novos	170
10.2.2. Procedimento PRO-11 para dimensionamento de reforço.....	174
10.2.3. Procedimento PRO-10 para dimensionamento de reforço.....	178
10.3.Definição do fator de ajuste de drenagem, Fd	179

10.4.Exemplo Numérico	182
11. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	186
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	-	Faixas de Tráfego (Santamaría et al, 1998).....	19
Tabela 3.2	-	Valores da função C (Santamaría et al, 1998).....	21
Tabela 3.3	-	Valores da função f(N) (Santamaría et al, 1998)	21
Tabela 3.4	-	Valores experimentais de coeficientes de escoamento (Araújo, Tucci e Goldenfum, 2000)	22
Tabela 3.5	-	Exemplo numérico de determinação do Módulo Efetivo ...	47
Tabela 4.1	-	Recomendações para seleção da camada de bloqueio (Mallela, Titus-Glover e Darter, 2000)	58
Tabela 4.2	-	Procedimentos de dimensionamento hidráulico da camada drenante	88
Tabela 6.1	-	Precipitações nos dias que antecederam ao levantamento (dados obtidos junto à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Departamento de Meteorologia)	106
Tabela 6.2	-	Resumo dos resultados para deflexões no ponto de aplicação da carga	112
Tabela 6.3	-	Resumo dos resultados para deflexões a 1,20m do ponto de aplicação da carga	113
Tabela 6.4	-	Módulos de resiliência – bordo direito	114
Tabela 6.5	-	Módulos de resiliência – eixo	115
Tabela 6.6	-	Módulos de resiliência – bordo esquerdo	116
Tabela 6.7	-	Variação no Módulo de Resiliência	118
Tabela 6.8	-	Classificação da perda de suporte por imersão (Nogami e Villibor, 1995)	120

Tabela 7.1	-	Classificação da qualidade do sistema de drenagem (AASHTO, 1993)	124
Tabela 7.2	-	Valores recomendados para o coeficiente de drenagem (m_n) para pavimentos de CA (AASHTO, 1993)	127
Tabela 7.3	-	Fator Climático Regional (Senço, 1997)	128
Tabela 7.4	-	Classificação dos solos quanto à resiliência (DNER, 1996)	132
Tabela 7.5	-	Classificação das vias e parâmetros de tráfego (PMSP, 1999)	137
Tabela 7.6	-	Propriedades típicas dos solos da classificação MCT (PMSP, 1999)	139
Tabela 7.7	-	Fator de correção sazonal (DNER PRO-10 e PRO-11, 1979)	141
Tabela 7.8	-	Duração da seção em meses para cada uma das seis regiões climáticas	145
Tabela 7.9	-	Sugestão para o módulo de resiliência sazonal do subleito, em psi, em função da qualidade do solo	146
Tabela 7.10	-	Sugestão para o valor do módulo de resiliência efetivo do subleito, em psi, para ser utilizado no dimensionamento de pavimentos asfálticos, em função da qualidade do solo e das características da região	146
Tabela 8.1	-	Tempo estimado em dias para que seja atingido o grau de saturação de 50% partindo-se de um grau de saturação próximo a 100%, com base na permeabilidade dos materiais e nas características geométricas do pavimento (AASHTO, 1986) .	149

Tabela 8.2	- Classificação da eficiência do sistema de drenagem com base nos dados fornecidos pela tabela 8.1 (AASHTO, 1986)	150
Tabela 10.1	- Estruturas utilizadas no desenvolvimento dos Coeficientes de Drenagem, Cd	161
Tabela 10.2	- Variação na espessura da camada de CA em função da inclusão dos Cd	162
Tabela 10.3	- Deflexões (D_0 , x 10^{-2} mm) obtidas através do programa ELSYM 5 para as três estruturas, incluindo as variações do módulo resiliente da camada de base, E_2	164
Tabela 10.4	- Espessura da camada de CA para o restabelecimento das deflexões originais	167
Tabela 10.5	- Coeficientes de Drenagem, Cd	168
Tabela 10.6	- Fatores de ajuste estudados	169
Tabela 10.7	- Determinação da espessura total equivalente do segmento experimental	177
Tabela 10.8	- Fatores de ajuste da espessura total expressa em termos de material granular	179
Tabela 10.9	- Fatores de Drenagem, F_d , propostos	181
Tabela 10.10	- Estruturas dimensionadas	185

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 -	Diversas formas de infiltração de água na estrutura do pavimento	12
Figura 3.2 -	Vegetação em trinca no revestimento betuminoso	13
Figura 3.3 -	Trincamento excessivo do revestimento betuminoso	14
Figura 3.4 -	Panela oriunda do estado avançado de trincamento do revestimento betuminoso	14
Figura 3.5 -	Escoamento d'água canalizado pelas trilhas de roda sobre a superfície trincada	15
Figura 3.6 -	Divisão das regiões climáticas (Santamaría et al, 1998)	20
Figura 3.7 -	Escoamento superficial observado nas diversas superfícies ensaiadas (Araújo, Tucci e Goldenfum, 2000)	23
Figura 3.8 -	Pavimento danificado em pista com acostamento não revestido, contíguo à região de empoçamento d'água	25
Figura 3.9 -	Empoçamento d'água sobre acostamento não revestido	25
Figura 3.10 -	Empoçamento d'água em acostamento pavimentado	26
Figura 3.11 -	Junta do pavimento de CCP com a sarjeta	27
Figura 3.12 -	Água empoçada na junta do pavimento de CCP com a sarjeta	28
Figura 3.13 -	Vegetação rasteira impedindo o escoamento lateral e provocando o acúmulo de água na borda do pavimento	29
Figura 3.14 -	Detalhe da vegetação rasteira na borda do pavimento	29
Figura 3.15 -	Vegetação rasteira impedindo o escoamento lateral e provocando o acúmulo de água na borda do pavimento	30

Figura 3.16 -	Situação de obra com acúmulo de água contíguo ao pavimento	31
Figura 3.17 -	Desenho esquemático do equipamento de ensaio proposto por FARH, FREER-HEWISH e CARSON (Farh, Freer-Hewish e Carson, 1998)	32
Figura 3.18 -	Desenho esquemático da ascensão capilar	34
Figura 3.19 -	Capilaridade em solos compactados na energia normal (Elfino e Davidson, 1987)	35
Figura 3.20 -	Ação da água livre em estruturas de pavimentos de CA sob carregamento dinâmico	38
Figura 3.21 -	Ábaco para estimativa do Dano Relativo em função do Módulo de Resiliência do Subleito (AASHTO, 1993)	48
Figura 3.22 -	Variação do teor de água não congelada no pavimento (Janoo e Shepherd, 2000)	49
Figura 4.1 -	Faixas granulométricas recomendadas pelas agências para camada drenante (Baldwin, 1987)	54
Figura 4.2 -	Posicionamento da camada drenante e dos drenos de borda	62
Figura 4.3 -	Posicionamento da declividade e da direção do escoamento	65
Figura 4.4 -	Estimativa do coeficiente de permeabilidade de faixa estreita sem finos (Cedergren, 1973)	72
Figura 4.5 -	Estimativa do coeficiente de permeabilidade em materiais granulares (Moulton, 1990)	74
Figura 4.6 -	Estimativa do coeficiente de permeabilidade da camada drenante e da camada de bloqueio (DNER, 1996)	75

Figura 4.7 -	Ábaco de Moulton para determinação da espessura da camada drenante (Moulton, 1990)	81
Figura 4.8 -	Ábaco para determinação da espessura mínima da camada de drenagem (FHWA, 1998)	84
Figura 4.9 -	Fator Tempo (T) em função do Fator Declividade (S_l)	86
Figura 5.1 -	Possibilidades de implantação do geocomposto (Christopher, Zhao e Hayden, 2002)	98
Figura 6.1 -	Mapa de Situação	101
Figura 6.2 -	Vista geral do trecho experimental	102
Figura 6.3 -	Erosão na borda da pista do trecho experimental expondo a estrutura do pavimento	103
Figura 6.4 -	Marca d'água indicando ocorrência de alagamento recente contíguo à estrutura do pavimento – vista 1	104
Figura 6.5 -	Marca d'água indicando ocorrência de alagamento recente contíguo à estrutura do pavimento – vista 2	105
Figura 6.6 -	Desenho esquemático dos pontos de análise	107
Figura 6.7 -	Levantamento da bacia de deflexão no bordo direito	107
Figura 6.8 -	Deflexões no ponto de aplicação da carga (D_0)	108
Figura 6.9 -	Deflexões a 20 cm do ponto de aplicação da carga (D_{20})	109
Figura 6.10 -	Deflexões a 30 cm do ponto de aplicação da carga (D_{30})	109
Figura 6.11 -	Deflexões a 45 cm do ponto de aplicação da carga (D_{45})	110
Figura 6.12 -	Deflexões a 65 cm do ponto de aplicação da carga (D_{65})	110
Figura 6.13 -	Deflexões a 90 cm do ponto de aplicação da carga (D_{90})	111

Figura 6.14-	Deflexões a 120 cm do ponto de aplicação da carga (D_{120})	111
Figura 7.1 -	Divisão das seis regiões climáticas dos Estados Unidos (AASHTO, 1993)	114
Figura 9.1 -	Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação < 1%	153
Figura 9.2 -	Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação de 1% a 5%	154
Figura 9.3 -	Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação de 5% a 25%	154
Figura 9.4 -	Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação > 25%	155
Figura 9.5 -	Variações na espessura do CA em função tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade excelente	155
Figura 9.6 -	Variações na espessura do CA em função tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade boa	156
Figura 9.7 -	Variações na espessura do CA em função tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade regular	156
Figura 9.8 -	Variações na espessura do CA em função tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade ruim	157

Figura 9.9 -	Variações na espessura do CA em função tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade péssima	157
Figura 9.10 -	Variações na espessura de CA em função da variação do coeficiente de drenagem	158
Figura 10.1 -	Esquema estrutural e parâmetros considerados	163
Figura 10.2 -	Deflexão em função das variações na espessura da capa de CA – Módulo da base de 350 MPa	165
Figura 10.3 -	Deflexão em função das variações na espessura da capa de CA – Módulo da base de 300 MPa	165
Figura 10.4 -	Deflexão em função das variações na espessura da capa de CA – Módulo da base de 150 MPa	166
Figura 10.5 -	Deflexão em função das variações na espessura da capa de CA – Módulo da base de 75 MPa	166
Figura 10.6 -	Espessura necessária de CA em função dos Coeficientes de Drenagem.	168

LISTA DE ABREVIATURAS

a.C.	-	Antes de Cristo
AASHO	-	American Association of State Highway Officials
AASHTO	-	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABCP	-	Associação Brasileira de Cimento Portland
BCA	-	British Cement Association
CA	-	Concreto Asfáltico
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	-	California Bearing Ratio
CBUQ	-	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	-	Concreto de Cimento Portland
DER/SP	-	Departamento de Estradas de Rodagem – São Paulo
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DOT	-	Department of Transportation
ELSYM-5	-	Elastic Layered System 5
EUA	-	Estados Unidos da América
FHWA	-	Federal Highway Administration
GC	-	Grau de Compactação
HRB	-	Highway Research Board
ISC	-	Índice de Suporte Califórnia

IG	-	Índice de Grupo
IP	-	Índice de Plasticidade
IPR	-	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LL	-	Limite de Liquidez
LP	-	Limite de Plasticidade
LTPP	-	Long Term Pavement Performance
MCT	-	Miniatura Compactado Tropical
NCHRP	-	National Cooperative Highway Research Program
PCA	-	Portland Cement Association
PMSP	-	Prefeitura Municipal de São Paulo
PRO	-	Procedimento
SN	-	Structural Number
SVP	-	Secretaria de Vias Públicas
TRB	-	Transportation Research Board
US	-	United States
USACE	-	United States Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_i	-	Índice de Infiltração do Projeto
I_c	-	Índice de Infiltração de Trincas
N_c	-	Número de Trincas, em juntas longitudinais, que permitem a entrada d'água
W	-	Largura da camada de base granular sujeita à infiltração
W_c	-	Número de trincas transversais que permitem a entrada d'água
C_s	-	Espaçamento entre trincas transversais
K_p	-	Coefficiente de permeabilidade da camada de rolamento
C	-	Coefficiente definido pelas tabelas 3.1 e 3.2 em função do volume de tráfego e das características climáticas regionais
$f(N)$	-	Função que depende do tipo de revestimento e do número de faixas
u_f	-	Dano relativo
M_R	-	Módulo resiliente do subleito
Σ	-	Somatório
g	-	Declividade longitudinal
s	-	Declividade transversal
i	-	Gradiente hidráulico
L	-	Largura da plataforma
X	-	Extensão na direção longitudinal que a água percorre até deixar a estrutura do pavimento

D	-	Maior distância que a água percorre na direção da declividade resultante, até deixar a estrutura do pavimento
P	-	Porcentagem, em peso, que passa na peneira de abertura d
d	-	Abertura da peneira em análise
D	-	Diâmetro efetivo do agregado
K	-	Coefficiente de permeabilidade
c	-	Constante que varia de 90 a 120, normalmente adotada igual a 100
D ₁₀	-	Diâmetro efetivo
D _{15 FILTRO}	-	Diâmetro cujo 15% dos agregados constituintes do material do filtro, em massa, possuem diâmetros inferiores
D _{15 SOLO}	-	Diâmetro cujo 15% das partículas do solo, em massa, possuem diâmetros inferiores
D _{5 FILTRO}	-	Diâmetro cujo 5% dos agregados constituintes do material do filtro, em massa, possuem diâmetros inferiores
D ₂	-	Diâmetro cujo 2% dos agregados, em massa, possuem diâmetros inferiores
D ₁₅	-	Diâmetro cujo 15% dos agregados, em massa, possuem diâmetros inferiores
D ₈₅	-	Diâmetro cujo 85% dos agregados, em massa, possuem diâmetros inferiores
P ₂₀₀	-	Porcentagem do material que passa na peneira 200
n	-	Porosidade
γ_d	-	Densidade seca aparente

Q	-	Vazão na seção crítica
k	-	Coeficiente de permeabilidade da camada drenante
A	-	Área da seção crítica
q_i	-	Índice de infiltração de projeto
h	-	Espessura da camada drenante
L_R	-	Extensão máxima percorrida pela água na direção resultante
q_i	-	Volume de água que infiltra através da superfície do pavimento determinado segundo equação 3.1
S_R	-	Declividade resultante
U	-	Porcentagem de drenagem
S_1	-	Fator de declividade
L	-	Largura da camada granular a ser drenada
T	-	Fator tempo
t	-	Tempo para drenagem da porcentagem U
n_e	-	Porosidade efetiva do material granular
m	-	Fator “m”
n_0	-	Porosidade efetiva da camada drenante
V	-	Velocidade de escoamento
R_H	-	Raio hidráulico
E_1	-	Módulo de resiliência da camada de rolamento
E_2	-	Módulo de resiliência da camada de base

E_3	-	Módulo de resiliência da camada do subleito
W_{18}	-	Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 82 kN
Z_R	-	Desvio padrão da distribuição normal para R% de confiabilidade
R	-	Porcentagem de confiabilidade
S_0	-	Desvio padrão do projeto
SN	-	Número estrutural
ΔPSI	-	Variação do índice de serventia pretendida para o período de projeto
m_n	-	Coefficiente de drenagem
a_n	-	Coefficiente estrutural da camada
D_n	-	Espessura da camada
H_t	-	Espessura total do pavimento
N	-	Número equivalente de solicitações do eixo padrão de rodas duplas de 82 kN
FR	-	Fator climático regional
R^2	-	Coefficiente de correlação
FS	-	Fator de correção sazonal
t_{50}	-	Tempo necessário para drenagem de 50% da água livre
L	-	distância máxima que a água percorre para deixar a estrutura do pavimento
$\tan \alpha$	-	declividade da camada drenante
H	-	espessura da camada de base drenante

H_{ref}	-	espessura da camada de reforço
D_p	-	Deflexão característica levantada na pista
D_{adm}	-	Deflexão admissível
F_d	-	Fator de drenagem
C_d	-	Coeficiente de drenagem
h_1	-	Espessura de CA
h_2	-	Espessura de base granular
h_t	-	Espessura total segundo DNER
Δ	-	Redução da deflexão requerida
H_{td}	-	Espessura total corrigida de pavimento em termos de material granular para proteger o subleito
H_{20d}	-	Espessura total corrigida de pavimento em termos de material granular para proteger a sub-base
H_{20}	-	Espessura total de pavimento para proteger a camada de sub-base
m_i	-	Coeficiente de drenagem da AASHTO

INFLUÊNCIA DA DRENAGEM SUBSUPERFICIAL NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLICOS

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Inúmeros trabalhos indicam que desde o início do século XIX os projetistas rodoviários já haviam constatado que a água em excesso na estrutura do pavimento reduzia sua vida útil, processo este evidenciado pelo acelerado surgimento de defeitos funcionais e estruturais nos pavimentos não drenados.

É grande o número de engenheiros e projetistas que tem defendido a idéia de prever-se a rápida e efetiva drenagem do pavimento objetivando a redução dos danos causados pelas águas livres associadas às solicitações impostas pelo tráfego.

Muito se evoluiu em termos de tecnologia dos pavimentos nos últimos anos. Os engenheiros rodoviários tem empregado novos materiais e equipamentos, novos procedimentos de dimensionamento e técnicas construtivas, envolvendo um grande número de alternativas, tanto na fase de projeto quanto na fase de implantação das obras viárias. Porém, ainda não existe um consenso no tratamento a ser dado à estrutura do pavimento com a finalidade de preveni-la do efeito nocivo das “águas livres”, principalmente quando submetidas em conjunto com as ações das cargas do tráfego.

Conforme verificado em bibliografias nacionais e estrangeiras e, apresentado nos capítulos que seguem, a infiltração de água incontrolada nos vários componentes da estrutura do pavimento são responsáveis por desempenhos insatisfatórios em pavimentos de CA e de CCP. Em geral, os efeitos adversos são manifestados em forma de trilhas de roda e trincamentos por fadiga, nos pavimentos asfálticos; e trincamentos e escalonamentos prematuros, nos pavimentos de cimento portland, acarretando a antecipada redução do nível de serventia.

FWA (1987) analisou o pavimento de uma rodovia localizada em região de clima tropical úmido que foi exposto a uma precipitação de 46 mm distribuídos em 2 horas de duração. O autor constatou que após 8 horas decorridas do término da chuva, algumas trincas apresentavam surgência de água e de finos e, mesmo após 24 horas muitas trincas do pavimento ainda apresentavam excesso de umidade, principalmente as que possuíam abertura superior a 0,5 mm.

Segundo muitos autores, a água livre no interior do pavimento constitui a principal causa de defeitos em sua estrutura e, conseqüentemente, em sua superfície.

Renomados métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, já consideram a influência das condições de drenagem quando do projeto destas estruturas, tanto no que se refere à implantação de sistemas de drenagem subsuperficiais, quanto na determinação dos materiais a serem utilizados e das espessuras das camadas estruturais dos pavimentos.

No Brasil, verificou-se que procedimentos antigos de dimensionamento não mais utilizados atualmente preconizavam considerações acerca da pluviosidade característica dos locais onde os pavimentos seriam implantados, porém, com o passar dos anos e com a utilização de critérios modernos de dimensionamento, estas considerações foram resumidas a simples comentários, passando a não ter qualquer influência na estrutura dimensionada.

O presente trabalho foi desenvolvido com a intenção de avaliar as considerações relacionadas à drenagem inadequada no desempenho do pavimento, tanto no meio técnico nacional quanto internacional, propondo as modificações julgadas adequadas para o procedimento de dimensionamento utilizado no país.

Para tanto, foram desenvolvidas pesquisas sobre um segmento rodoviário experimental, localizado no interior de estado de São Paulo, onde avaliou-se a influência da infiltração de água no desempenho estrutural do pavimento.

Paralelamente, foi desenvolvida uma análise teórica com modelos matemáticos que representam os métodos de dimensionamento freqüentemente utilizados no país,

quanto a sensibilidade da vida útil do pavimento em relação às variações dos parâmetros estruturais e condições de suporte.

Avaliando-se os resultados obtidos pelas análises desenvolvidas, propõe-se a inclusão de um Fator de Ajuste de Drenagem, (Fd) na metodologia de dimensionamento de pavimentos asfálticos preconizada pelo DNER, em função da qualidade do sistema de drenagem subsuperficial e das características dos materiais utilizados para compor suas camadas estruturais.

1.2. Apresentação do Trabalho

Além da introdução, este trabalho é constituído de mais 11 capítulos estruturados da seguinte maneira:

2. Objetivos do Trabalho

Neste capítulo são apresentados os principais objetivos do trabalho envolvendo tanto os aspectos teóricos quanto práticos.

3. A Água na Estrutura do Pavimento

São apresentadas as principais fontes de infiltração d'água, bem como os principais problemas causados pelo excesso de água na estrutura dos pavimentos, descrevendo-se os mecanismos causadores de danos mais relevantes.

4. Sistema de Drenagem Subsuperficial

Inicialmente são ilustrados os principais componentes dos sistemas de drenagem subsuperficial, sendo em seguida, expostas as metodologias de dimensionamento hidráulico destes componentes mais recomendadas no meio técnico internacional.

5. *Concepção dos Pavimentos Quanto à Drenagem*

São apresentadas considerações acerca da importância do dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem subsuperficial, expondo casos práticos onde a simples implantação de drenos de pavimento não apresenta quaisquer benefícios ao desempenho, mesmo tendo em vista a incompatibilidade de vazões e continuidade de fluxos entre os diversos dispositivos componentes do sistema drenante.

6. *Levantamento Deflectométrico Realizado no Trecho Experimental*

No capítulo 6 são expostos os procedimentos e resultados obtidos através de inventário efetuado em um trecho experimental, com extensão de 840 m de pavimento rodoviário, onde foram avaliadas as variações nas bacias de deflexão em função do posicionamento transversal ao eixo da pista, logo após a ocorrência de um período com elevadas precipitações. Com base nos dados deflectométricos de campo determinaram-se, por retroanálise, os módulos resilientes das diversas camadas constituintes do pavimento.

7. *As Considerações da Drenagem nos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos*

É apresentada uma revisão bibliográfica dos métodos de dimensionamento de pavimentos novos, rodoviários e urbanos, utilizados no país, bem como, de procedimentos consagrados de dimensionamento de reforços estruturais de pavimentos, visando as considerações destes relacionadas ao efeito da drenagem no dimensionamento de pavimentos asfálticos.

Esta revisão incluiu, também, alguns dos principais métodos utilizados pelo meio técnico internacional.

8. *Procedimentos Utilizados no Desenvolvimento dos Coeficientes de Drenagem*

Expõem-se as metodologias utilizadas pelos métodos de dimensionamento que consideram o efeito do excesso de umidade na estrutura do pavimento, no desempenho estrutural deste.

9. *Análise de Sensibilidade de Procedimentos que Consideram o Efeito da Drenagem no Desempenho dos Pavimentos de Concreto Asfáltico*

É apresentada a análise de sensibilidade dos procedimentos que consideram o efeito do excesso de umidade no desempenho estrutural dos pavimentos.

10. *Sugestão de Adaptação do Método de Dimensionamento Vigente no País*

Neste capítulo é proposta a inclusão na metodologia preconizada pelo DNER de um Fator de Ajuste de Drenagem, F_d , no dimensionamento dos pavimentos asfálticos, em função da qualidade do sistema de drenagem subsuperficial e da susceptibilidade dos materiais utilizados na estrutura do pavimento à variações no teor de umidade.

Apresenta-se também, a metodologia e os estudos para calibração utilizados para a fixação destes Fatores.

11. *Conclusões e Recomendações*

São apresentadas as conclusões e recomendações formuladas durante o desenvolvimento deste trabalho, visando a continuidade das pesquisas nesta área de interface da mecânica dos pavimentos com a drenagem destas estruturas que freqüentemente têm trazido rupturas precoces e grandes prejuízos aos órgãos e empresas administradores de pavimentos.

12. Referências Bibliográficas

São indicadas as publicações consultadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos deste trabalho podem ser resumidos da seguinte maneira:

- Levantar na literatura existente os métodos e procedimentos de dimensionamento estrutural que consideram o efeito da drenagem.
- Analisar outros procedimentos e dispositivos que vem sendo adotados no exterior para combater o efeito deletério da presença d'água no pavimento, tais como a previsão de sistemas de drenagem subsuperficial.
- Efetuar estudo de sensibilidade das considerações de drenagem no método de dimensionamento da AASHTO para pavimentos flexíveis.
- Avaliar a influência das condições de drenagem subsuperficial no desempenho dos pavimentos através da medição de deflexões e retroanálise dos módulos resilientes em estrutura sujeita a saturação.
- Propor fatores de ajuste devido à drenagem no método vigente no país para corrigir a espessura total da estrutura para pavimentos mal drenados e sujeitos ao efeito danoso da presença d'água.

3. A ÁGUA NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

3.1. Breve Histórico

Os construtores de estradas da antiguidade sabiam que a água é o maior inimigo dos pavimentos estáveis e duráveis. Os antigos romanos, que iniciaram a construção da rede viária de cerca de 80.000 km no ano de 312 a. C., sabiam dos efeitos danosos da água e procuraram manter suas estradas acima do nível dos terrenos circunvizinhos. Além de construírem estas vias com seções espessas, eles comumente as proviam de uma camada de areia sobre o leito e sobre a primeira camada de pedras lamelares que geralmente eram cimentadas entre si. A durabilidade destas estradas está provada pelo fato de que muitas delas ainda existem (Cedergren, 1973).

Pouco progresso houve nos fundamentos do processo construtivo nos vinte séculos que se seguiram à construção viária do Império Romano, até que Tresaguet, Metcalf, Telford e McAdam, na primeira metade do século XIX, introduziram importantes melhoramentos nos métodos construtivos viários até então vigentes. Um dos mais importantes princípios que eles “redescobriram” foi a necessidade de se manter os leitos viários praticamente secos.

MOULTON (1990) concluiu ser muito difícil precisar a data em que os antigos construtores tomaram ciência da necessidade de um adequado sistema de drenagem subsuperficial. Entretanto, há evidências de que esta necessidade foi sentida assim que tiveram início as construções formais de rodovias. Certamente, em meados do século XVIII, já havia sido compreendido que um sistema de drenagem subsuperficial adequado era absolutamente necessário para que o pavimento apresentasse um desempenho satisfatório ao longo do tempo.

Segundo CEDERGREN, Tresaguet e McAdam apresentaram não somente a total compreensão do problema, mas também uma tentativa de incorporar no projeto de rodovias parâmetros para garantir a remoção da água das estruturas do pavimento, bem como do subleito.

Em 1820 John L. McAdam fez sua freqüentemente citada declaração ao “*London Board of Agriculture*”:

“As estradas nunca poderão ser seguramente construídas, até que os seguintes princípios sejam completamente entendidos, admitidos e utilizados: é o solo natural que realmente suporta o peso do tráfego; enquanto este solo puder ser mantido seco, poderá suportar qualquer peso sem deformações importantes ... se passar água através da estrada e saturar o solo natural, esta, qualquer que seja sua espessura, perderá sua capacidade de suporte e se despedaçará ... A opinião errônea, e tão tenazmente arraigada, de que a colocação de uma grande quantidade de pedras sob as estradas, remediará as grandes deformações na argila muito úmida ou outros solos moles, ou, em outras palavras, que as estradas poderão ser tornadas suficientemente resistentes, artificialmente, para suportar as pesadas carruagens enquanto o subleito estiver com elevada umidade e, por estes meios, evitar a inconveniência do solo natural que recebe a água das chuvas ou de outras fontes, produziu a maioria dos defeitos das estradas na Grã-Bretanha”.

A declaração feita por McAdam na primeira metade do século XIX apresenta os conhecimentos que os estudiosos da época tinham sobre o melhor desempenho dos pavimentos bem drenados. Deve-se considerar, porém, que na época desta declaração os veículos que solicitavam os pavimentos possuíam rodas rígidas e estreitas que, em função de sua reduzida área de contato, aplicavam tensões elevadas na superfície do pavimento. Outro fator a ser considerado é que as estradas, em sua maioria, tinham a camada superficial e as demais camadas estruturais constituídas por solo ou por mistura de solo com agregado.

A localização destes pavimentos também deve ser ponderada, pois são característicos de regiões de clima temperado com solos que apresentam baixa capacidade de suporte e elevada expansão quando saturados, reduzindo assim, drasticamente sua capacidade de suporte. O congelamento do subleito, característico destas regiões, através da formação de lentes de gelo e do conseqüente aumento de volume e do degelo, provocam a saturação do subleito e da estrutura do pavimento, conduzindo à elevada redução na capacidade de suporte observada.

Outra característica destas regiões é a ocorrência de uma reduzida espessura de solo sobre o leito rochoso e, como conseqüência, o lençol freático localizado próximo à

superfície, facilitando a ascensão d'água por capilaridade, por evaporação e pela sua própria elevação.

Com a análise conjunta destes fatores conclui-se que variações relativamente pequenas da altura do lençol freático podem provocar, na estrutura do pavimento, condições desfavoráveis de umidade que, por ser constituída por solo de baixa qualidade, provocará o precoce aparecimento de defeitos na superfície da estrada.

Mesmo sendo muito respeitada, a colocação de McAdam, realizada em 1820, deve ser reavaliada para aplicação nos dias de hoje, quando se empregam novos materiais e novas tecnologias construtivas, principalmente em regiões de solos tropicais, onde se encontram espessas camadas de solo sobre o leito rochoso e solos superficiais de boa qualidade para serem utilizados nas estruturas dos pavimentos.

Harry R. Cedergren, em 1973, publicou *“Drainage of Highway and Airfield Pavements”*. Neste trabalho são apresentados inúmeros relatos de insucessos devido à deficiência no sistema de drenagem em pavimentos americanos, resultados de estudos desenvolvidos pelo autor defendendo a implantação de um sistema de drenagem adequado, tanto no que se refere à drenagem superficial quanto à subsuperficial, sendo também proposta uma metodologia para o dimensionamento de sistema de drenagem do pavimento.

A FHWA publicou em 1980 o *“Highway Subdrainage Design”* de autoria de Moulton, onde são apresentados novos conceitos para o dimensionamento da drenagem subsuperficial do pavimento, como por exemplo, a quantificação do volume de água que infiltra pela superfície do pavimento.

Em 1986 a AASHTO fez uso dos conceitos propostos por Moulton na metodologia proposta para o dimensionamento da drenagem interna da estrutura do pavimento.

Na revisão da publicação *“Highway Subdrainage Design”* em 1990 a FHWA mantém a metodologia anterior, apenas adicionando um fator para consideração da porosidade da camada superficial no cálculo do volume de água que infiltra na estrutura do pavimento.

O relatório FHWA-RD-97-101 (1997), publicado com base no *Long-Term Pavement Performance* (LTPP), contendo os estudos desenvolvidos pela FHWA desde 1989 e programados para 20 anos, constata que um bom sistema de drenagem tem influência direta no desempenho da estrutura de pavimentos em serviço na América do Norte.

3.2. Infiltração D'Água

Os pavimentos são estruturas que normalmente apresentam uma grande área superficial exposta à infiltração de águas provenientes de várias fontes. Entre elas pode-se citar:

- Infiltração através de superfícies permeáveis, juntas, trincas ou fissuras.
- Infiltração lateral de águas acumuladas em canteiros, acostamentos não revestidos e sarjetas não estanques.
- Fluxos d'água ascendentes, provenientes de lençol d'água elevado, nascente e enchente de rios.
- Sucção capilar.
- Condensação do vapor d'água, como resultado das variações de temperatura e da pressão atmosférica.

O desenho esquemático, apresentado na figura 3.1, a seguir ilustra o exposto anteriormente:

Figura 3.1: Diversas formas de infiltração de água na estrutura do pavimento.

A quantidade de água resultante da condensação de vapores dispersos no interior da estrutura dos pavimentos é desprezível quando comparada com as oriundas das demais fontes.

Segundo MOULTON (1990), embora a movimentação d'água no estado de vapor seja objeto de grande número de estudos, a quantidade de água envolvida neste processo é relativamente muito reduzida, não trazendo alterações significativas no desempenho das estruturas dos pavimentos.

As demais fontes de infiltração apresentadas fornecem volumes de água suficientes para gerar água livre dentro da estrutura dos pavimentos. Estas águas, como o próprio nome diz, têm movimentação livre dentro dos pavimentos obedecendo apenas às leis da hidráulica.

São as águas livres as responsáveis pela degradação da estrutura do pavimento, relacionadas à variação do teor de umidade (MOULTON, 1990).

Dentre os processos de infiltração d'água indicados anteriormente, os de maior relevância no desempenho dos pavimentos são apresentados a seguir mais detalhadamente.

3.2.1. Infiltração D'Água Através da Superfície

A maior fonte de águas que penetram nas estruturas dos pavimentos são as precipitações, podendo ocasionar infiltrações tanto pela superfície quanto pelos bordos dos mesmos (MOULTON, 1990).

Neste item serão tratadas apenas as infiltrações que ocorrem pela superfície do pavimento. As infiltrações que ocorrem pelos bordos serão tratadas no item seguinte.

As figuras apresentadas a seguir ilustram algumas situações encontradas em rodovias brasileiras que propiciam a infiltração através da superfície. Junto com as figuras são apresentadas as observações pertinentes ao tema do trabalho.

Figura 3.2: Vegetação em trinca no revestimento betuminoso.

Figura 3.3: Trincamento excessivo do revestimento betuminoso.

Figura 3.4: Panela oriunda do estado avançado de trincamento do revestimento betuminoso.

Figura 3.5: Escoamento d'água canalizado pelas trilhas de roda sobre a superfície trincada.

Embora os danos causados pela infiltração de água no pavimento não apareçam instantaneamente, a água em excesso exerce influência sobre o desempenho dos materiais constituintes da estrutura do pavimento que, com o passar do tempo são convertidos em perda de serventia.

A infiltração das águas superficiais, em um pavimento mal drenado, pode, eventualmente, reduzir a vida útil deste pavimento através de um processo gradual, e durante os primeiros anos é possível que seus efeitos não sejam notados. A única evidência externa, por vários anos, poderão ser resíduos secos, apresentando-se como manchas junto às trincas, juntas e sobre os acostamentos, além do desnivelamento das juntas e trincas.

Em pavimentos asfálticos, as infiltrações iniciais ocorrem na junta entre a pista de rolamento e o acostamento, nas juntas de construção da camada asfáltica e, com o passar do tempo, a camada superficial começa a apresentar trincas que também contribuem para a ocorrência deste fenômeno (MOULTON, 1990).

Segundo RIDGEWAY (1976), a quantidade de água que infiltra através da superfície do pavimento é função da capacidade de vazão das trincas ou juntas, da quantidade de trincas, da área que drena cada trinca ou junta e da intensidade e duração das chuvas.

A quantidade d'água que infiltra pela superfície do pavimento, em função das variáveis envolvidas no processo, torna-se de difícil mensuração pois, além dos fatores apresentados por Ridgeway, esta também depende da declividade superficial, da permeabilidade da camada de base e da capacidade de remoção desta água pelo sistema de drenagem subsuperficial, caso existente.

A quantidade e a abertura das trincas que surgirão na superfície do pavimento é um fenômeno interativo que depende da intensidade das solicitações do tráfego, das características dos materiais empregados e do desempenho da estrutura implantada, tornando sua previsão extremamente imprecisa quando da execução do projeto.

Precipitações com grande intensidade apresentam, normalmente, curta duração e mesmo com o fornecimento de água abundante, grande parte dela escoar pela superfície do pavimento ao invés de penetrar na estrutura, devido à permeabilidade relativamente baixa desta. Já as precipitações de menor intensidade ocorrem por períodos mais longos, fornecendo suprimento de água constante para infiltração, e por longos períodos de tempo, o que favorece a infiltração de um maior volume de água mesmo que a estrutura do pavimento apresente reduzida permeabilidade.

Portanto, com relação à infiltração de água através da superfície do pavimento, são mais críticas as precipitações com intensidade de moderada a baixa e que apresentam períodos de incidência longos, do que aquelas de grande intensidade, porém com curta duração.

Diferentemente do que ocorre no processo de dimensionamento dos dispositivos de drenagem superficial ou subsuperficial (ver item 4.2 adiante), para a infiltração d'água pela superfície, a declividade longitudinal tem influência no volume total de água que penetra na estrutura, pois havendo inclinação longitudinal a água escoar em direção oblíqua à borda do pavimento, percorrendo uma distância maior e

conseqüentemente, sendo exposta a uma quantidade maior de trincas propiciando assim um maior índice de infiltração.

A permeabilidade da camada de base e a capacidade de remoção da água pelo sistema de drenagem subsuperficial também exercem grande influência no volume de água que infiltra através da superfície. Quando este sistema drenante não for capaz de remover toda a água que infiltra no pavimento, ocorre a saturação da estrutura que impede a entrada de novos fluxos d'água.

A infiltração d'água pela superfície também é função da correta execução dos procedimentos de manutenção que são de difícil previsão na época do projeto, como, por exemplo, a selagem das trincas nos pavimentos de CA, ou resselagem das juntas nos pavimentos de CCP.

Em função da grande amplitude de variação dos parâmetros que influenciam nas infiltrações, pouco se sabe até hoje sobre a real quantidade de água que penetra através da superfície dos pavimentos.

CEDERGREN, em 1972, realizou um experimento em vários aeroportos dos Estados Unidos onde procurou quantificar a água que infiltrava por um segmento de junta entre duas placas de pavimento rígido. O autor concluiu que o pavimento era capaz de permitir uma infiltração média equivalente a uma precipitação de 475 mm/dia por metro de junta.

Este volume é bastante elevado, pois, a título ilustrativo, a precipitação anual em Illinois, na região onde foi realizado o *AASHO Road Test*, foi da ordem de 700 mm/ano.

Porém, há um consenso de que o volume de água que infiltra através da superfície do pavimento está íntima e diretamente relacionado com a pluviosidade local.

MOULTON (1990) sugere que seja adotado o seguinte procedimento proposto por Ridgeway para determinação da quantidade de água que infiltra através da superfície do pavimento.

$$Q_i = 3,53 \cdot 10^{-6} \cdot I_c \left[\frac{N_c}{W} + \frac{W_c}{WC_s} \right] + k_p \quad (3.1)$$

Onde:

Q_i = Índice de infiltração de projeto ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ de camada drenante).

I_c = Índice de infiltração das trincas, recomendado que seja igual a $2,58 \times 10^{-6}$ ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ de trinca, ou juntas).

N_c = Número de trincas, ou juntas longitudinais que permitem a entrada d'água.

W = Largura da camada de base granular sujeita à infiltração (m).

W_c = Número de trincas transversais que permitem a entrada d'água.

C_s = Espaçamento entre as trincas transversais. (m)

k_p = Coeficiente de permeabilidade da camada de rolamento ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$).

Neste procedimento, para pavimentos de CCP ou de CA denso novos, k_p apresenta valores próximos a zero, podendo ser desprezado.

O Apêndice AA da AASHTO (1986), assim como a FHWA recomendam o procedimento indicado por Moulton (1990), apresentado anteriormente, para a determinação do volume de água que infiltra através da superfície do pavimento.

CEDERGREN (1973) sugere que a intensidade da precipitação de projeto proposta pela FHWA seja multiplicada por um índice de infiltração, partindo do pressuposto de que parte da água que cai sobre o pavimento escoar pela superfície e não infiltra na estrutura. Os valores sugeridos pelo autor para estes índices estão apresentados a seguir.

- Para pavimento de CA, coeficiente de infiltração de 0,33 a 0,50.
- Para pavimento de CCP, coeficiente de infiltração de 0,50 a 0,67.

SANTAMARÍA et al (1998) apresentam proposta de implantação de uma nova metodologia para a estimativa do fluxo de água que infiltra através da superfície dos pavimentos na Espanha.

A metodologia propõe a divisão do território espanhol em regiões que apresentam características climáticas semelhantes, conforme ilustrado na figura 3.6, e, a divisão do volume de tráfego em 5 faixas, conforme apresentado na tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Faixas de tráfego (Santamaría et al, 1998)

Faixas de Tráfego	Volume Diário Médio de Veículos Pesados (VDMp)
T 0	$(\text{VDMp}) \geq 2.000$
T 1	$2.000 > (\text{VDMp}) \geq 800$
T 2	$800 > (\text{VDMp}) \geq 200$
T 3	$200 > (\text{VDMp}) \geq 50$
T 4	$(\text{VDMp}) < 50$

Figura 3.6: Divisão das regiões climáticas (Santamaría et al, 1998)

O volume de água que infiltra através da superfície do pavimento é calculado pela equação 3.2.

$$Q = C \times f(N) \quad (3.2)$$

Onde:

Q = Volume de água que infiltra por metro de pista ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)

C = Coeficiente definido pelas tabelas 3.1 e 3.2 em função do volume de tráfego e das características climáticas regionais.

$f(N)$ = Função que depende do tipo de revestimento e do número de faixas, apresentada na tabela 3.3.

Tabela 3.2: Valores da função C . (Santamaría et al, 1998)

Zona Climática	Categoria de Tráfego				
	T 0	T 1	T 2	T 3	T 4
Z 1	1,5	1,4	1,3	1,1	1,0
Z 2	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
Z 3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0
Z 4	1,1	1,1	1,1	1,0	-
Z 5	1,0	1,0	1,0	-	-

Tabela 3.3: Valores da função $f(N)$. (Santamaría et al, 1998)

Tipo do Revestimento	Número de Faixas (N)			
	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4
CCP	0,03	0,05	0,06	0,08
CA	0,02	0,04	0,05	0,06

No Brasil, ARAÚJO, TUCCI e GOLDENFUM (2000), desenvolveram um estudo no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, objetivando a determinação da taxa de infiltração das águas provenientes de chuvas em diferentes tipos de revestimentos de pavimentos, com vistas à redução do escoamento superficial e a conseqüente redução na frequência e na magnitude das enchentes urbanas.

Neste trabalho os autores apresentam estudo sobre Pavimentos Permeáveis que consiste, basicamente, em um pavimento com superfície que permite a infiltração d'água, armazenando-a em um “reservatório de pedras”, com agregados de 3,8 a 7,6 cm de diâmetro, localizado abaixo da camada de rolamento, reduzindo o escoamento superficial.

Foram estudadas as taxas de infiltração em camadas de rolamento constituídas por solo compactado, concreto, paralelepípedo, blocos maciços pré-moldados de concreto, blocos vazados pré-moldados de concreto e concreto poroso que consiste

basicamente em um concreto comum, porém, sem a fração da areia fina na granulometria dos agregados.

Em função dos objetivos do estudo, torna-se importante considerar as chuvas com grande intensidade que normalmente apresentam curta duração e período de retorno relativamente longo.

Para realização das medições foram utilizadas chuvas artificiais com 10 minutos de duração e intensidade de, aproximadamente, 112 mm, correspondentes a um período de retorno de 5 anos de acordo com as características pluviométricas da região.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4: Valores experimentais de coeficientes de escoamento (Araújo, Tucci e Goldenfum, 2000)

Parâmetro Analisado	Solo-Compactado	Concreto	Bloco de Concreto	Paralelepípedo	Blocos Vazados
Intensidade Simulada (mm/h)	112	110	116	110	110
Chuva Total (mm)	18,66	18,33	19,33	18,33	18,33
Escoamento Total (mm)	12,32	17,45	15,00	10,99	0,5
Coeficiente de Escoamento	0,66	0,95	0,78	0,60	0,03

A tabela 3.4, apresentada no trabalho, não traz os resultados obtidos com concreto permeável, porém, a figura 3.7 a seguir foi extraída do mesmo trabalho e apresenta estes resultados juntamente com os demais.

Figura 3.7: Escoamento superficial observado nas diversas superfícies ensaiadas (Araújo, Tucci e Goldenfum, 2000)

Com base nos resultados apresentados verifica-se que o pavimento de paralelepípedos apresentou um índice de infiltração de 40% contra 22% do bloco pré-moldado de concreto e 97% dos blocos pré-moldados vazados. O pavimento de concreto apresentou um índice de infiltração de apenas 5%, porém este valor foi obtido sobre uma massa contínua de concreto, sem qualquer tipo de junta ou trinca, sabidamente os pontos onde ocorrem a maior parte das infiltrações neste tipo de pavimento.

Nas conclusões do trabalho os autores reconhecem a baixa resistência estrutural dos pavimentos quando expostos a elevados teores de umidade, sugerindo seu uso somente para áreas solicitadas por veículos leves, por exemplo estacionamentos de *shopping centers*.

3.2.2. Infiltração de Água pela Borda do Pavimento

Existem dois mecanismos distintos que influenciam diretamente na infiltração de água pela borda do pavimento. O primeiro é a carga hidráulica que promove o deslocamento da água para regiões com cargas menores. O segundo é a capilaridade, apresentada mais detalhadamente no item 3.2.4, que gera uma tensão de sucção que promove a migração da água de um local com teores de umidade mais elevados, para locais com teores de umidade menores.

Ressalta-se que em rodovias que apresentam greide plano ou em regiões baixas de rodovias que apresentam greide ondulado, devido à reduzida declividade longitudinal e à maior dificuldade que a água encontra para escoar superficialmente, há uma propensão para ocorrência de infiltração pelas bordas do pavimento.

Em rodovias que não possuem acostamento revestido, uma parcela da água que precipita sobre a superfície permeável do acostamento, principalmente se for constituído de solo não compactado, infiltra horizontalmente para o interior da estrutura do pavimento, enfraquecendo-a e, conseqüentemente, reduzindo sua vida útil.

Nas figuras a seguir estão apresentadas algumas situações que evidenciam a ocorrência deste fenômeno.

Figura 3.8: Pavimento danificado em pista com acostamento não revestido, contíguo à região de empoçamento d'água.

Figura 3.9: Empoçamento d'água sobre acostamento não revestido.

Em regiões de corte, onde as canaletas de drenagem superficial não se apresentam com revestimento impermeável, a água que escoar pelo dispositivo de drenagem também infiltra lateralmente, podendo atingir a estrutura do pavimento.

Apesar de menos intensa, a infiltração de água pela borda da estrutura do pavimento também pode ocorrer em rodovias que apresentam acostamentos revestidos. Nos casos em que o acostamento apresenta estrutura diferenciada da pista de rolamento, existe uma maior propensão à ocorrência de trincas longitudinais no revestimento asfáltico na região da interface entre a estrutura do acostamento e a da pista, facilitando a penetração d'água para o interior do pavimento.

Figura 3.10: Empoçamento d'água em acostamento pavimentado.

Outros pontos propícios para este tipo de infiltração são as juntas da camada de rolamento, seja ela em CA ou em CCP, com a sarjeta, a própria sarjeta que muitas vezes encontra-se trincada, e a junta da sarjeta com a guia. A figura 3.11 ilustra a situação em que a camada de rolamento em CCP e a sarjeta se distanciaram, permitindo a infiltração de grande volume de água.

É importante notar que toda a água drenada superficialmente pela plataforma do pavimento escoar por estes locais e, não raramente, devido a consolidações do subleito ou a falhas construtivas, fica empossada permitindo sua infiltração por longos períodos e, após atravessar a camada de rolamento esta água migra horizontalmente para o interior da estrutura do pavimento.

Figura 3.11: Junta do pavimento de CCP com a sarjeta.

Figura 3.12: Água empoçada na junta do pavimento de CCP com a sarjeta.

Existem casos em que a vegetação da região vizinha ao pavimento, devido ao acúmulo de detritos, torna-se mais alta do que a superfície da pista, formando uma barreira para o escoamento superficial da água. Não encontrando saída, a água escoar longitudinalmente pela superfície do pavimento, facilitando sua infiltração através da superfície e promovendo a saturação do solo contíguo ao pavimento e, conseqüentemente, a saturação da estrutura do pavimento.

As figuras 3.13 a 3.15 apresentadas a seguir ilustram o exposto anteriormente.

Figura 3.13: Vegetação rasteira impedindo o escoamento lateral e provocando o acúmulo de água na borda do pavimento.

Figura 3.14: Detalhe da vegetação rasteira na borda do pavimento.

Figura 3.15: Vegetação rasteira impedindo o escoamento lateral e provocando o acúmulo de água na borda do pavimento.

Há casos excepcionais em que alguma intervenção temporária provoca acúmulo de água na região contígua à rodovia ocasionando, conseqüentemente, a elevação do teor de umidade na estrutura da mesma. A figura 3.16 a seguir apresenta uma situação de obra de duplicação de rodovia no interior do estado de São Paulo.

Mesmo sendo uma situação temporária, devido à natureza dos serviços, não raramente a obra se estende por alguns meses. Em função da severidade do problema, das características dos materiais constituintes da estrutura do pavimento e do tráfego solicitante, este aparentemente reduzido período pode ser suficiente para provocar a ruína do pavimento.

Figura 3.16: Situação de obra com acúmulo de água contíguo ao pavimento.

FARH, FREER-HEWISH e CARSON (1998), apresentam um estudo que objetivou a determinação do movimento horizontal da água para o interior da estrutura do pavimento, baseando-se em resultados de ensaios de laboratório e na aproximação teórica apresentada por ZAYANI et al, em 1991.

FARH, FREER-HEWISH e CARSON (1998) apud RICHARDS (1931) apresentou uma equação não-linear para descrever o movimento da água em solos não saturados. Porém, segundo os autores, a solução da equação era bastante complexa devido à grande variação nos coeficientes desta, sendo necessário recorrer-se, quase sempre, a medições experimentais para determinação dos coeficientes da equação.

O trabalho também apresenta um procedimento de ensaio para a determinação da posição do fluxo d'água no interior da estrutura do pavimento, em função do tempo.

De maneira simplificada, a montagem do experimento consiste em uma “caixa” onde o material é compactado em uma câmara e a água é depositada em outra, separada por uma divisória impermeável, conforme apresentado na figura 3.17 a seguir. No

início do ensaio, retira-se a membrana e o fluxo d'água para o interior do material compactado começa a se processar.

Infelizmente, a forma como é realizada a leitura da posição do fluxo dentro do material compactado não é claramente apresentada pelos autores.

Figura 3.17: Desenho esquemático do equipamento de ensaio proposto por FARH, FREER-HEWISH e CARSON (Farh, Freer-Hewish e Carson, 1998).

3.2.3. Fluxos D'Água Ascendentes

Os fluxos d'água ascendentes podem ocorrer de forma contínua ou sazonal, sendo em ambos os casos diretamente influenciados pelas precipitações recentes ocorridas na região.

Em função da gênese do fenômeno, os danos causados à estrutura do pavimento atingem áreas localizadas e bem definidas.

O tratamento destes fluxos deve ser executado pontualmente de maneira a garantir a imunidade estrutural do pavimento.

Cuidados especiais devem ser tomados em obras implantadas na época de seca, quando algumas destas fontes podem encontrar-se temporariamente sem fluxo d'água. Porém, com o início da estação chuvosa os fluxos d'água poderão retornar a uma posição mais elevada, trazendo severos danos à estrutura do pavimento.

3.2.4. Capilaridade

Os vazios existentes no solo, comunicando-se entre si em todas as direções, formam uma rede de tortuosos tubos capilares. Se uma massa de solo nestas condições tem sua porção inferior exposta à água, imediatamente a água subirá pelos vazios até uma altura compatível com a dimensão dos "tubos" capilares. Se estes tubos fossem todos do mesmo diâmetro, a água subiria até uma mesma altura em todos os pontos. Neste caso, o solo seria saturado abaixo do nível d'água e acima também até uma distância h_c . Além da distância h_c , o solo estaria seco, conforme apresentado na figura 3.18 a.

Como os vazios dos solos têm dimensões variáveis de ponto a ponto, a ascensão capilar não é uniforme. Onde os vazios são maiores a ascensão será menor, enquanto que nos pontos onde os vazios são menores a água atingirá maiores alturas. Como consequência, numa pequena zona apenas, imediatamente acima do nível d'água, o solo ficará saturado por capilaridade, figura 3.18.b.

Nas maiores alturas, o solo fica parcialmente saturado, a água preenche apenas os vazios menores, deixando os maiores cheios de ar. A figura 3.18.c apresenta um diagrama com a variação do grau de saturação dos vazios do solo.

Figura 3.18: Desenho esquemático da ascensão capilar

Ressalta-se que, sendo a capilaridade uma grandeza escalar, a mesma atua em todas as direções, inclusive na horizontal onde contribui para que a água que infiltra verticalmente nos acostamentos não revestidos desloque-se para o interior da estrutura do pavimento, sob a faixa de rolamento.

Quando ocorre o rebaixamento do lençol freático em uma massa de solo, uma certa quantidade de água fica retida nos vazios formando meniscos. Da mesma forma fica também retida parte da água de chuva que se infiltra no subsolo. Neste caso, solos como areias finas e siltes podem apresentar um elevado grau de saturação, mesmo a grandes alturas acima do nível d'água. Por esse motivo, os solos nunca são encontrados na natureza totalmente secos, conforme ilustrado na figura 3.18, mas com uma certa quantidade de água retida nos vazios.

ELFINO e DAVIDSON (1987), apresentam resultados da capilaridade medidos em corpos de prova moldados através do ensaio de compactação de Proctor na energia normal, para solos típicos do Estado da Flórida. Os resultados estão apresentados na figura 3.19 a seguir.

Figura 3.19: Capilaridade em solos compactados na energia normal (Elfino e Davidson, 1987)

MOULTON (1990) sugere que a capilaridade ocorre nos poros do solo sobre a linha de saturação devido à ação da tensão superficial. O formato e a altura da região abrangida pela ascensão capilar é função, principalmente, da distribuição granulométrica do solo e da densidade do mesmo.

Ainda segundo a mesma publicação, a água proveniente da ascensão capilar não pode ser drenada pela ação da gravidade. Para controlar a umidade capilar recomenda-se a implantação de uma camada de bloqueio ou camada drenante interceptante.

Em outras palavras, a ascensão capilar depende do tamanho dos vazios do solo e da interligação dos mesmos. A simples instalação de uma camada granular é suficiente para evitar a ocorrência deste fenômeno.

3.3. Os Problemas da Drenagem Inadequada - Mecanismo dos Danos

3.3.1. Considerações Especiais

Os pavimentos possuem grandes áreas expostas às intempéries e ao tráfego. Sob ações combinadas das mudanças de temperatura e das chuvas, e ainda das tensões e deformações causadas pela solicitação do tráfego, surgem vários tipos de ações danosas que aumentam a irregularidade, desagregam o material superficial e, eventualmente, podem conduzir à ruína do pavimento.

Algumas das ações mais prejudiciais que se verificam normalmente na estrutura do pavimento ocorrem mais rapidamente quando há água em excesso nos espaços entre camadas sucessivas dos pavimentos de CA, ou nos poros dessas camadas.

A água livre dentro da estrutura associada às solicitações das cargas das rodas dos veículos que trafegam pela rodovia, se não o mais importante, é um dos fatores que lideram os danos causados à estrutura do pavimento, quase sempre, levando à necessidade de intervenções com custos elevados.

A bibliografia internacional apresenta um grande número de trabalhos relacionando as condições de umidade, a que a estrutura do pavimento está exposta, com a frequência e intensidade dos defeitos que surgem nestas estruturas.

Avaliando-se as conclusões apresentadas nos trabalhos verifica-se uma grande correlação entre a elevação de teor de umidade na estrutura dos pavimentos e o aumento na frequência e na severidade dos defeitos apresentados pelos pavimentos. Entre outros, o estudo apresentado por SARAF, CHOU e MCCULLOUGH (1987) ilustra com muita nitidez esta correlação.

Um trabalho bastante peculiar e que deve ser comentado é o apresentado por HUDSON e FLANAGAN (1987). Neste estudo por eles realizados foram avaliadas 14 seções de pavimentos em serviço localizadas em 5 diferentes estados americanos, sendo que para cada uma das 14 seções avaliadas existia, no mesmo local, uma seção semelhante que nunca foi aberta ao tráfego. O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento destas seções submetidas ao tráfego em comparação com as seções

que estão expostas apenas às variações climáticas. Estas seções foram avaliadas simplesmente pelos aspectos visuais de suas superfícies, não sendo realizada qualquer análise estrutural.

Este trabalho concluiu que a solicitação do tráfego é muito mais determinante na ocorrência de defeitos na superfície do pavimento do que a variação nas condições climáticas locais consideradas isoladamente.

Com relação às conclusões obtidas pelos autores, salienta-se que pavimento algum tem como finalidade resistir apenas às ações de intempéries. O objetivo de uma estrutura de pavimento é, primeiramente, de conferir trafegabilidade e resistir às ações do tráfego, sendo as intempéries um fator agravante destas funções. Fica claro que estas ações consideradas, isoladamente, não provocarão grandes danos às condições de superfícies dos pavimentos, porém, causam o enfraquecimento da estrutura, tornando-a mais sensível à solicitação do tráfego, principal fator para sua deterioração. O referido estudo poderia ter levantado parâmetros estruturais dos pavimentos, onde certamente seria verificado que, mesmo os segmentos de controle não tendo sido jamais solicitados pelo tráfego, poderiam apresentar uma redução nas condições de suporte em função da ação das intempéries.

A razão completa da deterioração e falência dos pavimentos é muito complexa, pois envolve muitos fatores que colaboram na deterioração dos revestimentos de CA, bases e sub-bases, tratadas ou não com material cimentante.

Certos processos de deterioração, sob deformações repetidas, são importantes fatores que contribuem para o trincamento e a destruição dos pavimentos de CA.

Quando a estrutura do pavimento se encontra saturada, seja pela elevação do lençol freático ou por infiltrações, sua capacidade de suportar as solicitações dinâmicas do tráfego é fortemente prejudicada (MOULTON, 1990).

Em pavimentos asfálticos, os primeiros danos ocorrem com o surgimento de poro-pressões elevadas e a conseqüente perda de suporte das camadas não cimentadas de base, sub-base e subleito, conduzindo ao trincamento precoce da camada de rolamento. Na seqüência, as poro-pressões provocam o bombeamento de finos

através das trincas na superfície do pavimento. Conforme apresentado na figura 3.20 a seguir.

Figura 3.20: Ação da água livre em estruturas de pavimentos de CA sob carregamento dinâmico.

Em função da magnitude dos danos causados às estruturas dos pavimentos atribuídos a falhas no sistema de drenagem, foi realizada uma considerável quantidade de pesquisas, estudos especiais e investigações sobre os mecanismos de deterioração e falência dos pavimentos que provavelmente apresentavam esta gênese, dando origem a publicações de muitos relatórios e trabalhos.

Tendo por base alguns destes trabalhos, apresentam-se a seguir os principais mecanismos estudados, oriundos da deficiência do sistema drenante:

- Oxidação do ligante asfáltico;
- Poro-pressão; e
- Perda de suporte.

A oxidação do ligante asfáltico apresenta uma velocidade de degradação do pavimento muito inferior aos outros dois mecanismos. Em função disto, esta não será tratada no presente trabalho, porém merece o desenvolvimento de estudos posteriores abrangendo também os fenômenos físico-químicos envolvidos no processo.

Ressalta-se que os mecanismos apresentados anteriormente são os que se encontram com maior frequência. Além destes, verifica-se na bibliografia uma série de outros mecanismos, sendo alguns deles muito específicos da estrutura do pavimento em que ocorrem, dificultando sua identificação e reforçando a necessidade de se tomar cuidados específicos com a drenagem no pavimento a ser projetado.

FWA (1987) estudou o surgimento de defeitos nos pavimentos, causados pela água, em regiões de clima tropical. Estes estudos foram desenvolvidos sobre pavimentos existentes na Malásia e em Cingapura.

No primeiro estudo, realizado em dezembro de 1985, aproximadamente 1 mês após o início da estação chuvosa, foi verificada a ocorrência de elevações na camada superficial que surgiam por volta das 15:00 horas em dias ensolarados, tendo cerca de 25 cm de diâmetro e de 2 a 4 cm de altura, com uma frequência da ordem de 10 ocorrências a cada 200 m.

Quando estas elevações na capa eram solicitadas pela carga da pisada de uma pessoa voltavam à posição original, tornando a erguer-se em aproximadamente 20 minutos após a retirada da carga.

A estrutura do pavimento era constituída por 23 cm de brita graduada simples e 9 cm de CA denso revestido por 2,5 cm de uma camada de desgaste de graduação aberta. Após 5 anos de serviço, foi realizado um recapeamento com 5 cm de CA denso.

Para investigação do problema foram abertos poços na estrutura do pavimento onde foi constatada a existência de água retida entre a camada de desgaste de graduação aberta e o recapeamento em CA. O grau de trincamento da superfície era praticamente desprezível, pois haviam se passado apenas 5 meses da execução do recapeamento.

Ensaio de permeabilidade realizados sobre a camada composta de concreto asfáltico indicaram a existência de uma elevada permeabilidade entre o recapeamento e a camada de desgaste.

O acostamento da rodovia era constituído por solo laterítico com baixa permeabilidade, da ordem de 10^{-5} cm/s, e em dias de chuva forte permanecia inundada por períodos superiores a 8 horas.

A temperatura diária máxima média, durante o verão, ocorria por volta das 14:00 horas e era de 32 °C, enquanto a temperatura do pavimento chegava a 70 °C.

Após uma extensa análise, FWA (1987) concluiu que a água empoçada no acostamento infiltrava entre a antiga camada de desgaste e o recapeamento. Com o calor excessivo surgia uma pressão causada pela água que evaporava dentro da estrutura do pavimento provocando o descolamento e a elevação da nova camada de rolamento.

Para a restauração do pavimento foi necessária a remoção do recapeamento recém executado e da antiga camada de desgaste de graduação aberta, ao longo de todo o segmento rodoviário.

Outro trabalho bastante interessante foi o realizado por AZEVEDO (1996) onde o autor avaliou a influência da temperatura, no desempenho dos pavimentos e os respectivos danos causados aos veículos. O autor baseou-se nos dados de reparos na suspensão dianteira dos ônibus urbanos que trafegam por 9 linhas diferentes, sendo a maioria destas localizadas no município de São Paulo. Conforme apresentado no referido trabalho, foi constatado um aumento da ordem de 100% na frequência deste tipo de reparo no mês de fevereiro em relação aos meses de maio, junho e julho. Esta elevação foi atribuída ao aumento da irregularidade superficial do pavimento causado pela ação do tráfego associado com as maiores temperaturas verificadas no verão.

Porém, deve-se observar que além das temperaturas elevadas, a pluviosidade também é maior no verão. Em países de clima tropical úmido, durante a referida estação, não

são raros os dias em que após horas de sol forte e altas temperaturas ocorrem chuvas de grande intensidade.

As elevadas temperaturas provocam a redução da viscosidade do ligante asfáltico que associadas com excesso de água aceleram o processo de oxidação e conseqüente degradação do mesmo. Outro efeito danoso ao CA causado pela associação de temperaturas elevadas e excesso de água em conjunto com a abrasão pela solicitação do tráfego é a desagregação do CA favorecendo o surgimento de panelas.

Nas demais camadas do pavimento, o excesso de umidade provoca a redução na capacidade de suporte que quando solicitado pelo tráfego dá origem a afundamentos e panelas que também provocarão danos às suspensões dos veículos. Portanto, os dados referentes aos danos causados aos veículos apresentados no estudo refletem não somente o efeito da temperatura, mas também a influência das condições de drenagem do pavimento e da susceptibilidade à variação de umidade dos materiais constituintes desta estrutura.

3.3.2. Poro Pressão

Algumas das mais prejudiciais ações do tráfego e da água ocorrem no interior da estrutura dos pavimentos e são causadas pela poro-pressão, não estando relacionadas com a capacidade de suporte do subleito.

As pressões de bombeamento que surgem no interior do pavimento quando solicitado pelo tráfego constituem o principal mecanismo causador de danos às estruturas, constituídas por camadas com materiais cimentados ou não (FWA, 1987).

Uma importante colocação a este respeito é encontrada em CEDERGEN (1973), “À medida que a água contida nas bases e sub-bases cresce, dá-se uma redução na capacidade de suporte e um crescimento da razão de perda de serventia dos pavimentos. Quando a água livre preenche completamente estas camadas, e também os vazios e os espaços ou aberturas nos limites entre as camadas, as rodas pesadas, aplicadas à superfície destes pavimentos, produzem impactos sobre a água que são

comparados a uma ação do tipo Golpe de Aríete. As pressões pulsantes da água (líquido incompressível) que podem surgir nestas ocasiões, sob o impacto das rodas, não causam somente erosão e ejeção de material para fora do pavimento, mas também podem desprender capas asfálticas de bases e sub-bases estabilizadas com betume. As ações da água podem desintegrar bases estabilizadas com cimento, enfraquecer bases granulares pelo rearranjo da estrutura interna dos materiais de granulação fina das misturas de agregados, sobrecarregar subleitos, onde as espessuras totais forem inadequadas, e causar diversas outras ações prejudiciais.”

O fenômeno do Golpe de Aríete, citado por CEDERGREN, consiste na transição de um determinado regime de escoamento, incluindo o repouso, para um outro. A fase de adaptação às novas condições de escoamento é sempre acompanhada de ondas de pressão que percorrem os vazios interligados a elevadas velocidades, e que progressivamente se atenuam até sua extinção total, exatamente quando o novo regime se estabelece por completo. Este fenômeno é tratado pela hidráulica como sendo um caso particular dos fenômenos transitórios aplicados, tipicamente, a condutos fechados.

Nos casos da ação danosa das pressões hidráulicas que surgem no interior da estrutura do pavimento com água livre, recomenda-se o desenvolvimento de estudos que considerem não somente o Golpe de Aríete, mas também o princípio de Pascal, segundo o qual, quando há uma pressão aplicada a um fluido confinado, esta será integralmente transmitida por todos os pontos deste fluido.

Com base no primeiro princípio da hidráulica apresentado anteriormente, verifica-se que quando uma ou mais camadas constituintes da estrutura do pavimento encontram-se com água livre em excesso, há a tendência destas camadas sofrerem a ação de pressões pulsantes quando da solicitação da estrutura pelas cargas dinâmicas do tráfego.

Através do princípio de Pascal verifica-se a tendência de que as pressões aplicadas na superfície destas camadas serão transmitidas a todas as partículas deste ambiente saturado, salvo as perdas de carga causadas pela baixa permeabilidade do meio.

Ressalta-se que a suposição da mecânica do fenômeno apresentada anteriormente é intuitiva e necessita do desenvolvimento de estudos específicos que considerem as características visco-elásticas das camadas estruturais do pavimento com elevado teor de umidade para que possa ser aplicada.

Em pavimentos que apresentam revestimentos trincados, a cada impacto de uma roda pesada, a água se move pela interface entre o revestimento e sua base, erodindo o material e ejetando-o através de suas trincas, produzindo canais e cavidades que enfraquecem a estrutura do pavimento, resultando em danos que, eventualmente, conduzirão à total falência desta estrutura.

Dentro da estrutura do pavimento, o efeito de bombeamento tem ação mais danosa na interface entre as camadas do pavimento. Isto devido à menor densidade dos materiais na região inferior da camada sobrejacente e à menor permeabilidade da superfície da camada subjacente, conforme será apresentado no item 4.2, provocando a concentração de um maior volume de água e favorecendo a ocorrência do fenômeno que provoca a desestruturação das camadas granulares e a destruição das ligações cimentantes nas camadas estabilizadas com cimentos asfálticos ou com cimento Portland.

Portanto, com base no exposto, têm-se como consequência da presença e atuação da poro-pressão:

- O desarranjo da estrutura das camadas granulares.
- O bombeamento de finos e conseqüente desagregação e erosão das camadas granulares.
- Abrasão às camadas cimentadas.

3.3.3. Perda de Suporte

A redução na capacidade de suporte é um fenômeno típico de materiais granulares, ou seja, materiais que não receberam qualquer tipo de tratamento cimentante, seja ele através de CAP ou de cimento portland.

Existem, basicamente, dois tipos de mecanismos causadores da redução na capacidade de suporte dos materiais granulares. O primeiro é a diminuição do atrito interno que ocasiona um decréscimo da resistência ao cisalhamento, e o segundo é a expansão dos materiais susceptíveis à ocorrência deste fenômeno. O detalhamento de ambos está apresentado a seguir.

O aumento do teor de umidade nas camadas de base e sub-base não tratadas e no subleito provoca um aumento no efeito de lubrificação nos contatos entre as partículas constituintes dos materiais, provocando a redução do atrito interno e a conseqüente diminuição da resistência ao cisalhamento.

Um exemplo que permite a fácil compreensão deste mecanismo é obtido do ensaio de compactação. Ao compactar um solo com baixo teor de umidade (ramo seco da curva densidade x umidade), em uma determinada energia de compactação, obtém-se uma densidade γ_1 . Se o teor de umidade deste material for elevado, porém mantendo-o ainda no ramo seco, ao impor sobre este solo a mesma energia de compactação, obter-se-á uma densidade γ_2 superior à γ_1 , até que se atinja o ponto de densidade máxima, após o qual, o aumento do teor de umidade provocará uma lubrificação excessiva nos contatos entre os grãos, proporcionando a ocorrência de elevadas deformações plásticas, impedindo a melhor compactação do solo e, como conseqüência, obter-se-á uma densidade inferior à máxima.

Nas camadas estruturais do pavimento ocorre um fenômeno semelhante. A passagem do tráfego impõe uma solicitação de compressão gerando tensões cisalhantes nas camadas estruturais. De maneira análoga ao que ocorre durante o ensaio de compactação, se os materiais granulares apresentarem um teor de umidade que proporcione a lubrificação excessiva dos contatos entre os agregados, ocorrerá a redução da capacidade de suporte e do módulo de resiliência da camada, resultando

em deformações plásticas excessivas, dando início ao processo de ruptura do pavimento.

O segundo mecanismo de redução na capacidade de suporte das camadas granulares, a expansão, consiste em um fenômeno característico da parcela dos materiais que apresenta granulometria fina, ou seja, da parcela que se enquadra na granulometria de silte e argila.

A expansão provoca um afastamento dos grãos ocasionando o surgimento de espaços intergranulares que são preenchidos pela água livre, tendo como consequência a desestruturação interna da camada. Nos casos em que são atingidos teores de umidade elevados no interior da camada, quando da solicitação pelo tráfego, dá-se origem ao processo de bombeamento apresentado no item 3.3.2.

A umidade de equilíbrio dos materiais granulares, ou seja, a umidade em que estes materiais são normalmente encontrados nas estruturas dos pavimentos após a troca de umidade com o solo circunvizinho e as perdas naturais por evaporação, situa-se ao redor da umidade ótima de compactação do material.

Com a elevação do teor de umidade, independentemente da ocorrência de bombeamento, há expansão; uma vez que o teor de umidade é reduzido a teores próximos ao da umidade ótima, os vazios gerados na expansão, antes ocupados pela água, agora são ocupados por ar, tornando o solo poroso. Assim, há uma redução da capacidade de suporte e, conseqüentemente, do módulo de resiliência.

A variação na capacidade de suporte do subleito ao longo do período de projeto influencia significativamente no desempenho do pavimento. Para considerar o efeito desta variação sazonal do suporte no dimensionamento da estrutura do pavimento, a AASHTO, na versão de 1986 de seu procedimento de cálculo, substituiu o parâmetro de suporte do subleito até então utilizado, CBR, pelo módulo de resiliência, incluindo também o conceito de Módulo Efetivo do Subleito.

O Módulo Efetivo do Subleito consiste na média ponderada do módulo ao longo do ano, em função do efeito desta variação no desempenho do pavimento.

O Módulo Efetivo do Subleito é obtido através da divisão do ano em períodos de iguais duração, não inferiores a 15 dias. Para cada período é determinado o respectivo módulo resiliente e, em função deste valor estima-se o dano relativo sofrido pela estrutura do pavimento através da equação 3.3 apresentada a seguir, deduzida no Apêndice LL, Volume 2 do procedimento da AASHTO, a partir da equação de desempenho proposta no procedimento.

$$u_f = 1,18 \times 10^8 \times M_{Ri}^{-2,32} \quad (3.3)$$

Onde:

u_f = Dano relativo.

M_R = Módulo resiliente do subleito.

Em seguida, determina-se o dano médio causado ao pavimento neste período e, com base neste valor, através também da equação 3.3, calcula-se o Módulo de Resiliência efetivo do subleito que deve ser utilizado no projeto.

A tabela 3.5 e a figura 3.21 trazem um exemplo numérico do procedimento descrito.

Tabela 3.5 – Exemplo numérico de determinação do Módulo Efetivo

Mês	Módulo de Resiliência do Subleito MR (psi)	Dano Relativo
Janeiro	20.000	0,01
Fevereiro	20.000	0,01
Março	2.500	1,51
Abril	4.000	0,51
Maio	4.000	0,51
Junho	7.000	0,13
Julho	7.000	0,13
Agosto	7.000	0,13
Setembro	7.000	0,13
Outubro	7.000	0,13
Novembro	4.000	0,51
Dezembro	20.000	0,01
$\sum u_f$		3,72

$$u_f = \frac{\sum u_f}{n} = \frac{3,72}{12} = 0,31 \quad (3.4)$$

Através da equação 3.3 ou do ábaco que a ilustra, tem-se:

$$MR \cong 5.000 \text{ psi}$$

Figura 3.21 – Ábaco para estimativa do Dano Relativo em função do Módulo de Resiliência do Subleito (AASHTO, 1993)

JANOO e SHEPHERD (2000) desenvolveram estudo sobre a variação sazonal do módulo resiliente em função da variação do teor de umidade e da temperatura nas

camadas estruturais de diversos segmentos rodoviários de pavimentos de CA localizados no estado americano de Montana.

Ressalta-se que os pavimentos estavam expostos à ação danosa do congelamento da água dentro de suas estruturas. As variações no teor de umidade, em volume, considerando-se apenas as águas não congeladas estão apresentadas na figura 3.22 a seguir.

Figura 3.22: Variação do teor de água não congelada no pavimento (Janoo e Shepherd, 2000)

Os autores constataram que há um pico no teor de umidade quando a estrutura do pavimento atinge a temperatura de -2°C , indicando o início do descongelamento. O período de degelo apresentou duração variável entre 4 dias e 3 semanas.

A figura 3.23 a seguir apresenta a variação do módulo de resiliência e da umidade para o segmento de pavimento localizado em Dickey Lake, no estado de Montana.

Segundo JANOO e SHEPHERD (2000), em regiões onde os pavimentos são susceptíveis ao congelamento, no início da primavera, quando ocorre o

descongelamento, em função do elevado teor de umidade observado na estrutura do pavimento, são impostas limitações ao tráfego de veículos comerciais no que se refere à magnitude das cargas máximas legais por tipo de eixo, visando a redução na severidade dos danos causados ao pavimento.

3.3.4. Solução para Minimização dos Problemas

Os efeitos danosos da água nas estruturas dos pavimentos podem, teoricamente, ser evitados de quatro maneiras:

- Mantendo-se a água fora das estruturas dos pavimentos (impermeabilização).
- Retirando-se rápida e seguramente as águas que infiltram na estrutura do pavimento (drenagem subsuperficial).
- Utilização de materiais inertes.
- Dimensionando a estrutura do pavimento para resistir aos carregamentos na presença de água em excesso.

A construção de pavimentos totalmente impermeáveis, de forma que se possa garantir que nem as águas provenientes das chuvas, nem as águas subterrâneas penetrem na estrutura do pavimento é praticamente impossível e envolveria procedimentos demasiadamente caros. Esta solução ainda apresenta a desvantagem de que caso houvesse uma pequena falha no sistema de impermeabilização que permitisse a infiltração de água, esta ficaria retida dentro da estrutura que trabalharia, por longos períodos, com nível de umidade elevado.

Garantir a retirada da água da estrutura do pavimento de maneira rápida e segura envolveria gastos elevados com sistemas de drenagem com a eficiência necessária, sem benefícios nos custos da estrutura do pavimento. Salienta-se que os principais métodos de dimensionamento preconizados no Brasil desconsideram as vantagens no desempenho de pavimentos bem drenados.

A construção de uma estrutura construída apenas com materiais inertes consiste em uma alternativa de difícil execução, pois além dos materiais utilizados na estrutura do pavimento serem fortemente dependentes das características geológicas regionais, todo pavimento é construído sobre o subleito, ou seja, sobre o próprio solo que, em maior ou menor intensidade, é sensível a variações do teor de umidade.

Dimensionar estruturas de pavimento que sejam capazes de suportar a ação do tráfego independente da quantidade de água livre em sua estrutura, acarretaria em estruturas extremamente robustas e, na maioria dos casos, super-dimensionadas.

Com base no exposto, observa-se que, isoladamente, nenhuma das quatro alternativas apresentadas é técnica e economicamente adequada, porém, a combinação das quatro técnicas fornece uma quinta alternativa que, até o momento, apresenta-se como a mais realista e exequível dentre as considerações acerca da influência da drenagem, no dimensionamento da estrutura do pavimento.

Portanto, para que esta alternativa seja eficiente, o pavimento deve ser tão impermeável quanto possível para que o volume de água que infiltra na estrutura seja reduzido ao máximo. Deve ser capaz de propiciar a rápida eliminação da água que infiltrar para que a estrutura seja solicitada o menor tempo possível com teores elevados de umidade. Os materiais nele empregados devem apresentar uma baixa sensibilidade às variações do teor de umidade e a estrutura do pavimento deve ser projetada de forma que sejam considerados os períodos em que operará com teores elevados de umidade, reforçando, ou até reduzindo, as camadas estruturais em função da precipitação da região e da eficiência do sistema drenante.

4. SISTEMA DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL

Os projetos de infraestrutura viária geralmente prevêm drenos subterrâneos para rebaixamento do nível de lençóis freáticos elevados, drenagem das águas provenientes de nascentes e outras fontes que sejam conhecidas antes da construção, ou por ocasião da execução das obras.

Há uma filosofia difundida no meio rodoviário, por parte dos técnicos, de que as infiltrações provenientes de chuvas ou de outras fontes superficiais não são críticas para a estrutura do pavimento. Com isto, raramente são previstos sistemas de drenagem com esta finalidade.

Porém, outros autores, há tempos defendem a importância do sistema de drenagem subsuperficial como parte integrante do projeto estrutural do pavimento.

O adequado controle das águas que infiltram na estrutura do pavimento é considerado fundamental para o bom desempenho deste, sendo a drenagem subsuperficial a principal responsável por este controle (MOULTON, 1990).

OLIVEIRA (1982) concluiu que: "A aplicação dos conceitos de drenagem subsuperficial aos pavimentos é, sem dúvida, a solução técnica e econômica tanto para os pavimentos novos como para os existentes".

4.1. Elementos Constituintes

Os sistemas de drenagem subsuperficiais são constituídos basicamente de camada drenante, que podem ser acompanhadas de camada de bloqueio, e de drenos longitudinais de borda, podendo estes ser ou não munidos de tubulações que facilitam o escoamento d'água.

4.1.1. Camada Drenante

A camada drenante é constituída de material granular de graduação aberta podendo ser simples ou tratado com cimento asfáltico ou cimento portland. Esta camada está situada abaixo da camada de rolamento ou acima do subleito, e possui conexão com os drenos longitudinais, por vezes denominados drenos de borda, ou tem a face lateral exposta ao ar, o que possibilita a livre descarga da água por ela captada.

Na maioria dos casos a camada drenante deve apresentar contribuição estrutural ao pavimento devendo, portanto, além de ter elevada permeabilidade, apresentar características de suporte compatíveis com o nível de solicitação do tráfego e do seu posicionamento na estrutura do pavimento.

BALDWIN (1987) apresenta os resultados de uma pesquisa realizada pelo *Transportation Research Board's Committee on Subsurface Drainage* onde foram distribuídos questionários para todas as agências estaduais de transportes dos Estados Unidos, visando o mapeamento do uso de drenagem subsuperficial no território Americano.

Das 49 agências que responderam o questionário, 24 afirmaram que utilizavam o conceito de camada drenante sendo que, destas, 15 agências fazem uso regular deste dispositivo de drenagem.

As espessuras da camada mais utilizadas pelas agências são, aproximadamente, 15 cm em 7 estados, 7,5 cm em 3 estados e 30 cm em dois estados. A espessura mais delgada encontrada foi de 5 cm, enquanto uma agência recomenda espessuras que variam de 45 a 60 cm.

A localização da camada drenante no interior da estrutura também apresentou algumas variações. Aparentemente há bons argumentos para posicionar esta camada em qualquer posição da estrutura do pavimento, porém há duas posições que apresentam igual destaque na opinião das agências. A primeira, com 44% da preferência, é entre a camada de base e o subleito e, a segunda, recomendada por 40% das agências, é imediatamente abaixo da camada de rolamento.

Verificou-se a existência de uma grande variação na granulometria indicada para a camada permeável. A figura 4.1 a seguir apresenta as faixas granulométricas com maior e com menor porosidade dentre as recomendadas pelas agências de transporte americanas.

Figura 4.1: Faixas granulométricas recomendadas pelas agências para camada drenante. (Baldwin, 1987)

A estabilização da camada permeável somente pela compactação é adotada por 55% das 29 agências que responderam a esta questão, sendo seguida por 41% que recomendam a estabilização por cimento asfáltico em teores que variam de 2 a 5 %. Apenas um estado respondeu que utiliza estabilização por adição de cimento portland, em uma taxa de aproximadamente 170 kg/m³ e fator água cimento de 0,37. Ainda, 85% destas agências informaram que o emprego do tipo de processo de estabilização (tipo de cimento) não é opcional.

Com relação ao procedimento da compactação da camada, obteve-se um resultado bastante ambíguo. A maioria dos estados especificou o término da compactação com frases do tipo “...até a satisfação do engenheiro...” ou “...até que ocorra o travamento dos agregados...”. Duas agências recomendam que a camada seja compactada até que se atinja uma determinada porcentagem da densidade real dos agregados.

Ressalta-se que as características necessárias do material estabilizado variam com a posição desta camada na estrutura do pavimento. Para a camada de base, por exemplo, a compactação deve prosseguir até o ponto onde começa a ocorrer a fratura dos agregados, porém, deve-se observar a manutenção das características drenantes da camada.

O equipamento de compactação recomendado para a execução dos serviços, na maioria dos casos, está ao redor de 8 toneladas, entretanto, a faixa de variação encontrada nas respostas foi de 3 a 20 toneladas.

Outra questão desta pesquisa abordou o valor correspondente ao coeficiente estrutural da camada drenante. Em 47% das respostas encontrou-se coeficiente estrutural de 0,14; correspondente ao método de dimensionamento da AASHTO. Nenhum outro valor específico foi indicado por mais de um estado. As variações obtidas foram de 0,08 a 0,20, sendo que cada agência apresentou um procedimento diferente para determinação deste coeficiente.

Com relação à retirada d'água da camada drenante, 15 estados utilizam drenos longitudinais munidos de tubos perfurados e saídas d'água, 10 estados deixam a água drenar livremente pela face lateral da camada drenante, 6 estados empregam tubos ligados diretamente na camada drenante e 2 estados adotam outros procedimentos.

Segundo a orientação de 8 estados, devem ser tomados cuidados especiais para liberação do tráfego de obra sobre as camadas drenantes, pois são comuns os desprendimentos de agregados, os acúmulos de deformações plásticas e o entupimento por materiais que caem dos caminhões, uma vez que esta camada não apresenta granulometria apropriada para receber ação direta do tráfego.

Nas agências estaduais de transporte dos Estados Unidos é comum a especificação da quantidade de faces fraturadas em relação à quantidade de material britado na mistura granular, uma vez que esta característica é responsável por aumentar a permeabilidade e a estabilidade da camada.

Com relação a resistência estrutural desta camada, THOM e BROWN (1987) realizaram uma série de ensaios triaxiais de carga repetida para avaliar o desempenho da brita graduada simples em função da variação da granulometria e do teor de umidade. Os autores concluíram que:

- O módulo de resiliência reduz sensivelmente com a elevação do teor de umidade, em todas as faixas granulométricas analisadas, enquanto a influência da densidade é praticamente desprezível.
- O acúmulo de deformação permanente está fortemente vinculado à densidade do material, sendo que o material de maior densidade apresenta melhor desempenho.
- A elevação do teor de umidade traz um aumento substancial na deformação permanente acumulada.

Camada de Bloqueio

Nos casos em que a camada drenante é assentada diretamente sobre o subleito, em função do tamanho e da quantidade de vazios da camada granular, pode ocorrer a penetração das parcelas do material mais fino constituinte do subleito para o interior da camada drenante, provocando o entupimento e conseqüente redução da permeabilidade desta e a redução da capacidade de suporte do subleito.

Para prevenir a penetração dos finos do subleito nos vazios da camada drenante, faz-se uso de uma camada de granulometria intermediária e espessura delgada, implantada na interface do subleito com a camada drenante, denominada camada de bloqueio, de transição ou de filtro.

A função primária desta camada é a de impedir a penetração dos finos do subleito na camada granular drenante, para tanto, deve possuir granulometria suficientemente fina para impedir a penetração dos finos do subleito em seu interior e, ao mesmo tempo, suficientemente grossa para não colmatar a camada permeável.

A camada de bloqueio é definida como uma camada de graduação densa, implantada entre a camada permeável e o subleito e que apresenta três funções principais:

- Garantir a separação entre a camada drenante e o subleito.
- Constituir uma barreira com baixa permeabilidade para direcionar a água que infiltrar na camada permeável para a borda da estrutura do pavimento.
- Suportar o tráfego e outros esforços oriundos da construção da camada de base e das demais camadas constituintes da estrutura do pavimento.

MALLELA, TITUS-GLOVER e DARTER (2000), recomendam a utilização da tabela 4.1 a seguir para seleção da camada de bloqueio mais apropriada.

Tabela 4.1: Recomendações para seleção da camada de bloqueio (Mallela, Titus-Glover e Darter, 2000)

Agressividade do meio	Condições de Campo	Camada de Bloqueio
Alta	Extremamente úmido com alto índice pluviométrico (>1 m/ano) Subleito alta quantidade de finos (>15% passando na peneira de 0,075mm) Alto volume de tráfego (>2x10 ⁶ /ano para CA e >3x10 ⁶ /ano para CCP) Subleito com CBR<6%	Combinação de camada granular e geotêxtil ou camada granular estabilizada*
Média	Clima úmido com índice pluviométrico moderado (entre 0,65 e 1 m/ano) Subleito com moderada quantidade de finos Volume de tráfego moderado (<2x10 ⁶ /ano para CA e <3x10 ⁶ /ano para CCP) Subleito com 6%<CBR<10%	Camada granular
Baixa	Clima úmido com baixo índice pluviométrico (entre 0,5 e 0,65 m/ano) Subleito granular com permeabilidade relativamente elevada (>3 m/dia) Volume de tráfego moderado (<2x10 ⁶ /ano para CA e <3x10 ⁶ /ano para CCP) Subleito com CBR>10%	Geotêxtil ou camada granular
Recomendações baseadas nas características e propriedades do geotêxtil de 0,030 kg/m ² . Camada granular de bloqueio deve apresentar graduação densa e CBR superior a 50%.		

(*) Camada granular estabilizada somente é recomendada quando houver camada drenante também estabilizada.

No levantamento realizado por BALDWIN (1987) das 31 agências que responderam à questão relacionada ao emprego de camada de bloqueio, 10 estados recomendam a utilização de geotêxtil, 10 recomendam o mesmo material utilizado em bases granulares densas, 5 estados recomendam materiais baseando-se nas teorias de filtro e 6 estados recomendam outros procedimentos.

4.1.2. Drenos Longitudinais de Borda

Os drenos longitudinais de borda, também conhecidos como drenos longitudinais rasos ou drenos de pavimento, têm como função principal captar as águas coletadas

pela camada drenante e conduzi-las para as saídas d'água que devem desaguá-las em locais que não ofereçam riscos às estruturas dos pavimentos.

É importante notar que estes dispositivos não têm por finalidade rebaixar lençóis freáticos elevados ou coletar águas provenientes de outras fontes subterrâneas. Em caso de níveis d'água elevados ou de nascentes, devem ser previstos drenos profundos específicos para estes fins.

De maneira geral, os drenos de borda podem ser constituídos por trincheira, revestida ou não por manta geotêxtil, preenchida somente por agregados (dreno cego ou francês) ou ser munida de tubulação, tendo por finalidade a elevação da capacidade de vazão do dispositivo.

O posicionamento do dreno de borda pode apresentar algumas variações em função da seção transversal da via, conforme apresentado na figura 4.2, porém deve obrigatoriamente estar diretamente conectado com a camada drenante.

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

i)

j)

Figura 4.2 – Posicionamento da camada drenante e dos drenos de borda

As figuras 4.2 “a)” e “b)” indicam o dreno posicionado na borda do pavimento em uma rodovia com acostamento não revestido, nesta posição, além de coletar as águas provenientes da camada drenante o dreno também capta as águas que infiltram pelo acostamento não revestido e que migrariam para o interior da estrutura do pavimento. Porém, considerando-se o caso de carregamentos próximos à borda longitudinal da plataforma, o dreno tem a desvantagem de proporcionar o desconfinamento das camadas estruturais do pavimento, prejudicando o desempenho principalmente das camadas granulares.

As seções “c)” e “d)” ilustram as situações onde a seção da rodovia possui acostamento revestido proporcionando uma sensível redução no volume de água que infiltra pela borda do pavimento. Nesta situação, o dreno localizado próximo à junta do pavimento com o acostamento capta as águas provenientes da camada drenante e de eventuais fissuras que possam surgir na junção das estruturas da pista com a do acostamento, porém no caso de tráfego junto à borda do pavimento, esta alternativa recai no exposto para os casos “a)” e “b)”, ou seja, o desconfinamento das camadas estruturais do pavimento.

A melhor alternativa de posicionamento do dreno de pavimento, no caso de rodovias, é apresentada nas figuras “e)” e “f)” onde a seção transversal apresenta acostamento revestido, com camada drenante contínua, inclusive sob o acostamento, e com dreno posicionado no bordo externo do acostamento.

Analogamente aos casos “c)”, “d)”, “e)” e “f)”, são apresentados os casos “g)”, “h)”, “i)” e “j)” para pavimentos urbanos.

No levantamento realizado por BALDWIN (1987), junto a com todas as agências estaduais de transportes dos Estados Unidos, verificou-se que 15 agências, dentre as que responderam a este quesito recomendam que a água coletada pela camada drenante seja retirada da estrutura do pavimento por meio de drenos longitudinais de borda.

O espaçamento dos dispositivos de saída d’água destes drenos depende do volume de água que infiltra na estrutura do pavimento, que por sua vez está fortemente ligado às

condições climáticas da região. Portanto, em função da abrangência da pesquisa, verificou-se uma grande variação nas distâncias máximas, entre dois dispositivos consecutivos, recomendadas pelas agências. Três estados indicam espaçamento da ordem de 150 m e quatro indicam aproximadamente 90 m, porém, as distâncias variam de cerca de 30 m a 450 m.

Ainda com relação ao espaçamento dos dispositivos de retirada d'água da estrutura do pavimento, 10 agências responderam que utilizam procedimentos de dimensionamento hidráulico no projeto e 6 agências fazem uso de especificações padrão.

4.2. Critérios de Dimensionamento

4.2.1. Camada Drenante

4.2.1.1. Considerações Gerais

Declividade

A velocidade de escoamento da água é diretamente proporcional à declividade da estrutura, tanto na direção longitudinal quanto na transversal. Considerando-se que esta velocidade pode ser obtida através da soma vetorial das velocidades em ambas as direções e que o pavimento pode ser considerado infinito na direção longitudinal, segue:

Figura 4.3: Posicionamento da declividade e da direção do escoamento.

g = Declividade longitudinal.

s = Declividade transversal.

i = Declividade resultante.

L = Largura da plataforma.

X = Extensão na direção longitudinal que a água percorre até deixar a estrutura do pavimento

D = Maior distância que a água percorre na direção da declividade resultante até deixar a estrutura do pavimento.

Considerando-se, conforme apresentado na figura 4.3, declividades constantes tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal, tem-se:

$$i = \sqrt{g^2 + s^2} \quad . \quad (4.1)$$

$$D = \sqrt{L^2 + X^2} \quad (4.2)$$

Baseado no fato de que a direção da máxima distância que a água percorre dentro da estrutura do pavimento coincide, exatamente, com a direção da máxima declividade e, fazendo-se uso das equações 4.1 e 4.2, obtém-se:

$$\frac{D}{i} = \frac{\sqrt{L^2 + X^2}}{\sqrt{g^2 + s^2}} \quad (4.3)$$

e,

$$X = L \times \frac{g}{s} \quad (4.4)$$

portanto,

$$\frac{D}{i} = \frac{\sqrt{L^2 + \left(L \times \frac{g}{s}\right)^2}}{\sqrt{g^2 + s^2}} \quad (4.5)$$

$$\frac{D}{i} = \frac{\sqrt{L^2 \times \left(1 + \frac{g^2}{s^2}\right)}}{\sqrt{g^2 + s^2}} \quad (4.6)$$

$$\frac{D}{i} = \frac{L \times \sqrt{\frac{s^2 + g^2}{s^2}}}{\sqrt{g^2 + s^2}} \quad (4.7)$$

$$\frac{D}{i} = \frac{\frac{L}{s} \times \sqrt{s^2 + g^2}}{\sqrt{g^2 + s^2}} \quad (4.8)$$

Logo,

$$\frac{D}{i} = \frac{L}{s} \quad (4.9)$$

Portanto, com base no exposto, conclui-se que o tempo de retirada da água da estrutura do pavimento depende da permeabilidade horizontal, da declividade transversal e da distância que a água precisa percorrer para deixar a estrutura na direção transversal ao eixo da rodovia.

Considerações Acerca da Permeabilidade

Com relação à execução das camadas constituintes da estrutura dos pavimentos, com exceção de algumas camadas de rolamento, estas são construídas empregando-se compactação sobre um material pulverizado.

Este procedimento gera camadas que apresentam uma maior compactação na superfície e uma compactação menos eficiente na face inferior da camada.

Analisando-se, por exemplo, uma camada que apresente Grau de Compactação (GC) médio de 100%, a superfície desta camada apresentará um GC superior a 100% e a porção mais profunda apresentará um GC ligeiramente inferior a 100%.

Em outras palavras, o procedimento de compactação utilizado na construção dos pavimentos gera camadas que apresentam um gradiente de densidade e, conseqüentemente, um gradiente de todas as propriedades do solo que dela dependem, tais como: capacidade de suporte, módulo de resiliência, tensão capilar, porosidade, permeabilidade, entre outras.

Considerando-se o caso em que duas camadas da estrutura do pavimento, constituídas por um mesmo solo, são construídas uma sobre a outra ou de uma outra camada granular qualquer construída sobre uma camada de solo, como comumente encontrado na prática, não serão raros os casos em que o material localizado no fundo da camada superior apresentará permeabilidade superior àquela da superfície da camada inferior, gerando, em função da declividade, um acúmulo ou um fluxo d'água horizontal na porção inferior da camada superior.

Portanto, em função das colocações apresentadas, conclui-se que as estruturas dos pavimentos comumente apresentam permeabilidade maior na direção horizontal do que na direção vertical, sendo a primeira, responsável pela eficiência da drenagem subsuperficial do pavimento.

A permeabilidade dos materiais constituintes das camadas estruturais tem influência decisiva no desempenho do sistema de drenagem subsuperficial e por conseguinte no desempenho do pavimento devendo esta, sempre que possível, ser determinada através de ensaios laboratoriais.

DNER (1975), recomenda que a granulometria da camada granular seja fixada através da equação 4.10 de Füller que objetiva uma maior estabilidade através do maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas, desde a mais grádua à partícula mais fina.

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.10)$$

Onde:

P = Porcentagem, em peso, que passa na peneira de abertura d .

d = Abertura da peneira em análise.

D = Diâmetro máximo do agregado (abertura da malha da peneira, à qual corresponde uma porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%, em peso, do agregado).

Para uma mistura de agregados com determinado diâmetro máximo, a curva ideal de Füller fornece as porcentagens das partículas de diferentes diâmetros, de modo a se obter um agregado bem graduado.

Ressalta-se que a relação entre a porcentagem de agregados de dois diâmetros consecutivos proposta por Füller apresenta potência 0,50; visando a máxima estabilidade. As curvas granulométricas que têm sido empregadas pelas agências americanas como camada drenante utilizam potência 0,45, conforme BALDWIN (1987).

Nove agências entre as que responderam à pesquisa especificam teores que variam de 50% a 100% de material britado na mistura granular com vistas não só à maior estabilidade mas também à maior permeabilidade (BALDWIN, 1987).

Quanto à permeabilidade dos materiais, houve uma grande variação nos resultados da pesquisa, onde 3 estados especificam baixos coeficientes de permeabilidade, da ordem de $3,50 \times 10^{-2}$ a $1,75 \times 10^{-1}$ cm/s, 4 estados recomendam permeabilidades de $1,75 \times 10^{-1}$ a $3,50 \times 10^{-1}$ cm/s, enquanto 6 estados recomendam valores entre $3,50 \times 10^{-1}$ e $1,75$ cm/s. Um dos estados consultados indica coeficientes de permeabilidade de até 3,50 cm/s.

As grandes diferenças verificadas nos coeficientes de permeabilidade especificados refletem as enormes variações nas faixas granulométricas adotadas pelas agências, apresentadas na figura 4.1.

ELSAYED e LINDLY (1996), apresentam a equação (4.11), freqüentemente utilizada para a estimativa do coeficiente de permeabilidade.

$$k = c \times D_{10} \quad (4.11)$$

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

c = Constante que varia de 90 a 120, normalmente adotada igual a 100; e

D_{10} = Diâmetro efetivo (cm).

Para garantir a permeabilidade, Bertran, orientado por Terzaghi e Casagrande, propôs as seguintes relações:

$$D_{15_{filtro}} \geq 5D_{15_{solo}} \quad (4.12)$$

$$D_{5_{filtro}} \geq 0,074mm \quad (4.13)$$

Onde:

$D_{15\,filtro}$ = Diâmetro cujo 15% dos agregados constituintes do material do filtro, em massa, possuem diâmetros inferiores.

$D_{15\,solo}$ = Diâmetro cujo 15% das partículas do solo, em massa, possuem diâmetros inferiores.

$D_{5\,filtro}$ = Diâmetro cujo 5% dos agregados constituintes do material do filtro, em massa, possuem diâmetros inferiores.

CEDERGREN (1973) recomenda que o material constituinte da camada drenante apresente permeabilidade superior a 1,0 cm/s. O autor ainda sugere que para se obter uma faixa relativamente estreita, que apresenta maior permeabilidade, seja atendida a seguinte relação:

$$D_{85} < 4 \times D_{15} \quad (4.14)$$

Para assegurar um alto nível de limpeza de uma camada granular de graduação aberta, deve ser observado:

$$D_2 > 2,5mm \quad (4.15)$$

Onde:

D_2 = Diâmetro cujo 2% dos agregados, em massa, possuem diâmetros inferiores.

D_{15} = Diâmetro cujo 15% dos agregados, em massa, possuem diâmetros inferiores.

D_{85} = Diâmetro cujo 85% dos agregados, em massa, possuem diâmetros inferiores.

A permeabilidade da camada, segundo o autor, pode ser estimada através do gráfico apresentado na figura 4.4 a seguir.

Figura 4.4: Estimativa do coeficiente de permeabilidade de faixa estreita, sem finos (Cedergren, 1973)

MOULTON (1990), apresenta a equação 4.16 para determinar o coeficiente de permeabilidade da camada drenante, correlacionando-se o diâmetro (D_{10}) com porcentagem do material que passa pela peneira 200, ou seja, com porcentagem de material com diâmetro inferior a 0,075 mm.

$$k = \frac{(219,21) \times D_{10}^{1,478} \times n^{6,654}}{P_{200}^{0,597}} \quad (4.16)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

P_{200} = porcentagem do material que passa na peneira nº 200.

D_{10} = diâmetro efetivo do grão correspondente a 10% das partículas inferior a este (mm).

n = porosidade $n = \left(1 - \frac{\gamma_d}{10,52}\right)$.

γ_d = densidade seca aparente (kg/m³)

O autor apresenta também a representação gráfica da equação 4.16, conforme figura 4.5 a seguir.

Figura 4.5: Estimativa do coeficiente de permeabilidade em materiais granulares (Moulton, 1990)

O DNER (1996) apresenta o gráfico mostrado na figura 4.6 para determinação da permeabilidade da camada drenante e da camada de bloqueio. Ressalta-se que um gráfico semelhante é proposto por CEDERGREN (1973).

Figura 4.6: Estimativa do coeficiente de permeabilidade da camada drenante e da camada de bloqueio (DNER, 1996)

MALLELA, TITUS-GLOVER e DARTER (2000) recomendam que a camada de base de graduação aberta com funções drenantes deve possuir uma permeabilidade mínima da ordem de $3,50 \times 10^{-1}$ cm/s. Para estruturas de pavimentos expostas a tráfego pesado, os autores recomendam que esta camada seja constituída por material granular tratado por cimento asfáltico ou por cimento portland. No caso de cimento asfáltico é recomendado um teor mínimo de 3% de CAP-40 e, no caso de cimento portland, recomendam um consumo compreendido entre 130 e 170 kg/m³.

CHRISTOPHER, ZHAO e HAYDEN (2001) apresentam trabalho sobre a implantação de geocompostos drenantes com a função de captar tanto as águas que infiltram através da superfície do pavimento, quanto as águas que ascendem por capilaridade. Segundo os autores a permeabilidade destes geocompostos é de cerca

de 3 vezes a permeabilidade de uma camada granular de graduação aberta. Com base em experimentos de campo iniciados em 1997 pelo *Maine DOT* em conjunto com a Universidade de Maine e o *U. S. Army Cold Region*, estão sendo avaliadas seções transversais que possuem o geocomposto como camada drenante em comparação com seções idênticas, porém sem o geocomposto. Nota-se que este dispositivo vem apresentando um bom desempenho quanto à resistência às solicitações, mantendo a capacidade de drenagem da camada e trazendo um ganho de desempenho a estas seções.

4.2.1.2. Dimensionamento Hidráulico da Camada Drenante

O dimensionamento hidráulico da camada drenante pode ser realizado através do critério da continuidade de fluxo, onde não se admite a retenção de água na estrutura do pavimento, ou seja, deve haver a compatibilidade das permeabilidades e das seções de maneira que seja garantida a continuidade do fluxo d'água. Outro critério para o dimensionamento do sistema de drenagem é o do tempo de drenagem, onde se admite que a estrutura do pavimento levará um determinado período para baixar o teor de umidade para valores pré-estabelecidos considerados aceitáveis.

A seguir estão apresentadas as metodologias comumente utilizadas nos dimensionamentos, para cada um dos critérios mencionados.

- Critério da Continuidade de Fluxo:
 - ✓ Cedergren (1973); e
 - ✓ Moulton (1979).
- Critério do Tempo de Drenagem:
 - ✓ Casagrande e Shannon (1952);
 - ✓ Barber e Sawyer (1952); e
 - ✓ Christopher, Zhao e Hayden (2001).

Ressalta-se que além das espessuras dimensionadas pelos critérios apresentados, deve-se prever a contaminação da camada drenante, quando da implantação da estrutura do pavimento, pelas camadas sobrejacentes e subjacentes a esta. Recomenda-se que a espessura dimensionada seja elevada em 2 a 3 cm, a fim de prevenir-se quanto a ocorrência de tal fenômeno.

4.2.1.2.1. Critério da Continuidade de Fluxo

Cedergren

A metodologia preconizada por Cedergren e recomendada pelo DNER (1996), consiste na aplicação pura da Lei de Darcy, onde o fluxo de água que infiltra através da superfície do pavimento deve ser totalmente drenado pela camada permeável, não sendo consideradas perdas de volume nem sendo permitido o acúmulo da água.

A estimativa do volume de água que infiltra (q_i) através da superfície do pavimento é calculado com base na intensidade da precipitação que apresenta tempo de recorrência de 1 ano e duração de 1 hora. Esta precipitação deve ser multiplicada pelos coeficientes empíricos de infiltração propostos por Cedergren apresentados no item 3.2.1.

A determinação da espessura da camada granular é realizada através da equação de Darcy , 4.17, apresentada a seguir.

$$Q = k \times i \times A \quad (4.17)$$

Onde:

Q = Vazão na seção crítica (m³/s).

k = Coeficiente de permeabilidade da camada de base (m/s).

i = Gradiente hidráulico, dado pela declividade na direção resultante (m/m)

A = Área da seção crítica (m²)

Para efeito de dimensionamento, considera-se uma faixa com 1 metro de largura para a determinação da vazão e, conseqüentemente, para a seção crítica, determinando-se apenas a espessura efetiva da camada.

Portanto:

$$h = \frac{L \times q_i}{s \times k} \quad (4.18)$$

Ou,

$$k = \frac{L \times q_i}{s \times h} \quad (4.19)$$

q_i = Índice de infiltração de projeto (m³/m²).

s = Declividade transversal (m/m).

L = Largura da plataforma (m).

k = Coeficiente de permeabilidade da camada drenante (m/s).

h = Espessura da camada drenante (m).

Moulton

O procedimento proposto por Moulton (1979), consiste em determinar a máxima espessura do fluxo d'água dentro da camada drenante, em função da permeabilidade, da declividade resultante, da extensão máxima que o fluxo deve percorrer até deixar a estrutura do pavimento e do índice de infiltração determinado pela equação 3.1.

O autor adota o conceito de que a camada de base deve apresentar capacidade de fluxo igual ou superior àquela que infiltra no pavimento, determinado segundo a metodologia proposta por Ridgeway (1976).

As equações propostas por Moulton estão apresentadas a seguir.

Caso 1: Para $(S_R^2 - 4q_i / k) < 0$

$$H = L_R \sqrt{\frac{q}{k}} \left[\left(\frac{S_R}{\sqrt{\frac{4q}{k} - S_R^2}} \right) \times \left(\tan^{-1} \frac{S_R}{\sqrt{\frac{4q}{k} - S_R^2}} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (4.20)$$

Caso 2: Para $(S_R^2 - 4q_i / k) > 0$

$$H = L_R \sqrt{\frac{q_i}{k}} \times \left[\frac{S - \sqrt{S_R^2 - 4q_i / k}}{S + \sqrt{S_R^2 - 4q_i / k}} \right]^{\frac{S}{2\sqrt{S_R^2 - 4q_i / k}}} \quad (4.21)$$

Caso 3: Para $(S_R^2 - 4q_i / k) = 0$

$$H = L_R^{-1} \sqrt{\frac{q_i}{k}} \quad (4.22)$$

Onde:

H = Espessura da camada drenante (m).

L_R = Extensão máxima percorrida pela água na direção resultante.

q_i = Volume de água que infiltra através da superfície do pavimento determinado segundo equação 3.1 ($\text{m}^3/\text{dia}/\text{m}^2$).

k = Coeficiente de permeabilidade da camada drenante (m/dia).

S_R = Declividade resultante (m/m).

O mesmo autor desenvolveu o ábaco mostrado na figura 4.7 a seguir que apresenta a solução para as equações 4.20, 4.21 e 4.22.

O procedimento proposto por Moulton resulta em camadas com espessuras elevadas pois, conforme exposto, baseia-se no princípio da continuidade onde a camada drenante deve ser capaz de dar vazão a toda a água que infiltra no pavimento. O próprio autor, em 1990, recomendou que fosse utilizado o procedimento proposto por Casagrande no qual a saturação da estrutura é admitida por curtos períodos.

Figura 4.7: Ábaco de Moulton para determinação da espessura da camada drenante (Moulton, 1990)

A determinação da vazão drenada pela camada permeável é realizada também com base na equação de Darcy, conforme equação 4.23 apresentada a seguir

$$Q = k \times S_R \times H \quad (4.23)$$

Onde:

Q = Vazão de saída da camada drenante por metro de pavimento (m³/s/m).

k = Permeabilidade da camada drenante (m/s).

S_R = Declividade resultante da camada drenante (m/m).

H = Espessura da camada drenante (m).

4.2.1.2.2. Critério do Tempo de Drenagem

Casagrande e Shannon

O procedimento proposto por Casagrande e Shannon (1952), recomendado pela FHWA e pela AASHTO, apresenta o conceito de tempo de drenagem, definido como o tempo necessário para que se obtenha um determinado grau de saturação para a base partindo-se de uma condição saturada.

Os autores propõem as seguintes equações.

Para $U > 0,5$,

$$T = \left(1,2 - \frac{0,4}{S_1^{1/3}} \right) \left\{ S_1 - S_1^2 \ln \left(\frac{S_1 + 1}{S_1} \right) + S_1 \ln \left[\frac{2S_1 - 2US_1 + 1}{(2 - 2U)(S_1 + 1)} \right] \right\} \quad (4.24)$$

Para $U \leq 0,5$,

$$T = \left(1,2 - \frac{0,4}{S_1^{1/3}}\right) \left\{ 2US_1 - S_1^2 \ln \left(\frac{S_1 + 2U}{S_1} \right) \right\} \quad (4.25)$$

Onde:

U = Porcentagem de drenagem.

S_l = Fator de declividade = $H/(LS)$

H = Espessura da camada granular.

L = Largura da camada granular a ser drenada.

S = Declividade da camada granular.

T = Fator tempo = tkH/n_eL^2

t = Tempo para drenagem da porcentagem U .

k = Permeabilidade da camada granular.

n_e = Porosidade efetiva do material granular.

A solução gráfica do critério de Casagrande e Shannon está apresentada no ábaco da figura a seguir. Casagrande e Shannon recomendam, como critério, drenagem de 50% da umidade de saturação em um prazo de 10 dias.

Figura 4.8: Ábaco para determinação da espessura mínima da camada de drenagem (FHWA, 1998)

Barber e Sawyer

O procedimento proposto por BARBER e SAWYER (1952), também introduz o conceito de tempo de drenagem, nos mesmos moldes do apresentado anteriormente.

Os autores propõem as seguintes equações:

Para $0,5 \leq U \leq 1,0$

$$T = 0,5S_1 - 0,48S_1^2 \log \left(1 + \frac{2,4}{S_1} \right) + 1,15S_1 \log \left[\frac{S_1 - US_1 + 1,2}{(1-U)(S_1 + 2,4)} \right] \quad (4.26)$$

Para $0,0 \leq U \leq 0,5$

$$T = US - 0,48S_1^2 \log\left(1 + \frac{4,8U}{S_1}\right) \quad (4.27)$$

Onde:

U = Porcentagem de drenagem.

S_l = Fator de declividade = $H/(DS)$

H = Espessura da camada granular.

D = Largura da camada granular a ser drenada.

S = Declividade da camada granular.

T = Fator tempo = tkH/n_eL^2

t = Tempo para drenagem da porcentagem U .

k = Permeabilidade da camada granular.

n_e = Porosidade efetiva do material granular.

Christopher, Zhao e Hayden

Baseado no procedimento proposto por CASAGRANDE e SHANNON (1952), CHRISTOPHER, ZHAO e HAYDEN (2001) apresentam a equação 4.28 para a determinação do tempo, em horas, que a camada permeável é capaz de retirar 50% da água drenável da estrutura do pavimento.

$$t = T \times m \times 24 \quad (4.28)$$

Onde:

t = tempo necessário para drenar 50% das águas livres.

T = Fator Tempo.

m = Fator “m” (dias).

O Fator Tempo é obtido do ábaco mostrado na figura 4.9, através da correlação com o Fator Declividade calculado conforme apresentado na equação 4.29 a seguir.

Ressalta-se que a figura 4.9 foi obtida com base na figura 4.8, proposta por MOULTON, através da extrapolação do Fator Declividade para valores superiores a 10,0; considerando-se um Grau de Drenagem de 50%.

Figura 4.9: Fator Tempo (T) em função do Fator Declividade (S_f)

$$S_l = \frac{L_R \times S_R}{H} \quad (4.29)$$

Onde:

S_l = Fator de declividade.

S_R = Declividade resultante.

L_R = Extensão máxima na direção resultante que a água deve percorrer para deixar a estrutura do pavimento.

H = Espessura da camada drenante.

O Fator “ m ” é determinado através da equação 4.30.

$$m = \frac{n_0 \times L_R^2}{k \times H} \quad (4.30)$$

Onde:

n_0 = Porosidade efetiva da camada drenante.

$k \times H$ = Transmissividade da camada drenante.

CHRISTOPHER, ZHAO e HAYDEN (2001) apud FHWA (1992) recomendam que para rodovias de classe especial, segundo critério de classificação do DNER, o sistema de drenagem subsuperficial deve ser capaz de drenar 50% da água livre em menos de 1 hora e, para rodovias de classe I, em menos de 2 horas.

CHRISTOPHER, ZHAO e HAYDEN (2001) apud U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1992) recomenda para rodovias de classe II, que 50% da água drenável seja retirada do pavimento em até 1 dia.

Com relação às metodologias de dimensionamento da camada drenante, não há uma unanimidade acerca de qual procedimento seria o mais indicado do ponto de vista técnico econômico. A tabela 4.2 resume as diferenças nos critérios recomendados.

Tabela 4.2: Procedimentos de dimensionamento hidráulico da camada drenante.

Autor/Entidade	Taxa de Infiltração	Metodologia Recomendada	Princípio do Dimensionamento
Cedergren (1973) / DNER (1996)	Cedergren (1973)	Lei de Darcy (1850)	$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{saída}}$
AASHTO (1986) / FHWA (1990)	Ridgeway (1976)	Casagrande e Shannon (1952)	Tempo de drenagem da % de umidade

4.2.1.3. Verificação Quanto ao Critério de Filtro

Na direção contrária da elevada permeabilidade, característica fundamental para que a camada drenante apresente bom desempenho e, obtida através do emprego de materiais graúdos de granulometria aberta, os materiais constituintes desta camada devem apresentar uma distribuição granulométrica suficientemente fina a fim de impedir a penetração das partículas de granulometria fina dos solos, ou de camadas granulares sub ou sobrejacentes, evitando assim a colmatagem da camada drenante e a perda de resistência das camadas circunvizinhas.

Para garantir a condição de filtro, Bertran, orientado por Terzaghi e Casagrande, e endossado pelo USACE propõe a seguinte relação:

$$D_{15\text{ filtro}} \leq 5D_{85\text{ solo}} \quad (4.31)$$

Onde:

$D_{15\text{ filtro}}$ = Diâmetro cujo 15% dos agregados constituintes do material do filtro, em massa, possuem diâmetros inferiores.

$D_{85\text{ solo}}$ = Diâmetro cujo 85% das partículas do solo, em massa, possuem diâmetros inferiores.

CEDERGREN (1973) apresenta que para prevenir a migração dos finos do subleito, D_{50} do material da base deve ser inferior a $25 \times D_{50}$ do subleito, sendo D_{50} o diâmetro de 50% das partículas, em massa. Esta relação também é recomendada por MOULTON (1990).

$$\frac{D_{50\text{ Filtro}}}{D_{50\text{ Solo}}} < 25 \quad (4.32)$$

Com a finalidade de evitar a segregação do material do filtro, quando da execução do dispositivo, e a lixiviação dos finos durante a vida útil de serviço do mesmo, Moulton propõe que este material apresente um Coeficiente de Uniformidade, definido por D_{60}/D_{10} , maior que 2, porém inferior a 20.

$$2 < \frac{D_{60}}{D_{10}} < 20 \quad (4.33)$$

O USACE recomenda que o material filtrante apresente um Coeficiente de Uniformidade inferior ou igual a 25.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 25 \quad (4.34)$$

4.2.2. Drenos Longitudinais Rasos

4.2.2.1. Dreno Cego

O dreno cego, também conhecido como dreno francês, consiste basicamente em uma trincheira preenchida com agregados, ou mistura de agregados e areia, com permeabilidade superior à do solo circunvizinho, cuja função é captar águas livres provenientes da camada de base drenante, conduzindo-as para dispositivos apropriados de descarga.

O dimensionamento destes drenos deve seguir à lei de Darcy, apresentada na equação 4.17, tendo como finalidade a determinação dos espaçamentos dos dispositivos de saída d'água em função de declividade longitudinal, da permeabilidade do material de enchimento e da seção transversal do dreno.

Ressalta-se que quando do dimensionamento do dreno, a granulometria do material deve ser verificada também quanto ao critério de filtro apresentado adiante no item 4.2.2.3.

4.2.2.2. Dreno Tubular

Consiste basicamente de um dreno cego, porém munido de tubulação perfurada ou fendilhada, com a função de permitir a entrada e o fluxo d'água, aumentando assim a capacidade de vazão do dispositivo.

De maneira análoga ao dreno cego, o dimensionamento consiste basicamente na determinação do espaçamento dos dispositivos de saídas d'água, sendo este determinado em função da capacidade de vazão do dreno. Na determinação da capacidade de vazão do dreno é desprezado o escoamento que ocorre através do material granular, sendo considerada somente a capacidade hidráulica do dreno, determinada através da Fórmula de Manning, apresentada na equação 4.35 e do princípio da continuidade apresentado na equação 4.36.

$$V = \frac{R_h^{2/3} \times i^{1/2}}{n} \quad (4.35)$$

Onde:

V = Velocidade de escoamento (m/s).

R_h = Raio Hidráulico (m).

i = Declividade longitudinal (m/m).

n = Coeficiente de rugosidade.

$$Q = A \times V \quad (4.36)$$

Em que:

A = Área molhada (m²).

Q = Vazão (m³/s)

A diferença fundamental que normalmente ocorre nos dimensionamentos, principalmente quando comparados com resultados de soluções gráficas é devido aos diversos critérios (hipóteses) empregados para considerar a altura da borda livre no interior do conduto, ou seja, a tubulação irá trabalhar a seção plena ou até um valor pré-fixado de lâmina d'água em relação ao diâmetro do tubo.

MOULTON (1990), apresenta uma alternativa em pré-fabricado para os drenos longitudinais rasos, constituída basicamente de uma barreira vertical impermeável e

ondulada, revestida com manta geotêxtil, formando canais verticais que, por sua vez, estão conectados a um tubo longitudinal situado na base da barreira.

4.2.2.3. Verificação Quanto ao Critério de Filtro

Quanto ao critério de filtro, no caso dos drenos longitudinais rasos, são propostas as mesmas recomendações quanto às relações granulométricas apresentadas para a camada drenante no item 4.2.1.3.

Em função da geometria destes dispositivos, que possuem uma relação Perímetro/Volume relativamente pequena, torna-se economicamente interessante, a utilização de mantas geotêxteis no revestimento destes dispositivos, prevenindo contra a infiltração de finos para o interior do dreno, garantindo a boa permeabilidade na interface deste com o solo adjacente e possibilitando a utilização de materiais com elevada permeabilidade.

Ressalta-se que as correlações referentes ao Coeficiente de Uniformidade propostas por Moulton e pelo USACE ainda devem ser observadas, pois avaliam o comportamento interno do material filtrante, garantindo o bom travamento do mesmo, prevenindo a segregação e o carreamento dos finos do próprio material constituinte do filtro.

Nos drenos constituídos de tubos perfurados ou fendilhados, para prevenir a infiltração dos finos do material do filtro para o interior do conduto, o USACE propõe que sejam observadas as seguintes relações.

- Tubos Perfurados

$$\frac{D_{85\text{ filtro}}}{\text{Diâmetro do Orifício}} > 1,0 \quad (4.37)$$

- Tubos Fendilhados

$$\frac{D_{85 \text{ filtro}}}{\text{Largura da Fenda}} > 1,2 \quad (4.38)$$

4.3. Manutenção

Atualmente discute-se ainda a importância da manutenção dos sistemas de drenagem subsuperficiais que devem não só propiciar um bom desempenho quando novos, mas também ao longo de toda a vida útil do pavimento.

Não são raros os casos onde os drenos são obstruídos por raízes ou onde os tubos do sistema de drenagem são deformados por falta de cuidados adequados quando de sua instalação ou da realização de procedimentos de manutenção, seja no próprio dreno ou nas proximidades deste.

As freqüentes aberturas de valas para instalação de redes de água e de esgoto constituem um problema comum aos sistemas de drenagem de pavimentos urbanos. Normalmente, a profundidade das valas são superiores às espessuras dos pavimentos. Quando estas são reaterradas não há a preocupação da manutenção da continuidade e das características drenantes do pavimento, portanto, no caso da existência de camada permeável, por exemplo, o reaterro de uma vala aberta longitudinalmente impedirá que a água drenada pela camada atinja o dreno de borda (FWA, 1987).

5. CONCEPÇÃO DOS PAVIMENTOS QUANTO À DRENAGEM

Muitos projetistas consideram prático, econômico, ou necessário, acelerar a retirada d'água da estrutura do pavimento. Como consequência deste descaso, as bases e sub-bases compactadas e estabilizadas, apresentam baixa permeabilidade e retém água dentro da estrutura do pavimento.

Uma indicação da baixa capacidade de drenagem das camadas de base e sub-base normalmente utilizadas pode ser verificada em pavimentos ainda na fase de construção pela observação após as chuvas. Muitas vezes, a água permanece empoçada por vários dias sobre a superfície de bases granulares recém construídas sem adição de qualquer elemento estabilizante, cimentante ou impermeabilizante.

Em muitos casos, a camada de brita graduada simples, devido ao excesso de finos na granulometria deste material, tem sua permeabilidade sensivelmente reduzida e, mesmo nos poucos casos onde são previstas saídas para águas livres, a baixa condutividade hidráulica limita a condição de drenagem da estrutura, provocando o acúmulo d'água nesta camada.

Em certos locais, principalmente em regiões de corte, a estrutura do pavimento, rodoviário ou urbano fica encaixada no solo e, quando não são necessários drenos profundos para rebaixamento do lençol freático, em muitos casos, não são instalados drenos de pavimento, ou seja, não é considerada a necessidade da rápida retirada de águas livres da estrutura do pavimento.

A drenagem em estruturas de pavimento encaixadas na terraplenagem é determinada pelos 60 cm ou 90 cm mais próximos da superfície do pavimento, e sua estrutura permanece inundada por longo período após uma chuva, tanto nas áreas de corte ou como em aterro (CEDERGREN, 1973).

Como, na grande maioria dos casos, uma ou mais camadas estruturais do pavimento apresentam coeficiente de permeabilidade maior que o do solo adjacente, o pavimento acaba não só tendo bloqueada a saída das águas que nele penetraram através da superfície ou pela elevação do lençol freático, como também funciona como um dreno, coletando a água do solo lateral.

De modo semelhante, são raros os projetos que não utilizam estruturas diferenciadas para pista principal e acostamentos. Quando os acostamentos são pavimentados, percebe-se a preocupação de alguns projetistas em não bloquear as camadas drenantes da estrutura do pavimento, porém, estes esforços, na maioria das vezes, resumem-se a adoção de camadas estruturais granulares, sem a preocupação com a compatibilização hidráulica entre os coeficientes de permeabilidade e as respectivas vazões das camadas da estrutura do pavimento e do acostamento.

Existem casos em que, no projeto estrutural do pavimento, foram utilizadas camadas constituídas por pedra britada graúda ou pedregulho, materiais que apresentam excelente permeabilidade. Porém, durante o projeto, não foram avaliados os benefícios que um eficiente sistema de drenagem poderia trazer ao desempenho dos pavimentos e, conseqüentemente não foram projetadas saídas para as águas coletadas pelas camadas pedregulhosas que funcionam como vasos comunicantes confinados entre camadas com menor permeabilidade.

Considerando-se o greide da rodovia, estas águas criam excessos de pressão de baixo para cima nos pontos baixos, intensificando e acelerando a degradação dos pavimentos. Tais ocorrências levaram engenheiros a conclusões errôneas de que camadas estruturais de graduações abertas eram prejudiciais à estrutura dos pavimentos.

Conclui-se, portanto, que não havendo o correto dimensionamento hidráulico da drenagem subsuperficial do pavimento, mesmo com camadas que apresentem uma permeabilidade superior à do solo local, não haverá suficiente vazão para as águas que penetram na estrutura, seja pela não previsão de saídas para estas águas ou pela insuficiência de permeabilidade e, como conseqüência, esta camada funcionará como um reservatório de água dentro da estrutura do pavimento.

WYATT e MACARI (2000) apresentam um estudo da influência do sistema de drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos de CA e de CCP, com vistas à adequação das metodologias de projeto.

No caso dos pavimentos de CA, foram avaliadas duas estruturas sendo uma constituída por base granular e outra por base tratada com cimento Portland, ambas munidas de dreno longitudinal de borda. Analisando-se as permeabilidades das camadas de base e a capacidade de vazão dos drenos verificou-se que o volume de água que atingia os drenos era desprezível quando comparado com a capacidade destes.

No projeto dos dois pavimentos mencionados acima tomou-se o cuidado de instalar drenos subsuperficiais que proporcionem uma boa drenagem da estrutura. Porém, em ambos os casos, em função da baixa permeabilidade da camada de base, os drenos de borda não trouxeram qualquer benefício ao desempenho da estrutura do pavimento. Caso as estruturas destes pavimentos tenham sido dimensionadas considerando-se os benefícios trazidos pela utilização dos drenos, estas serão solicitadas em uma condição de umidade mais crítica do que a prevista em projeto.

Estas considerações equivocadas elevarão o custo de manutenção ou até conduzirão à precoce ruptura destes pavimentos.

Para que um pavimento apresente características efetivas de boa drenagem subsuperficial, é necessário o dimensionamento hidráulico deste sistema como um todo, ou seja, compatibilizar o volume de água que infiltra na estrutura do pavimento, a permeabilidade da camada drenante, a capacidade de vazão dos drenos de borda e o espaçamento das saídas destes drenos.

Caso não haja este cuidado, não se atinge os benefícios esperados no desempenho da estrutura, obtidos pela utilização de um sistema de drenagem adequado.

Aparentemente a maioria dos pavimentos drenantes executados recentemente no Brasil apresenta um comportamento aquém do desejado, ou necessário, mesmo nos casos em que foram empregadas camadas de base de brita graduada de graduação aberta e drenos de borda munidos de tubos perfurados.

Segundo MALLELA, TITUS-GLOVER e DARTER (2000), o projeto de sistemas de drenagem subsuperficial deve seguir os seguintes passos:

- Verificação da necessidade de implantação da drenagem subsuperficial.
- Definição das concepções do sistema de drenagem superficial mais adequado para a situação de projeto.
- Dimensionamentos hidráulico e estrutural do sistema de drenagem subsuperficial e sua integração com a estrutura do pavimento.
- Especificação das características dos materiais constituintes dos sistemas de drenagem projetado, com vistas ao desempenho e à manutenção do mesmo ao longo do período de projeto.
- Especificações de construção e de manutenção.

CHRISTOPHER, ZHAO e HAYDEN (2001) apresentam que a implantação de geocompostos drenantes no interior da estrutura do pavimento pode ser realizada em 3 posições distintas. A primeira é sob a base granular (figura 5.1 a) onde, além de proporcionar uma redução no tempo de drenagem, funciona também como camada de bloqueio evitando a penetração dos finos do subleito ou da sub-base no interior da camada granular. A segunda é sob a camada superficial de CA, ou de CCP (figura 5.1 b), tendo como principal função a rápida remoção das águas que infiltram através das trincas na superfície do pavimento e, como função secundária, em um caso extremo onde mesmo com a utilização do geocomposto ocorre a saturação da estrutura do pavimento, evita o bombeamento de finos através das trincas, ou juntas, da camada superficial do pavimento. A terceira posição onde a implantação do geocomposto oferece grandes vantagens ao desempenho do pavimento refere-se apenas às regiões em que o subleito é susceptível ao congelamento. Nestes casos pode-se instalá-lo a uma certa profundidade, no interior do subleito, com a função de impedir a ascensão capilar de umidade evitando-se assim o congelamento do subleito e, conseqüentemente, as indesejáveis conseqüências deste fenômeno (figura 5.1 c).

Figura 5.1: Possibilidades de implantação do geocomposto.(Christopher, Zhao e Hayden, 2001)

As mantas geotêxteis vem sendo utilizadas em pavimentos desde a década de 20. Em 1926 o Departamento Rodoviário da Carolina do Sul realizou uma série de experimentos a este respeito. Em 1993 foram realizadas pesquisas pelo “*Virginia Tech*” para avaliar o desempenho de geotêxteis e geogrelhas quando solicitadas por cargas dinâmicas sob condições controladas em laboratório (LOULIZI et al, 1999).

Em 1994, foi instrumentado um trecho de 150 m de uma rodovia secundária, com estrutura do tipo flexível, localizada em Bedford Country. Este segmento foi subdividido em 9 seções, sendo que as seções de 1 a 3 possuíam camada de base granular de calcário com 10 cm de espessura, as seções de 4 a 6 possuíam camada de base com 15 cm de espessura e as seções de 7 a 9 possuíam camada de base com 20 cm de espessura. Para cada espessura de camada de base, uma seção recebeu manta geotêxtil entre a camada de base e o subleito, uma seção recebeu geogrelha e uma seção era mantida na forma original tendo a função de seção de controle. Este segmento foi solicitado por um tráfego diário médio de 500 veículos, sendo que 8 a 10% era composto por caminhões.

Os autores concluíram, baseando-se nos resultados das análises realizadas com emprego de *Ground-penetrating Radar*, do *Falling Weight Deflectometer* e com o levantamento de afundamento nas trilhas de roda e abertura de cavas que a utilização de geossintéticos melhora o desempenho dos pavimentos. Este ganho foi mais sensível nos trechos onde foi utilizada a manta geotêxtil. Considerando-se o limite de 20 mm de profundidade na deformação de trilha de roda, a seção de controle suportou um número “N” igual a $3,0 \times 10^4$, e as seções com geogrelha e geotêxtil resistiram a $5,4 \times 10^4$ e $7,9 \times 10^4$, respectivamente.

WYATT e MACARI (2000), apresentam um estudo onde foi avaliada a influência do sistema de drenagem subsuperficial no desempenho dos pavimentos. O trabalho baseou-se na análise das informações constantes nos bancos de dados relacionados a seguir com a respectiva quantidade de segmentos analisados.

- NCHRP 56 seções
- LTPP 49 seções

Como conclusão, o trabalho apresenta que a utilização de drenos de borda juntamente com bases granulares de granulometria “densa”, ou seja, pouco permeáveis, tem pouco ou nenhum efeito sobre o surgimento de afundamentos nas trilhas de rodas.

6. LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO REALIZADO NO TRECHO EXPERIMENTAL

6.1. Características do Trecho

Com a finalidade de consolidar as informações encontradas na bibliografia com relação à influência da eficiência do sistema de drenagem subsuperficial no desempenho do pavimento, realizou-se um levantamento de campo em segmento rodoviário pavimentado com camada de rolamento em CA e estrutura do tipo flexível.

O trecho experimental em questão está localizado no município de Piracicaba, estado de São Paulo. Consiste em parte da pista nova, que atualmente encontra-se em processo de implantação, da duplicação da rodovia SP-308, Rodovia do Açúcar.

A figura 6.1 apresenta a localização do trecho em questão.

Figura 6.1: Mapa de situação

O segmento analisado apresenta uma extensão de 840 m em tangente, greide praticamente em nível e largura de plataforma de 10,5 m, sendo que até a estaca 138 está em região de corte e, a partir desta até o final do trecho está sobre aterro, portanto, aproximadamente metade do segmento está construído em corte e metade em aterro. A figura 6.2 apresenta uma vista geral o trecho em questão.

Figura 6.2: Vista geral do trecho experimental

A estrutura do pavimento estudado é do tipo flexível, constituída por subleito de solo laterítico, reforço de subleito com material laterítico selecionado, com cerca de 20 cm de espessura, camada de base granular, com aproximadamente 25 cm de espessura, e camada de rolamento em CA de granulometria aberta “binder” e cerca de 5 cm de espessura. Sobre esta última camada será, ainda, adicionada uma camada de rolamento em CA denso.

Especificamente no segmento experimental, não foi prevista a implantação de sistema de drenagem subsuperficial.

A figura 6.3 apresenta a seção do pavimento analisado e ilustra a necessidade de cuidados que devem tomados com relação à drenagem, mesmo durante a fase de construção do pavimento.

Figura 6.3: Erosão na borda da pista do trecho experimental expondo a estrutura do pavimento.

Ressalta-se que o segmento ainda não foi aberto ao tráfego, não apresentando, portanto, defeitos como trilhas de roda ou trincamento, característicos da solicitação deste.

Com base no exposto, apesar do revestimento ser constituído de binder, a infiltração através da superfície pode ser considerada desprezível. O lençol freático encontra-se distante da superfície e não foram localizadas nascentes quando da execução do segmento em questão.

Portanto, a infiltração de água predominante ocorreu pelas bordas do pavimento e foi agravada devido à ausência do sistema de drenagem ainda não implantado. Nas

figuras 6.4 e 6.5 a seguir é possível identificar a marca d'água na região circunvizinha, em uma cota próxima a da superfície do pavimento, indicando que antes da data do levantamento houve um alagamento no local.

Figura 6.4: Marca d'água indicando ocorrência de alagamento recente contíguo à estrutura do pavimento – vista 1.

Figura 6.5: Marca d'água indicando ocorrência de alagamento recente contíguo à estrutura do pavimento – vista 2.

6.2. Levantamento Deflectométrico Realizado

Com vistas à avaliação da influência da infiltração d'água pela borda do pavimento no desempenho estrutural do mesmo, foi realizado o levantamento deflectométrico no dia 07 de janeiro de 2003, logo após um período de três dias consecutivos de chuva e um dia sem ocorrência de precipitação, conforme apresentado na tabela 6.1 a seguir. Os dados pluviométricos foram levantados junto ao Departamento de Meteorologia da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, e estão apresentados no Anexo - A.

Tabela 6.1: Precipitações nos dias que antecederam ao levantamento (dados obtidos junto à Escola Superior Agricultura Luiz de Queiros - Departamento de Metereologia)

Dia	Precipitação (mm)
03/01/03	8,80
04/01/03	30,30
05/01/03	13,10
06/01/03	0,00
07/01/03	0,00

É interessante notar que nos três dias que antecederam o levantamento em que ocorreram precipitações, a somatória foi superior a 50 mm. Durante o *AASHO Road Test*, a precipitação anual nas pistas foi de cerca de 700 mm. Portanto, em apenas três dias a precipitação atingiu aproximadamente 8% das precipitações que ocorreram nas pistas da AASHTO.

Tendo em vista os objetivos do levantamento deflectométrico, foram levantadas bacias de deflexão de 20 em 20 m, a 1,5 m do bordo direito, no eixo e a 1,5 m do bordo esquerdo, adotando-se o sentido crescente do estaqueamento, portanto, em cada estaca foram levantadas 3 bacias de deflexões, conforme apresentado na figura 6.6 a seguir.

Figura 6.6: Desenho esquemático dos pontos de análise.

O levantamento das bacias de deflexão foi realizado fazendo-se uso do equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

A figura 6.7 ilustra o levantamento sendo realizado no bordo direito.

Figura 6.7: Levantamento da bacia de deflexão no bordo direito.

6.3. Apresentação dos Resultados

As bacias de deflexão levantadas estão apresentadas no Anexo - B. A seguir, nas figuras 6.8 a 6.14 estão apresentadas as deflexões (D_0) no ponto de aplicação da carga, bem como outras deflexões (D_{20}), (D_{30}), (D_{45}), (D_{65}), (D_{90}) e (D_{120}) obtidas respectivamente a 20 cm, 30 cm, 45 cm, 65 cm, 90 cm e 120 cm do ponto de aplicação da carga, para todo o segmento.

Figura 6.8: Deflexões no ponto de aplicação da carga (D_0).

Figura 6.9: Deflexões a 20 cm do ponto de aplicação da carga (D_{20}).

Figura 6.10: Deflexões a 30 cm do ponto de aplicação da carga (D_{30}).

Figura 6.11: Deflexões a 45 cm do ponto de aplicação da carga (D_{45}).

Figura 6.12: Deflexões a 65 cm do ponto de aplicação da carga (D_{65}).

Figura 6.13: Deflexões a 90 cm do ponto de aplicação da carga (D_{90}).

Figura 6.14: Deflexões a 120 cm do ponto de aplicação da carga (D_{120}).

6.4. Análise dos Resultados

Na figura 6.8 verifica-se que as deflexões levantadas no ponto de aplicação da carga, D_0 , nos bordos da plataforma, apresentam valores significativamente superiores aos das deflexões encontradas no eixo da mesma, ao longo de todo o segmento. Com base nos resultados do tratamento estatístico, apresentados na tabelas 6.2 observa-se que as deflexões características, em ambas as bordas, apresentam valores cerca de 65% superiores à deflexão característica no eixo.

Tabela 6.2: Resumo dos resultados para deflexões no ponto de aplicação da carga.

Deflexões (10^{-2} mm)	Bordo Esquerdo	Eixo	Bordo Direito
Média	70,8	44,1	75,0
Característica	88,0	53,5	89,1
Desvio em relação à deflexão característica no eixo (%)	64,5	0,0	66,5

Observando-se a figura 6.9, verifica-se que para a deflexão a 1,20 m do ponto de aplicação da carga, D_{120} , não há a mesma discrepância entre as deflexões dos bordos e do eixo, encontrada no ponto de aplicação da carga, ilustradas na figura 6.14. A tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos através do tratamento estatísticos dos dados levantados, onde se constata que a variação entre as deflexões características do eixo e de ambos os bordos é inferior a 15%.

Tabela 6.3: Resumo dos resultados para deflexões a 1,20 m do ponto de aplicação da carga.

Deflexões (10^{-2} mm)	Bordo Esquerdo	Eixo	Bordo Direito
Média	2,5	2,3	2,6
Característica	3,0	2,7	3,1
Desvio em relação à deflexão característica do eixo (%)	11,1	0,0	14,8

Através do emprego do programa computacional “RETROANA” realizou-se a retroanálise dos dados deflectométricos obtidos em campo. Os resultados dos módulos de resiliência dos materiais constituintes das diversas camadas, bem como as respectivas médias e desvios padrão estão apresentados nas tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 a seguir.

Nas tabelas, E_1 , E_2 e E_3 , correspondem aos módulos de resiliência das camadas de revestimento (CA), de base granular e do subleito, respectivamente.

Ressalta-se que, na análise estatística, foram eliminados por completo os resultados das estacas em que o valor de um ou mais módulo divergiram do valor médio 3 vezes, ou mais, o desvio padrão.

Tabela 6.4: Módulos de Resiliência – Bordo Direito.

Módulos de Resiliência			
Rodovia: SP-308			
Segmento: Borda Direita			
Posição	Módulos de Resiliência (MPa)		
Estaca	E1	E2	E3
118	3.083	105	128
119	2.033	108	127
120	1.849	93	401
121	2.676	95	328
122	1.331	69	334
123	1.654	102	445
124	1.239	133	116
125	4.392	113	98
126	1.094	106	539
127	2.917	158	237
128	4.560	130	77
129	2.731	121	159
130	2.650	171	512
131	1.084	135	452
132	2.165	118	74
133	3.339	130	74
134	620	114	358
135	1.660	157	459
136	1.472	118	459
137	3.468	107	115
138	1.826	107	131
139	872	108	388
140	2.176	97	463
141	6.238	124	98
142	1.144	127	599
143	1.719	118	549
144	1.645	130	454
145	1.974	157	450
146	2.761	130	282
147	1.520	124	382
148	1.923	113	367
149	2.736	140	305
150	3.502	112	422
151	5.552	130	85
152	3.903	198	456
153	5.014	209	301
154	1.523	209	473
155	4.583	173	413
156	1.632	195	419
157	4.042	165	431
158	5.220	128	470
159	1.540	150	446
160	2.918	130	310
Média	2.604,19	131,47	329,89
Des. Pad.	1.371,73	31,17	155,55
Coef. de Var.(%)	52,67	0,24	0,47

Tabela 6.5: Módulos de Resiliência – Eixo.

Módulos de Resiliência			
Rodovia: SP-308 Segmento: Eixo Central			
Posição	Módulos de Resiliência (MPa)		
Estaca	E1	E2	E3
118	3.508	236	555
119	1.478	245	506
120	1.879	283	527
121	2.302	248	436
122	3.901	236	379
123	1.047	249	496
124	1.878	210	455
125	2.704	236	482
126	1.848	186	494
127	3.271	186	103
128	1.642	225	644
129	2.271	236	672
130	3.299	342	652
131	3.185	359	625
132	1.824	343	647
133	3.835	189	99
134	832	195	601
135	798	206	581
136	3.187	195	515
137	1.965	177	678
138	3.076	176	232
139	2.005	212	228
140	3.417	236	617
141	3.699	297	611
142	3.671	257	555
143	6.189	308	658
144	7.300	280	478
145	5.378	254	731
146	3.608	282	472
147	1.503	270	522
148	2.215	270	522
149	1.734	360	567
150	2.694	280	539
151	2.243	311	494
152	1.935	401	519
153	1.085	390	561
154	891	351	554
155	137.268	119	233
156	2.614	451	672
157	49.990	159	161
158	3.675	372	652
159	1.571	285	658
160	2.336	342	645
Média	2.461,72	271,20	525,59
Des. Pad.	1.028,05	69,12	144,85
Coef. de Var.(%)	54,79	0,30	0,58

LEGENDA

Ponto Desconsiderado na Análise Estatística

Tabela 6.6: Módulos de Resiliência – Bordo Esquerdo.

Módulos de Resiliência			
Rodovia: SP-308			
Segmento: Borda Esquerda			
Posição	Módulos de Resiliência (MPa)		
Estaca	E1	E2	E3
118	1.592	157	454
119	2.175	130	156
120	2.420	130	524
121	3.340	97	347
122	1.094	105	322
123	2.522	115	349
124	1.014	230	396
125	814	108	376
126	774	127	421
127	1.550	76	632
128	3.844	124	80
129	10.880	209	69
130	2.803	118	81
131	2.898	81	88
132	3.185	161	262
133	2.236	108	109
134	2.392	102	107
135	1.672	122	572
136	4.537	107	97
137	1.352	107	70
138	4.204	107	84
139	2.459	140	190
140	2.521	168	236
141	1.561	164	184
142	1.155	114	503
143	2.614	138	175
144	905	82	525
145	1.844	139	532
146	6.179	118	82
147	2.188	157	450
148	1.392	127	467
149	575	105	478
150	1.645	177	404
151	12.625	173	75
152	2.114	235	468
153	54.548	130	113
154	7.553	143	86
155	9.535	130	84
156	2.107	238	524
157	14.370	143	88
158	8.216	130	81
159	5.382	130	65
160	3.493	171	539
Média	2.348,64	133,73	315,24
Des. Pad.	1.286,86	39,88	183,94
Coef. de Var.(%)	54,79	0,30	0,58

LEGENDA

Ponto Desconsiderado na Análise Estatística

Estatisticamente, ao invés de analisar as médias dos módulos, preferiu-se analisar a média das relações entre os módulos obtidos em cada borda com o do eixo para cada estaca. Optou-se por este procedimento com a finalidade de manter-se a vinculação existente entre os três pontos analisados na mesma estaca.

Os resultados desta análise estão apresentados na tabela 6.7 a seguir.

Tabela 6.7: Variação no Módulo de Resiliência.

Posição Estaca	Relação de Módulos de Resiliência (%)					
	Bordo Direito/Eixo			Bordo Esquerdo/Eixo		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
118	0,879	0,445	0,230	0,454	0,666	0,818
119	1,375	0,440	0,251	1,471	0,529	0,308
120	0,984	0,329	0,761	1,288	0,458	0,995
121	1,162	0,384	0,752	1,451	0,394	0,797
122	0,341	0,294	0,882	0,280	0,445	0,851
123	1,580	0,411	0,897	2,409	0,464	0,705
124	0,660	0,634	0,256	0,540	1,098	0,871
125	1,624	0,477	0,204	0,301	0,456	0,780
126	0,592	0,571	1,092	0,419	0,683	0,852
127	0,892	0,851	2,297	0,474	0,408	6,134
128	2,777	0,576	0,120	2,341	0,550	0,124
129	1,202	0,513	0,237			
130	0,803	0,500	0,785	0,850	0,345	0,124
131	0,340	0,375	0,723	0,910	0,224	0,140
132	1,187	0,344	0,114	1,746	0,470	0,405
133	0,871	0,686	0,745	0,583	0,570	1,102
134	0,745	0,585	0,595	2,875	0,524	0,177
135	2,080	0,762	0,790	2,094	0,594	0,984
136	0,462	0,605	0,891	1,424	0,550	0,189
137	1,765	0,605	0,169	0,688	0,605	0,103
138	0,594	0,610	0,564	1,367	0,610	0,361
139	0,435	0,507	1,701	1,226	0,658	0,834
140	0,637	0,413	0,751	0,738	0,714	0,382
141	1,686	0,416	0,161	0,422	0,552	0,302
142	0,312	0,494	1,079	0,315	0,444	0,906
143						
144						
145	0,367	0,617	0,615	0,343	0,547	0,728
146	0,765	0,459	0,597	1,713	0,417	0,173
147	1,011	0,459	0,732	1,456	0,582	0,861
148	0,868	0,417	0,704	0,628	0,471	0,895
149	1,578	0,388	0,539	0,332	0,292	0,844
150	1,300	0,401	0,784	0,611	0,633	0,751
151	2,475	0,417	0,172			
152	2,017	0,495	0,877	1,093	0,588	0,901
153	4,622	0,535	0,536			
154	1,709	0,595	0,854			
155						
156	0,624	0,431	0,623	0,806	0,527	0,779
157						
158	1,420	0,345	0,722			
159	0,980	0,525	0,678	3,425	0,455	0,099
160	1,249	0,379	0,481	1,495	0,500	0,835
Média	1,204	0,495	0,666	1,134	0,530	0,768
Des. Pad.	0,819	0,121	0,422	0,792	0,148	1,002

LEGENDA

Ponto Desconsiderado na Análise Estatística

Com base no exposto, conclui-se que:

- A variação encontrada entre os módulos médios do eixo e dos bordos do CA, está incluída na dispersão das diversas fases do procedimento de execução do revestimento.
- O coeficiente de variação da ordem de 50% obtido no módulo de resiliência do CA indica uma sensível heterogeneidade nas características da camada resultante que, em função do seu processo executivo, deveria apresentar maior homogeneidade. Ressalta-se que esta elevada variação pode ter origem nas características dos materiais envolvidos na mistura e/ou, no processo de usinagem e/ou no procedimento de compressão da massa.
- A maior parcela da redução da capacidade estrutural é causada pela perda de suporte na camada de base, evidenciada pela redução do módulo resiliente (E_2) em cerca de 60% em relação ao do eixo, no caso estudado.
- O subleito, apresentou uma redução de cerca de 30% no módulo de resiliência (E_3) em relação ao eixo.
- A infiltração d'água pelas bordas da estrutura do pavimento ocasiona uma redução na capacidade estrutural do pavimento nas extremidades da plataforma em relação ao eixo.

Os dados obtidos no segmento experimental estão em acordo com os resultados apresentados por NOGAMI e VILLIBOR (1995), que realizaram extenso estudo acerca do comportamento peculiar dos solos tropicais que culminou com a proposição de metodologia de classificação, específica para o emprego destes solos em obras rodoviárias, Classificação MCT que vem sendo largamente utilizada.

No trabalho citado os autores apresentam um estudo sobre a variação na capacidade de suporte dos materiais quando estes são expostos a níveis de umidade próximos ao de saturação, em comparação com a condição de umidade ótima.

A tabela 6.8 apresenta os resultados deste estudo.

Tabela 6.8: Classificação da perda de suporte por imersão (Nogami e Villbor,1995)

Perda de Suporte por Imersão	
Grau	(%)
Elevada	> 70
Média	40 a 70
Baixa	< 40

CHRISTOPHER, ZHAO e HAYDEN (2001) afirmam que a elevação do teor de umidade em bases e sub-bases granulares não tratadas pode resultar na redução da rigidez da camada em 50% ou mais. Segundo os autores, em subleitos saturados, a redução no módulo de resiliência pode atingir valores superiores a 50%.

Segundo CAMACHO (2002), em consequência das chuvas as umidades na camada de base tornam-se maiores nas proximidades das bordas do pavimento do que em seu eixo longitudinal.

O autor ainda conclui que este maior umedecimento das bordas, possivelmente se mantenha ao menos na maior parte do ano.

7. AS CONSIDERAÇÕES DA DRENAGEM NOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Desde 1910, até cerca de 1940, muitos engenheiros de pavimentação ressaltavam intensamente a necessidade de drenagem dos leitos rodoviários, e quase todos os textos a respeito de construção de rodovias, bem como muitos artigos publicados nesta época continham a afirmação: “Há três coisas que são necessárias para se conseguir um bom leito rodoviário: drenagem, drenagem e mais drenagem”.

Porém, com o advento dos métodos racionais de projeto de pavimento e dos ensaios de laboratório com amostras saturadas dos materiais de subleito e das camadas de base, a ênfase trasladou-se para a densidade e a estabilidade, em lugar da drenagem.

Um dos primeiros métodos de dimensionamento que fazia uso da resistência saturada dos materiais constituintes de subleitos e de bases granulares foi o CBR, que baseava-se no ensaio originado na Califórnia, de autoria de O. J. Porter, que explica a necessidade de encharcar os corpos de prova, do seguinte modo:

“Os resultados dos ensaios indicam que as argilas, os adobes e outros solos adversos, usualmente possuem um bom suporte quando totalmente compactados e em estado relativamente seco. Esta condição ideal entretanto não se mantém por um período de vários anos. Tais materiais absorvem suficiente umidade das chuvas, do lençol subterrâneo ou da capilaridade, que causa expansão e, como consequência do aumento do conteúdo de água, o solo comumente chega a um estado de compactação e umidade comparável ao das amostras encharcadas do ensaio de suporte.”

Quando o dimensionamento do pavimento é baseado em ensaios de amostras saturadas, muitos engenheiros admitem que não seja necessário considerar-se a variação de umidade nas camadas do pavimento, ao longo do período de projeto. Como consequência, não são consideradas as influências dos sistemas de drenagem, sejam elas favoráveis ou desfavoráveis, ao desempenho do pavimento.

Ressalta-se que a avaliação dos materiais granulares saturados reflete apenas a redução na capacidade de suporte, não considerando de maneira alguma os danos causados pela poro-pressão, ou bombeamento.

Portanto, os procedimentos de dimensionamento baseados no ensaio de CBR geralmente asseguram suficiente espessura dos pavimentos para evitar sobrecargas dos subleitos. Entretanto, alguns dos danos causados pela água ocorrerão independentemente da espessura ou da estabilidade das camadas de base utilizadas, pois são causados pelas poro-pressões e pelos movimentos da água livre contida na estrutura, conforme apresentado anteriormente.

Conscientes desta deficiência, alguns destes procedimentos limitam os materiais a serem utilizados na estrutura dos pavimentos em uma tentativa de trabalhar-se apenas com materiais menos susceptíveis à variação de umidade.

Uma das maneiras utilizadas é a fixação de limites para índices físicos dos materiais que procuram avaliar seu comportamento em função da elevação do teor de umidade. Como exemplo, pode-se citar a fixação, em vários métodos do Limite de Liquidez, e do Índice de Plasticidade.

Os limites para estes índices foram fixados nos métodos empíricos de dimensionamento estrangeiros, onde as características peculiares de cada região são de fundamental importância no resultado final das observações. Ainda, deve-se levar em conta que a maioria destas observações foram realizadas em países com clima temperado.

7.1. Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Asfáltico

7.1.1. AASHTO 1972/1981/1986/1993

Nos Estados Unidos, em uma avaliação conjunta dos departamentos rodoviários estaduais, considerando a construção, manutenção e reabilitação, notou-se que o fator mais importante nos custos das rodovias americanas era a estrutura dos pavimentos. Com o objetivo de reduzir estes custos, o governo federal, juntamente com os órgãos rodoviários estaduais deram início ao maior programa de pesquisa rodoviária já executado, o *American Association of State Highway Officials Road Test (AASHTO Road Test)* desenvolvido em Illinois, EUA. Um dos resultados deste programa foi a publicação do *Interim Guide for the Design of Pavement Structures*, publicado em 1972, revisados posteriormente em 1981, 1986 e 1993.

Mesmo tendo limitações na abrangência de materiais, tipos de clima e características de tráfego, entre outras, em função da natureza experimental dos parâmetros colhidos, os resultados do *AASHO Road Test* são bem aceitos e utilizados por muitos estados americanos e por outros países, entre eles o Brasil.

O Método do engenheiro Murilo Lopes de Souza preconizado pelo DNER, bem como o da Resiliência e o do DER/SP que em alguns pontos baseia-se no primeiro, adotam alguns princípios do Método da AASHTO (foi acrescentado o termo *Transportation* ao nome da entidade).

A AASHTO introduziu alguns conceitos diferenciados na engenharia de pavimentação, entre eles, o de Serventia:

“Serventia é a capacidade que o pavimento tem de servir ao usuário com conforto e segurança sob qualquer condição de tráfego. É mensurada através do Índice de Serventia Atual, que varia de entre 5,0 (rodovia em perfeito estado) e 0,0 (rodovia em estado de degradação total)”.

De maneira breve, para exemplificar a inovação e a importância deste parâmetro, o manual baseia seu procedimento de dimensionamento no conceito de Serventia-Desempenho, ou seja, a variação da serventia do pavimento sob a ação do tráfego e das intempéries ao longo do tempo. Sucintamente, o método consiste em determinar uma estrutura que resista a um determinado tráfego, sob as condições ambientais características da localidade da rodovia, e com uma variação na Serventia pré-estabelecida.

Até então, os critérios de dimensionamento eram baseados puramente em parâmetros estruturais, e não nas condições de conforto ao rolamento. A título ilustrativo, para uma serventia de 2,5; 55% dos usuários reprovam as condições de rolamento e para uma serventia de 2,0; 85% dos usuários reprovam as condições de rolamento da superfície do pavimento.

Somente na revisão de 1986 foram introduzidas considerações da influência das condições de drenagem no desempenho dos pavimentos no procedimento de

dimensionamento, tanto para revestimentos de CA quanto para pavimentos de CCP. Estas considerações têm por base:

- a qualidade do sistema de drenagem, avaliada em função do tempo necessário para que teores de umidade próximos ao de saturação sejam reduzidos à metade; e
- a porcentagem do tempo que a estrutura é exposta a níveis de umidade próximos da saturação.

A seguir, estão apresentados na tabela 7.1 os parâmetros relativos à classificação dos níveis de eficiência de drenagem para as estruturas dos pavimentos. A metodologia utilizada para a fixação destes valores está apresentada no capítulo 8.

Tabela 7.1: Classificação da qualidade do sistema de drenagem. (AASHTO, 1993)

Qualidade da Drenagem	Tempo necessário para reduzir o teor de umidade de valores próximos ao de saturação à metade
Excelente	2 horas
Bom	1 dia
Médio	1 semana
Pobre	1 mês
Muito Pobre	A água não será drenada

Para efeito comparativo, as condições de drenagem nas pistas do AASHO *Road Test* classificavam-se como Médias, ou seja, a água demorava uma semana para sair da estrutura do pavimento.

Os parâmetros relativos à porcentagem do tempo que a estrutura do pavimento estará exposta a níveis de umidade próximos ao de saturação são diferenciados para os pavimentos de CA e para de CCP, sendo os referentes aos pavimentos de CA

apresentados a seguir juntamente com os conceitos necessários para o bom entendimento de sua aplicação.

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, a AASHTO desenvolveu o conceito de Número Estrutural (*Structural Number – S.N.*). Este índice representa a espessura total necessária, expressa em termos de material granular, da estrutura do pavimento, composta por várias camadas, para suportar o tráfego de projeto sob determinadas condições climáticas, partindo de um Índice de Serventia Inicial e atingindo um Valor de Serventia Final desejado, ao término do período de projeto.

O cálculo do SN é realizado através da equação 7.1 apresentada a seguir.

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log M_R - 8,07 \quad (7.1)$$

Onde:

W_{18} = Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 82 kN.

Z_R = Desvio padrão da distribuição normal para R% de confiabilidade.

S_0 = Desvio padrão do projeto.

SN = Número estrutural.

ΔPSI = Variação do índice de serventia pretendida para o período de projeto.

M_R = Módulo de resiliência do subleito.

Um conceito derivado do SN é o de Coeficiente Estrutural das camadas do pavimento. Os materiais da estrutura do pavimento apresentam comportamentos

diferentes em função de sua qualidade e de como são tratados, resultando em comportamentos distintos na estrutura. Este coeficiente estabelece valores estruturais em função de parâmetros físicos dos materiais levantados em ensaios de laboratório ou “*in situ*”, incorporando a qualidade e a expectativa de desempenho dos materiais ao método.

Com relação à drenagem, para considerar o efeito prejudicial da presença de água livre, ou as vantagens de um sistema de drenagem eficiente, sobre o desempenho das camadas de base e sub-base constituídas por materiais não cimentados no dimensionamento da estrutura dos pavimentos de CA, foi introduzido o coeficiente de drenagem (m_n) na equação que determina as espessuras das camadas do pavimento. Portanto, este coeficiente tem por objetivo corrigir o coeficiente estrutural das camadas do pavimento em função da qualidade do sistema de drenagem.

A equação 7.2 a seguir é apresentada pelo Manual de Dimensionamento da AASHTO:

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (7.2)$$

Onde:

a_n = Coeficiente Estrutural da camada.

D_n = Espessura da camada.

m_n = Coeficiente de Drenagem da camada.

SN = Número Estrutural.

A tabela a seguir apresenta os valores recomendados para (m_n) para correção dos coeficientes estruturais em função da qualidade do sistema de drenagem e do tempo que a estrutura estará exposta a elevados teores de umidade.

Tabela 7.2: Valores recomendados para o coeficiente de drenagem (m_n) para pavimentos de CA. (AASHTO, 1993)

Valores recomendados para (m_n) para modificação dos coeficientes estruturais dos materiais não cimentados das camadas de base e de sub-base				
Qualidade do sistema de drenagem	Porcentagem do tempo em que a estrutura estará exposta a teores de umidade próximos ao de saturação			
	< 1%	1 – 5%	5 – 25%	>25%
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Bom	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Médio	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muito Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

No manual para Projeto de Estruturas de Pavimento, na versão de 1993, a AASHTO mostra que um pavimento com uma drenagem *Excelente* pode ter uma redução de aproximadamente 30% nas espessuras das camadas de base e sub-base, enquanto um pavimento com drenagem *Muito Pobre* pode ter um aumento de 150% nas espessuras das mesmas camadas, ou seja, 3,5 vezes a espessura das camadas para pavimentos com drenagem *Excelente*, para os mesmos materiais e mesmas condições de tráfego.

O exemplo acima apresenta duas situações extremas que ilustram a importância de uma correta consideração, na fase de projeto, da presença de água na estrutura do pavimento, quer seja para uma economia de materiais na execução ou, em uma fase futura, na manutenção.

7.1.2. Métodos do DNER

Os Métodos do DNER baseiam-se no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) para a determinação da espessura total de material granular necessária para dissipar as tensões verticais a um nível que não provoque danos à fundação, em função do número total de repetições do eixo padrão previsto para a vida útil do pavimento e da capacidade de suporte do subleito.

O ensaio de CBR avalia a resistência ao cisalhamento de materiais não cimentados quando submetidos a um carregamento vertical, em uma condição específica de compactação e com um teor de umidade próximo à saturação; avalia também a expansão apresentada pelo material após 04 (quatro) dias de imersão em água, em relação às condições do mesmo imediatamente após a compactação. No método de ensaio, o carregamento é representado por um puncionamento vertical aplicado à velocidade constante.

A equação 7.3 mostrada a seguir fornece a espessura total de pavimento (H_t) em função do número N e do CBR, sendo esta espessura expressa em termos de material granular, ou seja, com coeficiente de equivalência estrutural $k=1,0$.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (7.3)$$

7.1.2.1. Método do DNER de 1966

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNER de 1966 considera a influência da pluviosidade local no desempenho destas estruturas.

A consideração é feita através da inclusão de um coeficiente denominado Fator Climático Regional (FR) na determinação do número N.

Para a Brasil foram sugeridos os valores apresentados na tabela 7.3 a seguir.

Tabela 7.3: Fator Climático Regional (Senço, 1997)

Altura média anual de chuva (mm)	Fator Climático Regional (FR)
Até 800	0,7
De 800 a 1.500	1,4
Mais de 1.500	1,8

7.1.2.2. Método do DNER de 1996

São exigidos, pelo método, que os materiais não cimentados utilizados na estrutura do pavimento, apresentem as seguintes características:

- **Materiais do Subleito**

Expansão menor ou igual a 2,0 %

CBR maior ou igual a 2,0%

- **Materiais do Reforço do Subleito**

Expansão menor ou igual a 1,0 %

CBR maior que o CBR do Subleito

- **Materiais da Sub-Base**

Expansão menor ou igual a 1,0 %

CBR maior ou igual a 20,0%

IG igual a 0

- **Materiais da Base**

Expansão menor ou igual a 0,5 %

CBR maior ou igual a 80,0%

LL menor ou igual a 25%

IP menor ou igual a 6%

Permite-se a utilização, na camada de base, de materiais com LL superior a 25% e/ou IP superior a 6%, desde que o equivalente de areia seja superior a 30.

Todas as exigências apresentadas pelo método demonstram uma grande preocupação com o comportamento dos materiais em presença de água em excesso na estrutura do pavimento, principalmente da parcela de “finos” dos solos (materiais que passam na peneira 200, ou seja, 0,075 mm de abertura).

Alguns tipos de “finos” são realmente prejudiciais ao desempenho do pavimento e devem ser evitados ou ter sua utilização limitada porém, em alguns casos, há aparentemente um excesso de zelo nestas limitações.

Este excesso de zelo ocorre pela combinação de alguns fatores, entre eles:

- A mensuração da capacidade de suporte com o material praticamente saturado. Para os países de clima temperado esta condição de ensaio é mais apropriada, pois a espessura da camada de solo sobre o leito rochoso nestas regiões é da ordem de centímetros ou poucos metros, já para regiões de clima tropical úmido, esta espessura, na grande maioria dos casos é da ordem de uma ou mais dezenas de metros.
- A limitação dos materiais utilizados na camada de base através da fixação de limites para o LL e do IP considera, de maneira indireta, o efeito da variação da umidade no comportamento do solo e, conseqüentemente, no desempenho da camada por ele constituída. Porém, a correlação entre o efeito da variação de umidade no comportamento dos solos e, por conseguinte, no desempenho dos pavimentos com camada de base constituída por estes, foi estudada em países de clima temperado. Como apresentado anteriormente, os solos característicos de regiões de clima temperados apresentam sensíveis diferenças em relação aos solos típicos de regiões de clima tropical úmido, principalmente no que se refere ao comportamento destes materiais quando expostos à variação de umidade. Portanto, os limites válidos para regiões temperadas não são válidos para regiões tropicais, podendo causar a recusa de materiais adequados para serem utilizados na estrutura dos pavimentos.
- Os dois principais trabalhos que serviram de base para o desenvolvimento do Método do DNER foram realizados nos Estados Unidos, onde as baixas

temperaturas provocam o congelamento e conseqüente inchamento da água contida nas camadas do pavimento, bem como o degelo, que eleva o teor de umidade na estrutura do pavimento.

Mais adiante, o Método defende a utilização de um coeficiente denominado Fator Climático Regional que poderia influenciar o número “N” de solicitações do eixo padrão ou a espessura total necessária para a proteção da fundação, podendo aumentar ou reduzir a estrutura do pavimento em função das condições internas de umidade no decorrer de sua vida útil.

Com relação à drenagem, está previsto no Método que o pavimento possui uma drenagem superficial adequada, e que o lençol freático está situado a, no mínimo, 1,5 metros do topo do subleito.

7.1.3. Método da Resiliência

O método da resiliência segue o procedimento de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER (1996) para o cálculo da espessura total em termos de camada granular, portanto, baseia-se no valor do CBR do subleito, bem como estipula valores de CBR mínimos para as diversas camadas da estrutura.

A principal diferença entre estes dois procedimentos está na determinação da espessura mínima da camada de concreto asfáltico e no coeficiente estrutural desta camada. Enquanto o método de DNER apresenta a espessura mínima do revestimento betuminoso somente como função do número N, o método da resiliência baseia-se no número N e no tipo de solo do subleito. O coeficiente estrutural da camada de CA também baseia-se no volume de tráfego e no tipo de solo do subleito.

O método da resiliência apresenta um procedimento simplificado para a classificação dos tipos de solo em função da resiliência, baseando-se no valor do CBR e na porcentagem de silte na fração que passa na peneira 200 (0,075 mm). Esta classificação está apresentada na tabela 7.4 a seguir, sendo solo tipo I os que

apresentam baixo grau de resiliência, solo tipo II os que apresentam grau de resiliência intermediário e os do tipo III os que apresentam elevado grau de resiliência.

Tabela 7.4: Classificação dos solos quanto à resiliência (Fonte: DNER, 1996)

CBR%	Porcentagem de silte na fração que passa na peneira 200 (0,075 mm)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

O método também limita a espessura máxima de material granular, na estrutura do pavimento, sendo que, entende-se por material granular, solos, britas ou misturas destes que apresentam pouca ou nenhuma coesão. Para estes materiais a espessura total não deve passar de 35 cm.

Com relação à drenagem, o método não faz nenhuma citação direta à influência da variação do teor de umidade nas camadas estruturais, no desempenho dos pavimentos.

7.1.4. Método do DNER para Dimensionamento de Pavimento Semi-Rígido

A metodologia proposta pelo DNER para o dimensionamento de pavimentos semi-rígidos não faz qualquer menção à influência da drenagem no desempenho da estrutura do pavimento resultante da aplicação deste procedimento.

A única consideração do método com relação aos solos e aos materiais granulares constituintes da estrutura do pavimento, é a classificação destes segundo o critério da resiliência, tratando bases granulares como solo tipo III.

7.1.5. Método do DER-SP

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis preconizado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) foi desenvolvido com base no procedimento do DNER (1996), que visa a proteção do subleito contra tensões normais verticais excessivas.

O método fundamenta-se na capacidade de suporte do solo e no número “N” de solicitações do eixo padrão e considera os diferentes comportamentos dos materiais através de um coeficiente, denominado Coeficiente Estrutural, atribuído a cada material constituinte da estrutura do pavimento.

A espessura total do pavimento, em termos de camada granular, pode ser determinada pelo gráfico apresentado pelo método ou, aproximadamente, pela equação 7.4 a seguir, com $R^2 = 0,99$.

$$H_t = 60,516 \times CBR^{-0,568} \times N^{0,0596} \quad (7.4)$$

Onde:

H_t = espessura total necessária em material granular, em cm;

CBR = Índice de Suporte Califórnia do subleito;

N = número equivalente de solicitações do eixo padrão de rodas duplas de 82 kN

O método do DER/SP recomenda que seja adotado um coeficiente para considerar os efeitos da variação de umidade nos materiais constituintes da estrutura do pavimento, durante as diversas estações do ano.

Este coeficiente deve ser aplicado ao número “N” de solicitações do eixo padrão; porém, é recomendado que este coeficiente seja igual a 1,0; justificado da seguinte

maneira: “... para efeito de dimensionamento, o CBR é determinado após a imersão dos corpos de prova em água, durante quatro dias, fica-se quase sempre a favor de segurança, adotando o FR igual a 1”.

A justificativa apresentada pelo método é, aparentemente, razoável, entretanto, existem algumas considerações a serem feitas:

- O método do DER/SP, assim como o procedimento do DNER, determina a espessura mínima que o pavimento deve possuir para proteger o subleito das tensões verticais, em função de um determinado volume de tráfego e da capacidade de suporte do subleito.
- Os dois métodos têm como base o método original do CBR.
- O método original do CBR foi desenvolvido empiricamente correlacionando-se os índices de suporte dos materiais e as espessuras dos pavimentos e avaliando-se o comportamento destes sob ação do tráfego.
- Considerando-se que o método do CBR foi desenvolvido baseado em correlações do valor do CBR do subleito determinado em ensaios de laboratório, conforme metodologia padrão (materiais saturados), com as espessuras dos pavimentos e seus respectivos desempenhos, então, ao se adotar o CBR como parâmetro de dimensionamento estar-se-á apenas seguindo o correto procedimento de dimensionamento tal como preconizado no método original, não havendo, portanto, qualquer coeficiente de segurança.

Com base no exposto, verifica-se que o método do DER/SP não considera o efeito da variação de umidade no desempenho das camadas estruturais do pavimento.

Com relação à drenagem, “O dimensionamento parte do pressuposto que haverá sempre uma drenagem superficial adequada e que o lençol d’água subterrâneo será rebaixado a, pelo menos, 1,50 m em relação ao greide de terraplenagem acabado”.

7.1.6. Procedimentos da P.M.S.P. para Pavimentos Asfálticos

7.1.6.1. Procedimento de 1992 para Vias de Tráfego Leve e Muito Leve

O “Procedimento de Dimensionamento de Pavimentos para Vias de Tráfego Leve e Muito Leve / P01” de 1992, preconizado pela Prefeitura do Município de São Paulo PMSP, baseia-se, também, na metodologia do DNER proposta pelo engenheiro Murilo Lopes de Sousa, de 1966.

Segundo o procedimento, é considerado tráfego leve o tráfego que solicita ruas essencialmente residenciais, para as quais não é previsto tráfego diário de ônibus e caminhões em um número superior a 50 veículos, caracterizado por um número “N” de 10^5 solicitações do eixo simples padrão de 82 kN, para o período de projeto de 10 anos.

O tráfego muito leve é característico, também de ruas essencialmente residenciais, para as quais não é previsto o tráfego diário de ônibus, podendo existir a circulação não superior a 03 caminhões por dia, caracterizado por um número “N” de 10^4 solicitações do eixo simples padrão de 82 kN, para o período de projeto de 10 anos.

No tópico referente aos ensaios geotécnicos do subleito, o método solicita, para a camada de 0,0 m a 0,5 m e para a camada de 0,5 m a 1,0 m, a execução de ensaio de Perda por Imersão de solos compactados segundo a especificação PMSP-ME-59, demonstrando preocupação com o desempenho do solo do subleito, quando saturado.

Ressalta-se que o procedimento adota a classificação MCT para os solos, representando um avanço tecnológico em relação aos procedimentos de uso corrente até os dias de hoje que ainda baseiam-se na classificação HRB, avaliando os solos através do LL e do IP.

No tópico referente às considerações sobre o subleito recomenda-se a determinação do suporte do subleito segundo o procedimento padrão que adota 96 horas de imersão do corpo-de-prova antes do ensaio de penetração ou 24 horas para o ensaio de mini-CBR, porém, o procedimento permite que o ensaio de penetração seja

realizado após um período de 48 horas para o ensaio de CBR ou de 12 horas para o mini-CBR quando as vias forem dotadas de guias e sarjetas.

Presume-se que o procedimento considera que, caso o pavimento a ser implantado tenha um sistema de drenagem superficial adequado o subleito, não atingirá condições tão severas com relação ao teor de umidade.

A alteração na metodologia dos ensaios de CBR e de mini-CBR consiste em uma tentativa de considerar, em um dos parâmetros utilizados no dimensionamento, os benefícios ao desempenho do pavimento trazidos pela adoção de um sistema adequado de drenagem superficial.

Modificações em procedimentos de ensaios, como a redução do tempo de imersão antes da penetração no ensaio de CBR e de Mini-CBR, devem ser exaustivamente estudadas. Os valores de referência apresentados nas curvas do método do CBR ou do método proposto pelo engenheiro Murilo Lopes de Sousa são obtidos através do ensaio padrão. As alterações propostas podem ser pouco significativas nos solos com elevada permeabilidade, como os arenosos, porém, nos solos com baixa permeabilidade, como siltes e argilas, que justamente são os que apresentam menor permeabilidade e comportamento mais sensível a variações no teor de umidade, as distorções podem ser significativas, podendo ocasionar insucessos levando ao descrédito toda a metodologia proposta.

No tópico referente à drenagem, o procedimento apresenta textualmente que: “O dimensionamento parte do pressuposto que haverá sempre uma drenagem superficial adequada e que o lençol d’água subterrâneo será rebaixado a, pelo menos, 1,50 m em relação ao greide de terraplenagem”.

7.1.6.2. Procedimento PMSP de 1999

Os procedimentos de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigentes na PMSP foram revisados, atualizados e complementados pela Secretaria de Vias Públicas durante o período de 1997 a 1999.

Como resultado deste processo foram apresentados em 1999 os procedimentos: “DP-06 – Diretrizes de Projeto para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Muito Leve, Leve e Médio” e “DP-07 – Diretrizes de Projeto para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Meio Pesado, Pesado e Muito Pesado”.

Os novos procedimentos apresentam alterações na metodologia de cálculo do número “N”, gerando as faixas de tráfego apresentadas na tabela 7.5 apresentada a seguir:

Tabela 7.5: Classificação das vias e parâmetros de tráfego (PMSP, 1999)

Tipo de Via	Função Predominante	Tráfego Previsto	Vida de Projeto Anos	Volume Inicial na Faixa mais Carregada		Tipo de Tráfego	Equival. por Veículo	N	N _{caract.}
				Veículo Leve	Caminhões e Ônibus				
V ₁	Via local residencial sem passagem	Muito Leve	10	< 100	≤ 3			2 x 10 ⁴	2 x 10 ⁴
V ₂	Via local residencial com passagem	Leve	10	100 a 400	4 a 20	(I)	1,50	2,7 x 10 ⁴ a 1,4 x 10 ⁵	10 ⁵
V ₃	Via coletora secundária	Médio	10	401 a 1.500	21 a 100	(I)	1,50	1,4 x 10 ⁵ a 6,8 x 10 ⁵	5 x 10 ⁵
V ₄	Via coletora principal	Meio Pesado	10	1.501 a 5.000	101 a 300	(II)	2,30	1,4 x 10 ⁶ a 3,1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶
V ₅	Via arterial	Pesado	10 - 12	5.001 a 10.000	301 a 1.000	(III)	5,90	1,0 x 10 ⁷ a 3,3 x 10 ⁷	2 x 10 ⁷
V ₆	Via arterial principal ou expressa	Muito Pesado	12	> 10.000	1.001 a 2.000	(III)	5,90	3,3 x 10 ⁷ a 6,7 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷
V _{7-M}	Corredor de Ônibus	Volume Médio	12	-	< 500			3 x 10 ⁶	10 ⁷
V _{7-P}		Volume Elevado	12	-	> 500			5 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷

Outra modificação com relação aos procedimentos anteriores é que o atual não permite a alteração, antes permitida, no ensaio de CBR e de mini-CBR onde, para vias munidas de guia e sarjeta permitia-se a realização do ensaio de penetração após um período de imersão do corpo-de-prova de 48 horas para o ensaio de CBR e de 12 horas para o ensaio de mini-CBR, ficando, portanto mantidos os períodos de imersão originais de 96 horas e 24 horas, respectivamente.

Nas Diretrizes de Projetos para Procedimentos Gerais – DP-P01, na seção referente às investigações do subleito, foi mantido o ensaio de Perda por Imersão, evidenciando a preocupação com o comportamento dos solos com a variação do teor de umidade do subleito.

Os procedimentos mantêm a classificação MCT para os solos, e ainda apresentam um quadro resumo onde são apresentadas as propriedades típicas dos solos da classificação MCT. Este quadro está apresentado na tabela 7.6 a seguir:

Tabela 7.6: Propriedades típicas dos solos da classificação MCT (PMSP, 1999)

Classes				N – Solos de comportamento “não laterítico”				L – Solos de comportamento “laterítico”		
Grupos MCT				N A Areias	N A’ Arenosos	N S’ Siltosos	N G’ Argilosos	L A Areias	L A’ Arenosos	L G’ Argilosos
Granulometrias Típicas (minerais) ₍₁₎				areias	areias siltosos	siltos (x.m)	argilas	areias com pouca argila	areias argilosas	argilas
				areias siltosos	areias argilosas	siltos arenosos e argilosos	argilas arenosas	-	areias arenosas	argilas arenosas
				siltos (q)	-	-	argilas siltosas	-	-	-
Ensaio		Variação		Capacidade Suporte ₍₂₎						
Mini – CBR Sem Embebição (%)	Muito alto	> 30		alto e médio	alto	médio e alto	alto	alto	alto e muito alto	alto
	alto	12 – 30								
	médio	4 – 12								
	baixo	< 4								
Perda de suporte por Embebição (%)	Muito alto	> 70		médio e baixa	baixa	alta	alta	baixa	baixa	baixa
	médio	40 – 70								
	baixo	< 40								
Expansão (%) ₍₂₎	alto	> 3		baixa	baixa	alta	alta e média	baixa	baixa	baixa
	médio	0,5 a 3								
Contração (%) ₍₂₎	baixo	< 0,5		baixa e média	baixa e média	média	alta e média	baixa	baixa e média	média e alta
Permeabilidade log (K (cm/s))	alto	> 3		média e alta	baixa	média e baixa	baixa e média	média e baixa	baixa	baixa
	médio	(-3) a (-5)								
	baixo	< (-6)								
Elasticidade		IP (%)	LI (%)	baixa e n p	média e NP	média e baixa	alta	NP e baixa	baixa e média	Média e alta
	Alto	> 30	> 70							
	Médio	70 – 30	30 – 70							
	Baixo	< 7	< 30							
(1) q = quartzo, m = mica, x = caulinita (2) Corpos de prova compactados na umidade ótima, energia normal, com sobrecarga quando pertinente.										

Quanto à drenagem, estas versões dos procedimentos estabelecem o que segue:

“O dimensionamento parte do pressuposto que haverá sempre uma drenagem superficial adequada e que o lençol d’água subterrâneo será rebaixado a pelo menos 1,50 m em relação ao greide de terraplenagem. Caso esta condição não seja atendida, a Projetista deverá apresentar solução alternativa para submeter à aprovação da SVP/PMSP”.

7.2. Dimensionamento de Reforço Estrutural em Concreto Asfáltico

7.2.1. Procedimento DNER PRO-11/79

O procedimento PRO-11 de 1979 apresenta proposta de dimensionamento de reforços estruturais de pavimentos baseada na relação entre as deflexões verticais recuperáveis atuantes, determinadas “*in loco*” e as admissíveis, calculadas com base no número equivalente de solicitações que a estrutura deverá resistir durante o período de projeto adotado para a camada de reforço estrutural.

O método justifica este procedimento admitindo que: “No Brasil, já existe considerável experiência sobre medidas de deflexão e é corriqueiro entre nós a ‘auscultação’ de um pavimento por intermédio de medidas de deflexão, pelo menos em uma primeira fase, que pode ser também a única, de avaliação estrutural.”

Com relação à influência da variação da umidade no comportamento da estrutura do pavimento, o procedimento apresenta uma metodologia para a correção sazonal das deflexões reversíveis máximas medidas em campo.

Segundo esta metodologia, a época mais indicada para proceder-se às medidas de deslocamentos verticais é imediatamente após as estações chuvosas. Como nem sempre é possível escolher a melhor época para a realização destes levantamentos deflectométricos, é apresentado o fator de correção sazonal com a finalidade de ajustar os valores dos deslocamentos levantados em qualquer época do ano, estimando-se o valor da deflexão máxima na situação mais desfavorável, ou seja, logo após as estações chuvosas.

Na tabela 7.7 a seguir estão apresentados os valores recomendados para o fator de correção sazonal.

Tabela 7.7: Fator de correção sazonal. (DNER PRO-11, 1979)

Natureza do Subleito	Fator de Correção Sazonal - F_s	
	Estação Seca	Estação Chuvosa
Arenoso e Permeável	1,10 – 1,30	1,00
Argiloso e Sensível à Umidade	1,20 – 1,40	1,00

A escolha do fator de correção a ser adotado depende:

- Da distribuição das precipitações mensais médias na região onde está implantado o pavimento em estudo.
- Das precipitações mensais ocorridas nos três meses que antecederam e nos meses que foram realizados os levantamentos dos deslocamentos verticais.
- Das características da estrutura dos pavimentos existentes.

Portanto, o procedimento reconhece e incorpora a influência da variação do teor de umidade no comportamento da estrutura do pavimento, porém, baseia-se apenas na pluviosidade, não considerando a eficiência do sistema de drenagem.

Ressalta-se que os valores dos coeficientes de correção apresentados na tabela anterior, segundo o procedimento, “foram adaptados de um relatório do ‘*Centre Experimental de Recherches et d’Etudes du Batiment et des travaux Public – Paris, France*’ para reforços dos pavimentos flexíveis na África Tropical e Madagascar, e da publicação n. 428 do Instituto de Pesquisas Rodoviárias “Variação Mensais de Deflexão com Viga Benkelman” sobre pesquisas realizadas no Estado do Rio de Janeiro.

7.2.2. Procedimento DNER PRO-10/79

Baseando-se nos mesmos estudos que deram origem ao procedimento PRO-11, o procedimento PRO-10 de 1979 apresenta proposta de dimensionamento de reforços estruturais de pavimentos baseada, também, na relação entre as deflexões verticais recuperáveis atuantes, determinadas “*in loco*” e as admissíveis, calculadas com base no número equivalente de solicitações que a estrutura deverá resistir durante o período de projeto adotado para a camada de reforço estrutural.

O procedimento apresenta os mesmos fatores de correção sazonal com as mesmas considerações propostas pelo PRO-11, ou seja, reconhece a influência da variação do teor de umidade nas camadas do pavimento no desempenho estrutural do mesmo.

Com relação ao dimensionamento da espessura da camada de reforço, o procedimento utiliza a deflexão sob carregamento do eixo de 68 kN. Porém, é indicado o fator de 0,7 para a transformação de deflexões medidas sob o eixo de 82 kN para deflexões levantadas sob o eixo de 68 kN.

Ressalta-se que diferentemente do PRO-11, o procedimento determina a espessura da camada de reforço em termos de material granular e indica o coeficiente de equivalência estrutural de 1,7 para o CA.

7.2.3. Procedimento DNER PRO-269/94 - TECNAPAV

O procedimento PRO-269 apresenta uma alternativa de metodologia de dimensionamento de reforço estrutural para pavimentos flexíveis, baseada na deflexão admissível e na resiliência dos solos e dos materiais granulares empregados na estrutura do pavimento existente.

Quanto ao sistema de drenagem existente na rodovia, ou quanto a influência da variação do teor de umidade na estrutura do pavimento no desempenho do mesmo, o procedimento não faz nenhuma referência.

7.3. Outros Métodos

7.3.1. AASHTO/93 para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego

Para o projeto de pavimentos flexíveis ou rígidos de estradas com baixo volume de tráfego, deve-se seguir o método de dimensionamento convencional com algumas pequenas diferenças.

A primeira diferença refere-se ao nível de confiabilidade do projeto. Como estas estradas estarão submetidas a um pequeno volume de tráfego, associado com um baixo risco, a AASHTO recomenda que seja utilizado um nível de confiabilidade de 50%. O método comenta que usualmente os projetistas adotam níveis de confiabilidade compreendidos entre 60 e 80%, dependendo da importância da rodovia.

Quanto ao módulo resiliente do subleito, o método diz que, caso não seja possível a determinação da duração das seções climáticas ou módulo efetivo do subleito, deve-se considerar as seguintes sugestões.

7.3.1.1. Duração das Seções Climáticas

A figura 7.1 fornece um mapa dos Estados Unidos com 6 diferentes regiões climáticas e ambientais. Baseando-se nestas características regionais, a tabela 7.8 pode ser utilizada para definir a duração das seções climáticas necessária para a determinação do módulo efetivo do subleito.

<u>REGIÃO</u>	<u>CARACTERÍSTICAS</u>
I	úmido, sem congelamento
II	úmido, com ciclos de congelamento e degelo
III	úmido, com congelamento severo e degelo na primavera
IV	seco, sem congelamento
V	seco, com ciclos de congelamento e degelo
VI	seco, com congelamento severo e degelo na primavera

Figura 7.1: Divisão das seis regiões climáticas dos Estados Unidos (AASHTO, 1993)

Tabela 7.8: Duração da seção em meses para cada uma das seis regiões climáticas.

Região Climática	Estação – Condição de Umidade do Subleito			
	Inverno (Subleito Saturado)	Primavera-Degelo (Subleito Saturado)	Primavera/Outono (Subleito Úmido)	Verão (Subleito Seco)
I	0,0	0,0	7,5	4,5
II	1,0	0,5	7,0	3,5
III	2,5	1,5	4,0	4,0
IV	0,0	0,0	4,0	8,0
V	1,0	0,5	3,0	7,5
VI	3,0	1,5	3,0	4,5

7.3.1.2. Módulo Resiliente Efetivo do Subleito

Na tabela 7.9 são fornecidos valores para o módulo resiliente sazonal do subleito que podem ser utilizados no projeto de estradas com baixo volume de tráfego, se o projetista considerar que o solo apresenta as características necessárias para ser empregado como fundação da estrutura do pavimento. Se os valores da tabela 7.8 forem combinados com os valores sugeridos na tabela 7.9, o valor do módulo efetivo do subleito pode ser determinado para as 6 regiões climáticas dos Estados Unidos apresentadas no mapa da figura 7.1. Os valores destes módulos estão apresentados na tabela 7.10.

Tabela 7.9: Sugestão para o módulo de resiliência sazonal do subleito, em psi, em função da qualidade do solo.

Qualidade do Solo do Subleito	Estação – Condição de Umidade do Subleito			
	Inverno (Subleito Saturado)	Primavera-Degelo (Subleito Saturado)	Primavera/Outono (Subleito Úmido)	Verão (Subleito Seco)
Muito Bom	20.000	2.500	8.000	20.000
Bom	20.000	2.000	6.000	10.000
Regular	20.000	2.000	4.500	6.500
Ruim	20.000	1.500	3.300	4.900
Muito Ruim	20.000	1.500	2.500	4.000

Tabela 7.10: Sugestão para o valor do módulo de resiliência efetivo do subleito, em psi, para ser utilizado no dimensionamento de pavimentos asfálticos, em função da qualidade do solo e das características climáticas da região.

Região Climática	Qualidade do Solo do Subleito				
	Muito Ruim	Ruim	Regular	Bom	Muito Bom
I	2.800	3.700	5.000	6.800	9.500
II	2.700	3.400	4.500	5.500	7.300
III	2.700	3.000	4.000	4.400	5.700
IV	3.200	4.100	5.600	7.900	11.700
V	3.100	3.700	5.000	6.000	8.200
VI	2.800	3.100	4.100	4.500	5.700

7.3.2. Método da PMSP para Pavimentos com Camada de Rolamento de Peças Pré-Moldadas de Concreto

As “Diretrizes de Projeto para Pavimentos com Peças Pré-Moldadas de Concreto – Procedimento de Dimensionamento e Instrução de Implantação – DP-P08” da SVP da PMSP padroniza os procedimentos de dimensionamentos de pavimentos de peças pré-moldadas de concreto a serem implantados no município de São Paulo.

O pavimento com blocos pré-moldados representa uma versão moderna e aperfeiçoada dos antigos calçamentos executados com blocos de cantaria (paralelepípedos), notando-se evolução no formato e no processo de fabricação dos blocos.

São propostas duas metodologias de dimensionamento que baseiam-se em dois procedimentos distintos.

O Procedimento A foi adaptado pela ABCP do procedimento da *British Cement Association* (BCA), com a utilização de bases cimentadas. O Procedimento B tem por base pesquisas desenvolvidas na Austrália, África do Sul, Grã-Bretanha e nos Estados Unidos, bem como, observações laboratoriais e pistas experimentais. Este método, desenvolvido pelo *United State Army Corps of Engineer* (USACE), tem como base o método da mesma organização para pavimentos flexíveis e é adotado pela *Portland Cement Association* (PCA) como procedimento de dimensionamento.

Em ambos os casos permite-se a execução do pavimento com nível d'água elevado, a apenas 0,60 m abaixo da superfície acabada, não fazendo exigências quanto ao posicionamento do nível d'água em relação ao subleito.

8. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS COEFICIENTES DE DRENAGEM

8.1. AASHTO 1986

Como primeiro passo, este procedimento introduziu uma metodologia para avaliar a qualidade do sistema de drenagem.

Esta metodologia consiste basicamente na estimativa no tempo necessário para que a camada de base reduza a umidade da estrutura do pavimento de uma condição praticamente saturada para um grau de saturação de 50%.

Está apresentada a seguir a tabela 8.1 onde o método fornece os tempos necessários, em dias, para atingir-se o grau de saturação de 50%, em função da permeabilidade ou da porosidade, da declividade transversal, da largura da plataforma e da espessura da camada de base.

Para estimativa do tempo de drenagem de 50% da água livre fez-se uso da equação 8.1 desenvolvida por Casagrande.

$$t_{50} = \frac{(n \times L^2)}{[2 \times k \times (H + L \times \tan \alpha)]} \quad (8.1)$$

Onde:

t_{50} = Tempo necessário para drenagem de 50% da água livre (dias).

n = Porosidade efetiva.

L = Distância máxima que a água percorre para deixar a estrutura do pavimento

k = Coeficiente de permeabilidade (m/dia).

$\tan \alpha$ = Declividade da camada drenante.

Tabela 8.1: Tempo estimado em dias para que seja atingido o grau de saturação de 50% partindo-se de um grau de saturação próximo a 100%, com base na permeabilidade dos materiais e nas características geométricas do pavimento.
(Fonte: AASHTO, 1986)

Permeabilidade, K (cm/dia)	Porosidade, n	Declividade Transversal, S	H = 30,5 cm		H = 61,0 cm	
			L = 3,66 m	L = 7,32 m	L = 3,66 m	L = 7,32 m
3,05	0,015	0,01	10	36	6	20
		0,02	9	29	5	18
30,50	0,027	0,01	2	6	5	18
		0,02	2	5	1	3
305,0	0,048	0,01	0,3	1	0,2	0,6
		0,02	0,3	1	0,2	0,6
3050	0,08	0,01	0,05	0,2	0,03	0,1
		0,02	0,05	0,2	0,03	0,1

Onde:

H = espessura da camada de base drenante;

L = largura da pista.

Com base nos dados fornecidos na tabela, o método apresenta uma classificação do sistema de drenagem da rodovia em função do tempo necessário para que o excesso de água seja removido da estrutura do pavimento, ou seja, para que o teor de umidade seja reduzido de um nível próximo ao de saturação, para um teor ao redor de 50% deste, conforme apresentado anteriormente.

Esta classificação esta apresentada na tabela mostrada a seguir.

Tabela 8.2: Classificação da eficiência do sistema de drenagem com base nos dados fornecidos pela tabela 8.1 (AASHTO, 1986)

Qualidade do Sistema de Drenagem	Tempo Necessário para Remoção do Excesso de Umidade (dias)	
	Calculado	Recomendado
Excelente	0,08 – 0,17	0,08
Bom	½ a 1	1
Regular	3 a 6	7
Ruim	18 a 36	30
Muito Ruim	Mais que 36	Não drena

Com base nos conceitos expostos anteriormente foram determinados os coeficientes de drenagem para pavimentos de CA, através da metodologia apresentada a seguir.

8.1.1. Pavimentos de Concreto Asfáltico

Para os pavimentos com camada de rolamento em CA, a alternativa adotada para a consideração do efeito da drenagem no desempenho da estrutura do pavimento foi a inclusão de um coeficiente (m_n) que modifica os coeficientes estruturais das camadas em função do desempenho previsto para o sistema de drenagem.

Para a determinação dos valores dos coeficientes de drenagem (m_n), foram consideradas 3 estruturas com diferentes valores de SN, ambas constituídas de camada de rolamento em CBUQ e base granular sobre o subleito.

O subleito considerado é o mesmo encontrado no AASHO *Road Test*. A variação de suporte do subleito não foi avaliada neste procedimento. Esta é devidamente considerada na determinação do Módulo Efetivo do subleito, conforme apresentado anteriormente.

Foram adotados coeficientes de drenagem (m_n) estimados, variando entre 0,5 e 1,4, com a finalidade de alterar o coeficiente estrutural da camada de base encontrada na pista experimental.

Com a utilização destes coeficientes determinou-se a variação do SN da estrutura do pavimento. Foi então determinada a alteração, acréscimo ou decréscimo, na espessura da camada de CBUQ necessária para manter constante o valor do SN, ou seja, para compensar a variação do SN obtida com a introdução dos coeficientes de drenagem, seja ela positiva ou negativa.

Paralelamente, adotaram-se variações nos valores do módulo de resiliência da base granular, tanto para valores superiores quanto inferiores àquele encontrado na pista experimental. A finalidade desta variação foi abranger tanto os pavimentos que apresentam condições inferiores quanto os que apresentam condições de drenagem superiores em relação às da pista de teste, considerando-se assim, tanto os malefícios resultantes de um sistema de drenagem ineficiente quanto os benefícios obtidos com um sistema de drenagem adequado.

Utilizando-se do programa computacional ELSYM 5, foram determinadas as deflexões atuantes para as três estruturas empregando-se o módulo de base encontrado na pista experimental, bem como as variações no seu valor considerando-se as diferentes condições de drenagem.

Em seguida, foram adicionadas às estruturas originais e às estruturas que apresentadas variações no valor do módulo da camada de base, 3 espessuras adotadas de camada de reforço em CBUQ, com base na experiência dos autores.

Determinou-se a deflexão atuante sobre estas camadas de reforço.

Correlacionando-se as variações na espessura da camada de CBUQ para manter-se o valor de SN original com a variação necessária para manter os valores de deflexão determinados sobre as estruturas originais, foi possível a determinação dos valores dos coeficientes de drenagem que resgatam as deflexões das estruturas originais.

9. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PROCEDIMENTOS QUE CONSIDERAM O EFEITO DA DRENAGEM NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO

9.1. Métodos de Dimensionamento da AASHTO 86/93

Os fatores de ajuste de drenagem do método da AASHTO influenciam diretamente os coeficientes estruturais das camadas não cimentadas de base e de sub-base dos pavimentos de concreto asfáltico.

Para a avaliação da amplitude desta influência, em função do grande número de variáveis envolvidas no dimensionamento, optou-se pela fixação de algumas destas, incluindo as espessuras das camadas de base e de sub-base, avaliando-se a variação da espessura da camada de concreto asfáltico, conforme apresentado a seguir:

- Foram consideradas 4 faixas de tráfego, sendo: 10^5 , 10^6 , 10^7 e 10^8 .
- Módulo de resiliência do subleito em 7000 psi, aproximadamente 500 kgf/cm^2 .
- CBR da camada de base $> 80\%$.
- CBR da camada de sub-base $> 30\%$.
- Espessura da camada de base igual a 7", ou 17,78 cm.
- Espessura da camada de sub-base igual a 7", ou 17,78 cm.
- Índice de serventia inicial igual a 4,2.
- Índice de serventia final igual a 2,0.
- Desvio padrão igual a 0,45.
- Confiabilidade de 85%

Foi considerada serventia final igual a 2,0 por ser, este, um valor em que 85% dos usuários reprova as condições de rolamento da rodovia.

A análise foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foi avaliada a influência da qualidade do sistema de drenagem, fixando-se o tempo em que a estrutura do pavimento estará exposta a teores de umidade próximos à saturação que, indiretamente, reflete a pluviosidade local.

Em uma segunda etapa foi avaliada a influência do tempo que a estrutura estará exposta a teores de umidade próximos ao de saturação, fixando-se a qualidade do sistema de drenagem.

Ressalta-se que com a finalidade de evidenciar a real influência dos coeficientes de drenagem no dimensionamento, as escalas dos gráficos foram mantidas constantes, independentemente do posicionamento das curvas.

Inicialmente, nas figuras 9.1 a 9.4, são apresentados os gráficos resultantes da primeira etapa da análise e, nas figuras 9.5 a 9.9, estão apresentados os gráficos referentes à segunda etapa.

Figura 9.1: Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação < 1%

Figura 9.2: Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação de 1% a 5%

Figura 9.3: Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação de 5% a 25%

Figura 9.4: Variações na espessura do CA em função da qualidade do sistema de drenagem para tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação > 25%

Figura 9.5: Variações na espessura do CA em função do tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade excelente

Figura 9.6: Variações na espessura do CA em função do tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade boa.

Figura 9.7: Variações na espessura do CA em função do tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade regular

Figura 9.8: Variações na espessura do CA em função do tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade ruim.

Figura 9.9: Variações na espessura do CA em função do tempo de exposição a teores de umidade próximos à saturação, para sistema de drenagem com qualidade péssima.

Com base nos gráficos apresentados verifica-se que, para cada condição estudada, os coeficientes angulares das curvas resultantes são praticamente os mesmos, indicando que a variação na espessura do revestimento asfáltico independe do volume do tráfego, tanto no que se refere ao coeficiente de drenagem, quanto no que se refere à pluviosidade.

Contata-se também que o modelo proposto pela AASHTO é mais sensível à variação da qualidade do sistema de drenagem do que à pluviosidade. Enquanto a variação na eficácia do sistema drenante pode provocar uma variação de cerca de 9 cm na espessura do CA, as variações provocadas pelos diferentes níveis de precipitação atingem cerca da metade deste valor.

Com a finalidade de avaliar a sensibilidade ao coeficiente de drenagem do modelo preconizado pela AASHTO, realizou-se a análise dimensional tendo em vista apenas a variação deste coeficiente, sem a consideração da qualidade do sistema drenante ou o tempo de exposição da estrutura do pavimento a teores de umidade próximos ao de saturação. Os resultados desta análise estão apresentados na figura 9.10.

Figura 9.10: Variações na espessura do CA em função da variação do coeficiente de drenagem.

Os coeficientes angulares das curvas resultantes permanecem praticamente os mesmos, indicando que a variação na espessura do revestimento asfáltico não depende do volume do tráfego. Nesta análise verificou-se que a variação da espessura do CA atinge valores da ordem de 10 cm, para um mesmo volume de tráfego.

Ressalta-se que as simulações realizadas têm apenas significado comparativo e estão limitadas às considerações expostas anteriormente. Portanto, alguns pontos que resultaram em espessura do revestimento asfáltico negativa devem ser interpretados apenas como uma indicação na tendência do parâmetro analisado, sem apresentar qualquer significado físico, além do super dimensionamento das camadas de base e sub-base.

9.2. Procedimento de Dimensionamento de Reforço Estrutural em Concreto Asfáltico – DNER PRO 11/79

Baseando-se na adoção, por parte do procedimento, de um coeficiente para a correção do parâmetro deflexão que avalia o comportamento da estrutura do pavimento, conclui-se que há o reconhecimento por parte do órgão de que a variação no teor de umidade na estrutura do pavimento influencia o comportamento e, conseqüentemente, o desempenho do mesmo.

Considerando-se uma determinada estrutura de pavimento, segundo o procedimento, a deflexão deste, quando exposto a teores elevados de umidade, pode-se atingir valores cerca de 40% superiores ao da mesma estrutura na situação em que esta estiver exposta a níveis de umidade próximos ao da umidade ótima de compactação.

Supondo agora a existência de uma mesma estrutura em dois locais distintos. O primeiro local apresenta um índice pluviométrico baixo e um sistema de drenagem adequado, de maneira que a estrutura do pavimento estará muito raramente exposta a teores elevados de umidade. O segundo local apresenta elevada precipitação e dispositivos de drenagem insuficientes, expondo esta estrutura a teores de umidade elevados por longos períodos. Com base no procedimento PRO-11, a segunda

estrutura trabalhará por grande parte do período de projeto com uma deflexão cerca de 40% superior à da primeira.

Obviamente as duas estruturas mencionadas anteriormente não apresentarão o mesmo desempenho, evidenciando a necessidade da correta consideração da influência da drenagem já no dimensionamento das estruturas dos pavimentos.

Para o dimensionamento da espessura da camada de reforço estrutural em CBUQ, o procedimento apresenta a expressão 9.1:

$$H_{ref} = 40 \times \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (9.1)$$

Onde:

H_{ref} = Espessura da camada de reforço.

D_p = Deflexão característica levantada em na pista.

D_{adm} = Deflexão admissível.

Considerando-se o coeficiente de correção sazonal igual a 1,40, a variação na espessura de reforço causada pela introdução do parâmetro relativo às condições de drenagem será de $H_{ref} = 5,8$ cm.

Ou seja, segundo o procedimento, a espessura da camada de reforço em CBUQ pode sofrer um acréscimo de até 5,8 cm em função da época do ano em das características do pavimento, da precipitação média da região e das precipitações médias ocorridas nos três meses que antecedem ao do levantamento.

10. SUGESTÃO DE ADAPTAÇÃO DOS MÉTODOS VIGENTES NO PAÍS

Considerando-se que a infiltração d'água pela borda do pavimento reduz drasticamente as características resilientes dos materiais constituintes, é recomendável a consideração dos efeitos causados por um sistema de drenagem inadequado, traduzidos em variações na espessura das camadas estruturais do pavimento, quando do dimensionamento do mesmo.

Portanto, propõe-se a inclusão de um parâmetro, denominado Fator de Drenagem (Fd) no Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do DNER, para ajustar a espessura total necessária de pavimento, em termos de material granular, calculada em função do índice de suporte do subleito e do número de solicitações do eixo padrão de 82 kN.

10.1. Desenvolvimento do Coeficiente de Drenagem, Cd

Os valores para Cd foram estimados através do procedimento apresentado a seguir, tendo como base a metodologia adotada pela AASHTO na determinação dos coeficientes de drenagem para pavimentos de CA, conforme mostrada no item 8.1.

Considerou-se inicialmente três estruturas de pavimento sendo, uma característica de tráfego leve, outra de tráfego médio e a terceira de tráfego pesado, conforme apresentado na tabela 10.1 a seguir.

Tabela 10.1: Estruturas utilizadas no desenvolvimento dos Coeficientes de Drenagem, Cd

Caso	Espessura de CA, h_1 (cm)	Espessura da Base Granular, h_2 (cm)	Espessura Total, segundo DNER, h_t (cm)
A	5,0	20,0	30
B	7,5	30,0	45
C	10,0	40,0	60

Para o estudo de simulação foram adotados Coeficientes de Drenagem de 0,50; 0,75; 1,00 e 1,25 com a função de corrigir o coeficiente estrutural da camada de base e, em seguida, foram calculadas as novas espessuras totais em termos de camada granular (H_t).

Determinaram-se, então, as variações necessárias na espessura de CA para que fossem restaurados os H_t originais, apresentados na tabela 10.1. Os resultados deste procedimento estão apresentados na tabela 10.2 a seguir.

Tabela 10.2: Variação na espessura da camada de CA em função da inclusão dos Cd.

Valores de Cd	Espessura equivalente em termos de camada granular (cm)			Redução ou acréscimo de espessura (cm)					
				em termos de camada granular			Em termos de CA		
	Caso			Caso			Caso		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1,25	35,00	52,50	70,00	-5,00	-7,50	-10,00	-2,50	-3,75	-5,00
1,00	30,00	45,00	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,75	25,00	37,50	50,00	5,00	7,50	10,00	2,50	3,75	5,00
0,50	20,00	30,00	40,00	10,00	15,00	20,00	5,00	7,50	10,00

Adotando-se valores usuais para os módulos resilientes e coeficientes de Poisson dos materiais e para a magnitude das cargas aplicadas, fazendo-se uso do programa computacional ELSYM 5, determinaram-se as deflexões (D_o) atuantes na superfície de cada estrutura de pavimento apresentada na tabela 10.1. O desenho esquemático considerado e os parâmetros adotados estão apresentados na figura 10.1 a seguir.

Figura 10.1: Esquema estrutural e parâmetros considerados.

Paralelamente, procurou-se avaliar a influência da redução da capacidade de suporte da camada de base no desempenho estrutural do pavimento. Para tanto, foram determinadas as deflexões (D_0) para diferentes valores de módulo resiliente para a camada de base.

A variação no valor do módulo da camada de base contemplou um valor superior ao padrão adotado, visando a consideração de condições mais favoráveis do que a inicial, e dois inferiores, de maneira que fosse englobada a variação de deflexão observada em campo e apresentada no capítulo 6, para simular as condições de drenagem inadequada.

O esquema estrutural, bem como os demais parâmetros foram mantidos constantes conforme apresentado na figura 10.1.

Com a finalidade de determinar a variação necessária na espessura do CA para que as deflexões retornem ao nível original, e tendo por base os valores obtidos na tabela 10.2, adotaram-se três variações na espessura desta camada, sendo uma de redução (-2,5 cm) e duas de acréscimo (+ 5,0 e + 10,0 cm). Em seguida foram determinadas as deflexões para estas novas condições, considerando-se as variações no valor do módulo resiliente da camada de base.

As deflexões obtidas estão apresentadas na tabela 10.3 a seguir.

Tabela 10.3: Deflexões (D_0 , x 10^{-2} mm) obtidas através do programa ELSYM 5 para as três estruturas, incluindo as variações do módulo resiliente da camada de base, E_2

E_2 MPa	Caso	Espessura do Reforço em CBUQ (cm)			
		2,5	0,0	5,0	10,0
350	A	56	52	43	35
	B	46	42	35	30
	C	39	36	30	26
300	A	59	55	45	37
	B	49	45	37	31
	C	41	38	32	27
150	A	75	70	53	42
	B	67	59	45	36
	C	57	50	39	32
75	A	101	91	63	47
	B	94	78	55	42
	C	79	66	49	38

Com os dados apresentados na tabela 10.2 foram construídos dos gráficos apresentados nas figuras 10.2, 10.3; 10.4 e 10.5 a seguir, que contém as variações das deflexões em função das diferentes espessuras de reforço de CA, para cada módulo admitido para a camada de base.

Figura 10.2: Deflexão em função das variações na espessura da camada de CA – Módulo da Base de 350 MPa

Figura 10.3: Deflexão em função das variações na espessura da camada de CA – Módulo da Base de 300 MPa

Figura 10.4: Deflexão em função das variações na espessura da camada de CA - Módulo da Base de 150 MPa

Figura 10.5: Deflexão em função das variações na espessura da camada de CA - Módulo da Base de 75 MPa

Para que seja restabelecida a deflexão original em cada estrutura, em função das figuras 10.2 a 10.5, obtiveram-se, as espessuras de CA apresentadas na tabela 10.4 a seguir.

Tabela 10.4: Espessura da camada de CA para o restabelecimento das deflexões originais.

E ₂ (kgf/cm ²)	Espessura da Camada de CA (cm)		
	A	B	C
3.500	-1,28	-1,28	-1,28
3.000	0,00	0,00	0,00
1.500	4,2	5,0	5,6
750	7,2	9,1	10,0

Com os valores da tabela 10.4, e interpolando-se os valores apresentados na tabela 10.2, conforme verifica-se graficamente na figura 10.6, obteve-se os Coeficientes de Drenagem indicados na tabela 10.5 a seguir.

Figura 10.6: Espessura necessária de CA, em função dos Coeficientes de Drenagem.

Tabela 10.5: Coeficientes de Drenagem, Cd.

E ₂ (kgf/cm ²)	Coeficientes de Drenagem, Cd		
	A	B	C
3.500	1,12	1,08	1,06
3.000	1,00	1,00	1,00
1.500	0,58	0,66	0,72
750	0,27	0,39	0,50

Considerando-se que os Coeficientes de Drenagem, C_d , no método da AASHTO foram concebidos para ajustar a espessura de material da estrutura projetada, ou seja, reduzindo a espessura efetiva no caso de diminuição nos módulos das camadas correspondentes, é necessário inverter esse parâmetro para se determinar a espessura total requerida no dimensionamento.

Assim o novo fator de ajuste da espessura total necessária para o pavimento, apresentado na tabela 10.6, é dado por:

$$Fd = \frac{1}{Cd} \quad (10.1)$$

Tabela 10.6: Fatores de ajuste estudados.

E_2 (kgf/cm ²)	Fatores de Ajuste Estudados		
	A	B	C
3.500	0,89	0,93	0,94
3.000	1,00	1,00	1,00
1.500	1,72	1,52	1,39
750	3,70	2,56	2,00

Tendo por finalidade definir os Fatores de Ajuste de Drenagem a serem recomendados, procedeu-se a calibração dos valores estudados empregando-se os dados da pista experimental e baseando-se em procedimentos de dimensionamento de pavimentos e reforços estruturais preconizados pelo DNER.

10.2. Calibração dos Fatores de Ajuste de Drenagem - F_d

Com a finalidade de calibrar os Fatores de Ajuste de Drenagem determinados anteriormente, fazendo-se uso dos dados obtidos no levantamento de campo,

apresentado no capítulo 6, foi realizada a análise de sensibilidade em três procedimentos de projeto a saber:

10.2.1. Método de dimensionamento do DNER para pavimentos novos

O método recomenda a utilização da equação 10.2 para determinação da espessura total em termos de camada granular para proteção do subleito.

$$H_t = 77,67 \times CBR^{-0,598} \times N^{0,0482} \quad (10.2)$$

Onde:

H_t = Espessura total em termos de camada granular (cm).

CBR = Índice de Suporte Califórnia (%).

N = Número de solicitações do eixo padrão de 82 kN.

Avaliando-se a redução na vida útil do pavimento em função da redução da capacidade de suporte do subleito, tem-se:

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = \frac{77,67 \times CBR_2^{-0,598} \times N_2^{0,0482}}{77,67 \times CBR_1^{-0,598} \times N_1^{0,0482}} \quad (10.3)$$

Admitindo-se que tanto a região da borda do pavimento quanto o eixo central devam resistir ao mesmo número de solicitações do eixo padrão, têm-se

$$1 = \frac{CBR_2^{-0,598} \times N_2^{0,0482}}{CBR_1^{-0,598} \times N_1^{0,0482}} \quad (10.4)$$

$$\left(\frac{CBR_2}{CBR_1} \right)^{12,407} = \frac{N_2}{N_1} \quad (10.5)$$

Considerando-se que a variação no valor do CBR é muito próxima à variação obtida para o módulo de resiliência, têm-se, com base no exposto no capítulo 6, para o caso do subleito laterítico:

$$(0,7)^{12,407} = \frac{N_2}{N_1} \quad (10.6)$$

Portanto,

$$\frac{N_2}{N_1} = 1,20 \times 10^{-2} \quad \text{ou} \quad \frac{N_1}{N_2} = 83 \quad (10.7)$$

Ou seja, a redução do módulo do subleito para 70% do valor de projeto ocasiona a diminuição da vida útil do pavimento em 83 vezes.

Avaliando-se o caso de subleitos constituído por materiais que apresentem as mesmas características do material utilizado na camada de base do pavimento do segmento experimental, ou seja, que apresente uma redução no módulo resiliente de 50%, obtém-se:

$$(0,5)^{12,407} = \frac{N_2}{N_1} \quad (10.8)$$

ou seja,

$$\frac{N_2}{N_1} = 1,84 \times 10^{-4} \text{ ou } \frac{N_1}{N_2} = 5.435 \quad (10.9)$$

Portanto, a redução do módulo do subleito para 50% do valor de projeto ocasiona uma redução na vida útil do pavimento de 5.435 vezes, segundo o modelo preconizado pelo DNER para dimensionamento de pavimentos flexíveis.

A seguir apresenta-se a avaliação da variação necessária na espessura equivalente, em termos de material granular, em função da redução do módulo de resiliência do subleito laterítico encontrada no trecho experimental, portanto:

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = \frac{77,67 \times CBR_2^{-0,598} \times N_2^{0,0482}}{77,67 \times CBR_1^{-0,598} \times N_1^{0,0482}} \quad (10.10)$$

Para N_1 igual a N_2 , objetivando alcançar a mesma vida útil em toda a plataforma do pavimento, têm-se:

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = \left(\frac{CBR_2}{CBR_1} \right)^{-0,598} \quad (10.11)$$

Considerando que a variação no módulo de resiliência do subleito encontrada no campo em função do elevado teor de umidade pode ser muito próxima da variação do CBR deste material, tem-se:

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = (0,7)^{-0,598} \quad (10.12)$$

ou seja,

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = 1,24 \quad (10.13)$$

De maneira análoga, para o caso da camada de base granular, tem-se:

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = (0,5)^{-0,598} \quad (10.14)$$

chegando a,

$$\frac{H_{t2}}{H_{t1}} = 1,51 \quad (10.15)$$

10.2.2. Procedimento PRO-11 para dimensionamento de reforço

Com relação ao procedimento PRO-11, foi avaliada a variação dos valores de deflexão entre o eixo e as bordas da plataforma pavimentada do segmento experimental.

A equação apresentada no procedimento, para cálculo da deflexão máxima admissível em função de um determinado número “N” de solicitações do eixo padrão é a seguinte:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad (10.16)$$

Onde:

D_{adm} = Deflexão admissível.

N = Número de solicitações de projeto.

Essa equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$N = 1,265 \times 10^{17} D^{-5,682} \quad (10.17)$$

Portanto, avaliando-se a variação nas deflexões, têm-se

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1,265 \times 10^{17} D_2^{-5,682}}{1,265 \times 10^{17} D_1^{-5,682}} \quad (10.18)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{-5,682} \quad (10.19)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = (1,655)^{-5,682} \quad (10.20)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 5,71 \times 10^{-2} \quad \text{ou} \quad \frac{N_1}{N_2} = 17,51 \quad (10.21)$$

Ou seja, a variação de deflexão verificada em campo entre a borda e o eixo, segundo o procedimento PRO-11, indica que o pavimento da borda terá uma vida útil, aproximadamente, 17,5 vezes mais curta que a do pavimento situado próximo ao eixo da plataforma.

Partindo da premissa de que o número "N" de solicitações que o pavimento deve suportar é o mesmo, tanto na borda quanto no eixo da plataforma, determinou-se a espessura de reforço em CA necessária para que haja um desempenho uniforme de toda a plataforma, fez-se uso da equação 10.23 recomendada pelo mesmo procedimento.

$$H = 40 \times \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (10.22)$$

A equação 10.23 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$D_{adm} = 1023 \times N^{-0,176} \quad (10.23)$$

Portanto,

$$H = 40 \times \log \left(\frac{D_c}{1023 \times N^{-0,176}} \right) \quad (10.24)$$

$$H = 40 \times \log \left(\frac{D_c}{1023} \right) - 40 \times \log N^{-0,176} \quad (10.25)$$

$$H = 40 \times \log \left(\frac{D_c}{1023} \right) + 7,04 \times \log N \quad (10.26)$$

Portanto,

$$H_1 - H_2 = 7,04(\log N_1 - \log N_2) \quad (10.27)$$

$$H_1 - H_2 = 7,04 \log \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (10.28)$$

ou seja,

$$H_1 - H_2 = 7,04 \log(17,51) \quad (10.29)$$

$$H = 8,75 \text{ cm} \quad (10.30)$$

Transformando a espessura de CA determinada em espessura equivalente de material granular considerando-se um coeficiente equivalência estrutural igual a 2, obtém-se que seria necessário o acréscimo de 17,5 cm na espessura total equivalente.

A estrutura existente é constituída basicamente dos materiais e espessuras indicadas na tabela 10.7

Tabela 10.7: Determinação da espessura total equivalente do segmento experimental

Material	Espessura da camada (cm)	Coeficiente de equivalência estrutural	Espessura equivalente (cm)
Concreto Asfáltico	5	2,0	10
Material Granular	25	1,0	25
Espessura Total Equivalente (cm)			35

Portanto, a estrutura do segmento experimental apresenta uma espessura total equivalente, em termos de material granular, igual a 35 cm. Considerando-se o acréscimo necessário de 17,5 cm para que deflexões atinjam níveis próximos ao das deflexões encontradas no eixo, obtém-se 52,5 cm, ou seja, 1,50 vezes a espessura total original da estrutura.

10.2.3. Procedimento PRO-10 para dimensionamento de reforço

De acordo com o procedimento DNER – PRO-10/79 a espessura total de reforço (H) de um pavimento expresso em termos de material granular é função da redução percentual da deflexão requerida (Δ). A correlação entre as duas variáveis é encontrada no nomograma 5, do referido método.

A solução analítica do nomograma pode ser obtida através das seguintes equações:

Para $H \leq 15,5$ cm

$$H = 0,0083 \times \Delta^2 \quad (10.31)$$

Para $H > 15,5$ cm

$$H = 1,0371 \times \Delta - 29,24 \quad (10.32)$$

Onde:

$$\Delta = \frac{D_0 - D_h}{D_0} \times 100 \quad (10.33)$$

Para o caso de análise dos dados do trecho experimental, onde se quer determinar a diferença de espessura do revestimento para que se consiga a mesma vida útil do pavimento, em termos de deflexão, tanto nos bordos, como no eixo da pista, têm-se:

$$\Delta = \frac{D_{borda} - D_{eixo}}{D_{borda}} \times 100 \quad (10.34)$$

$$\Delta = \frac{73 - 44}{73} \times 100 \quad (10.35)$$

$$H = 0,0083 \times (39,72)^2 \quad (10.36)$$

$$H = 13,1\text{cm} \quad (10.37)$$

Considerando-se que a estrutura do segmento experimental apresenta uma espessura total equivalente em termos de camada granular igual a 35 cm, conforme apresentado na tabela 10.7 e, somando-se a este valor a espessura de reforço dimensionada igual a 13,1 cm, obtém-se 48,1 cm, ou seja, 1,37 vezes a espessura total original da estrutura.

10.3. Definição do Fator de Ajuste de Drenagem, Fd

Na tabela 10.8 está apresentado um resumo dos resultados obtidos pela análise de calibração desenvolvida.

Tabela 10.8: Fatores de ajuste da espessura total expressa em termos de material granular

Método / Procedimento	Parâmetro analisado	Fatores de Ajuste, Fd
DNER – pavimento flexível novo	Varição no módulo de resiliência do solo laterítico do subleito	1,24
	Varição no módulo de resiliência do material granular da base	1,51
DNER PRO-11	Deflexão	1,50
DNER PRO-10	Deflexão	1,37

Analisando-se os Fatores de Drenagem apresentados na tabela 10.6, com os dados obtidos em campo e com os resultados apresentados na tabela 10.8, observam-se as seguintes conclusões:

- O material laterítico do subleito localizado nos bordos de plataforma apresentou uma redução de 30% no módulo de resiliência com relação ao do eixo.
- O material granular constituinte da camada de base localizado nos bordos da plataforma, apresentou redução do módulo de resiliência de cerca de 50%, quando comparado com o do eixo. Ressalta-se que este material apresentava agregados arredondados e elevado teor de silte na fração fina.
- As deflexões médias verificadas nos bordos do pavimento foram cerca de 66% superiores àquela encontrada no eixo.
- Na análise de calibração do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis preconizado pelo DNER verificou-se que este requer um acréscimo na espessura total, em termos de material granular, de 24% para uma redução de 30% no módulo resiliente e de 51% para uma redução de 50% no módulo resiliente do material do subleito.
- Com base nos procedimentos de dimensionamento de reforços estruturais, foram determinados fatores de ajuste da ordem de 1,4 a 1,5; em relação à estrutura existente.
- A redução do módulo de resiliência do material constituinte da camada de base para 0,25 do valor deste quando na umidade, apresentou-se bastante severa, conduzindo a fator de ajuste de drenagem bastante elevados, da ordem de 3,7.

Admitindo-se que as condições de drenagem verificadas no trecho experimental avaliado, podem-se assimilar às condições mais precárias encontradas na prática e

que os fatores de ajuste obtidos, considerando-se as diversas metodologias de projeto, foram bastante uniformes e próximos de 1,5, propõe-se os valores mostrados na tabela 10.9, e o emprego das seguintes equações de dimensionamento.

- Para determinação da espessura total do pavimento, H_{td} , em termos de material granular, para proteger o subleito:

$$H_{td} = 77,67 \times CBR^{-0,598} \times N^{0,0482} \times Fd \quad (10.38)$$

- Para determinação de H_{20d} , em termos de material granular, para proteger a camada de sub-base:

$$H_{20d} = 12,95 \times N^{0,0482} \times Fd \quad (10.39)$$

Tabela 10.9: Fatores de Drenagem, F_d , propostos

Condições de Projeto	Fator de Ajuste de Drenagem, F_d
Estrutura de pavimento com sistema de drenagem subsuperficial dimensionado hidraulicamente	1,00
Estruturas constituídas exclusivamente por material laterítico ou estruturas constituídas não exclusivamente de materiais não lateríticos, porém munidas de drenagem subsuperficial, sem a realização do devido dimensionamento hidráulico	1,25
Estruturas desprovidas de drenagem subsuperficial e não constituídas exclusivamente por materiais lateríticos	1,50

Cabe ressaltar que não serão recomendados Fatores de Ajuste de Drenagem inferiores a 1,0; por resultarem em estruturas com espessuras, em termos de material granular, inferiores às mínimas recomendadas pelo procedimento DNER

10.4. Exemplo Numérico

Com a finalidade de ilustrar a aplicação do Fator de Drenagem, F_d , está apresentado a seguir um exemplo numérico de dimensionamento considerando-se:

- CBR do subleito igual a 5%, solo não laterítico
- Número “N” igual a 10^7 .
- Sistema de drenagem subsuperficial dimensionado hidraulicamente e, alternativamente, sistema de drenagem subsuperficial não dimensionado hidraulicamente.

a) Determinação de H_t e H_{20} segundo metodologia atual:

Determinação da espessura total em termos de material granular.

$$H_t = 77,67 \times (5)^{-0,598} \times (10^7)^{0,0482} \quad (10.40)$$

$$H_t = 65cm \quad (10.41)$$

Determinação da espessura H_{20} .

$$H_{20} = 77,67 \times (20)^{-0,598} \times (10^7)^{0,0482} \quad (10.42)$$

$$H_{20} = 28cm \quad (10.43)$$

b) Determinação de H_{td} e H_{20d} segundo metodologia proposta:

Para a primeira hipótese, solo não laterítico e sistema de drenagem dimensionado hidraulicamente, da tabela 10.9 obtém-se $F_d = 1,25$, portanto:

Determinação de H_{td} em termos de material granular.

$$H_{td} = 77,67 \times (5)^{-0,598} \times (10^7)^{0,0482} \times 1,25 \quad (10.44)$$

$$H_{td} = 81,25cm \quad (10.45)$$

Determinação da espessura H_{20d} em termos de material granular.

$$H_{20d} = 12,95 \times (10^7)^{0,0482} \times 1,25 \quad (10.46)$$

$$H_{20d} = 35,0cm \quad (10.47)$$

Para a segunda hipótese, solo não laterítico e sistema de drenagem não dimensionado hidráulicamente, da tabela 10.9 obtém-se $F_d = 1,50$, portanto:

Determinação de H_{td} em termos de material granular.

$$H_{td} = 77,67 \times (5)^{-0,598} \times (10^7)^{0,0482} \times 1,50 \quad (10.48)$$

$$H_{td} = 97,50cm \quad (10.49)$$

Determinação da espessura H_{20d} em termos de material granular.

$$H_{20d} = 12,95 \times (10^7)^{0,0482} \times 1,50 \quad (10.50)$$

$$H_{20d} = 42,0cm \quad (10.51)$$

c) Estruturas dos pavimentos resultantes.

Tabela 10.10: Estruturas dimensionadas

Material	Coeficiente de Equivalência Estrutural	Espessuras das Camadas (cm)						Diferenças de Espessuras (cm)			
		Procedimento Atual		Procedimento Proposto							
		Real	Equivalente	Fd = 1,25		Fd = 1,50		Fd = 1,25		Fd = 1,50	
				Real	Equivalente	Real	Equivalente	Real	Equivalente	Real	Equivalente
Concreto Asfáltico	2,00	7,5	15,0	7,5	15,0	7,5	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brita Graduada Simples	1,00	20,0	20,0	27,0	27,0	33,0	33,0	7,0	7,0	13,0	13,0
Reforço do subleito, CBR ≥ 20%	1,00	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0	10,0	10,0	20,0	20,0
H _{total} adotado		65,0		82,0		98,0		17,0		33,0	
H _{total} necessário		65,0		81,3		97,5		16,3		32,5	
H ₂₀ adotado		30,0		42,0		48,0		12,0		18,0	
H ₂₀ necessário		28,0		35,0		42,0		7,0		14,0	

11. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante o desenvolvimento dos trabalhos verificou-se através de bibliografia existente que a água livre no interior da estrutura do pavimento é prejudicial ao seu desempenho funcional e estrutural, seja pela perda da capacidade de suporte do subleito, diminuição dos módulos resilientes dos materiais estabilizados empregados nas camadas de base e sub-base, ou pelo efeito de bombeamento nos casos de revestimentos asfálticos ou placas de concreto trincados.

Conforme dados apresentados no capítulo 6, o levantamento deflectométrico efetuado no trecho experimental, logo após um período de chuvas, mostrou que a infiltração d'água pelas bordas do pavimento proporcionou redução de 30% e 50% nos módulos resilientes do subleito e base estabilizada não tratada, respectivamente. Da mesma maneira foram constatados acréscimos de deflexões da ordem de 65% para as condições normal e com excesso de umidade no pavimento.

As reduções observadas nos módulos de resiliência dos materiais do trecho experimental são compatíveis com a magnitude de valores citados em diversos trabalhos que contém relatos de pesquisas desenvolvidas no Brasil e no exterior.

Análise teórica de previsão de desempenho dos pavimentos utilizando tais informações obtidas no campo e modelos que refletem os métodos de dimensionamento usuais empregados no país, demonstram que a estrutura estudada pode ter sua vida útil bastante reduzida atingido valores da ordem de 5.430 vezes inferiores aos previstos em projeto.

Considerando-se a grande dificuldade de impermeabilizar completamente o pavimento durante toda sua vida útil, recomenda-se, sempre que possível, prever um sistema de drenagem subsuperficial dimensionado adequadamente quanto aos aspectos hidráulicos ou seja, utilizando camadas drenantes interligadas a drenos rasos longitudinais, eliminando assim rapidamente a água livre, antes que ocorra a saturação das camadas subjacentes, conforme os procedimentos descritos no capítulo 4.

Os métodos e procedimentos de dimensionamento estrutural de pavimentos empregados no meio técnico nacional, conforme visto no capítulo 7, não utilizam ainda explicitamente nenhum coeficiente para levar em consideração os efeitos deletérios da presença de água livre na estrutura.

O método da AASHTO-93 para dimensionamento de pavimentos flexíveis introduziu um coeficiente de drenagem (m_i) para ajustar as espessuras efetivas das camadas estruturais, de tal forma a considerar os efeitos das diversas condições de drenagem subsuperficial no campo.

Considerando-se a importância da drenagem na vida útil do pavimento propõe-se a introdução de Fatores de Ajuste de Drenagem (F_d), para aumento da espessura total do pavimento, expresso em termos de material granular, no método de dimensionamento vigente no DNER, conforme exposto no Capítulo 10. Esta medida visa compensar eventuais condições adversas de saturação dos materiais, principalmente quando não se puder, por questões técnicas e/ou econômicas, dispor de sistemas de drenagem subsuperficial para a remoção rápida da água livre no interior da estrutura do pavimento como mencionado.

Finalmente, ressalta-se que apesar dos Fatores de Ajuste de Drenagem terem sido calibrados para a metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER, estes Fatores apresentam características regionais, em função do clima e das características dos materiais empregados na estrutura do pavimento do segmento rodoviário experimental. Portanto, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas futuras, em novas localidades, sob diferentes condições climáticas, visando a calibração destes Fatores para outras regiões do território nacional.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS. **Interim guide for design of pavement structures.** Washington, D.C., 1961.
2. _____. **Interim guide for design of pavement structures.** Washington, D.C., 1972.
3. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures.** Washington, D.C., 1986.
4. _____. **AASHTO guide for design of pavement structures.** Washington, D.C., 1993.
5. _____. **AASHTO guide for design of pavement structures:** Guidelines for the design of highway internal drainage systems. Washington, D.C., ago. 1996. 35p.
6. _____. **AASHTO guide for design of pavement structures:** Development of coefficients for treatment of drainage. Washington, D.C., ago. 1996. 16p.
7. _____. **AASHTO guide for design of pavement structures:** Development of effective roadbed soil moduli. Washington, D.C., ago. 1996. 6p.
8. _____. **AASHTO guide for design of pavement structures:** Development of models for effects off subbase and loss of support. Washington, D.C., ago. 1996. 35p.
9. ARAÚJO, P.R.; TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.5, n.3, p. 21-29, jul./set. 2000.

10. ASPHALT INSTITUTE. **Drainage of Asphalt Pavement Structures**, Manual Series nº 15, 1984.
11. AZEVEDO FILHO, O. **Estudo do desempenho de pavimentos asfálticos em vias urbanas de tráfego intenso**. 1996. 184p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos, jun. 1996.
12. BALDWIN, J.S. Use of open-graded, free-draining layers in pavement systems: A national synthesis report. Transportation Research Record 1121, p.86-89, 1987.
13. BAPTISTA, C.N. **Pavimentação**. 2.ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976. p. 163,249.
14. BAUMGARDNER, R.H.; Maintenance of Highway Edgedrains. Federal Highway Administration, Pavement technology. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/edge.html>>. Acesso em 23 de ago. 2002.
15. CAMACHO, J. **Peculiaridades de distribuição de umidades em bases de pavimento de solo arenoso fino laterítico**. 2002. 180p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
16. CASAGRANDE, A., SHANNON W. L. 1952 – “Base Course Drainage for Airport Pavements “ – Transactions – American Society of Civil Engineering pp. 792 - 814
17. CEDERGREN, H. R. **Drainage of Highway and Airfield Pavements**. New York, Wiley, 1984.
18. _____. **Drenagem dos pavimentos de rodovias e aeródromos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1980. 177p.
19. CHRISTOPHER, R.B.; ZHAO, A.; HAYDEN, S.A. Geocomposite for pavement subsurface drainage. In: 81^a ANNUAL MEETING –

- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 81., Washington, D.C., 2001. 27p. 1CD- ROM.
20. DAWSON, A.R.; HILL, A.R. Prediction and implication of water regimes in granular bases and sub-bases. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUBDRAINAGE IN ROADWAY PAVEMENTS AND SUBGRADES, Granada (Espanha), nov. 1998. **Symposium**. Granada: Asociación Técnica de Carreteras, 1998. p.121-128.
 21. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: procedimento B**: DNER-PRO/11. Rio de Janeiro, 1994b. 16 p.
 22. _____. **Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis**: DNER PRO-269: Rio de Janeiro, 1994c. 17 p.
 23. _____. **Manual de pavimentação**: Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1996. p.204-234.
 24. _____. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 1975. p. II.2.3-II.2.6.
 25. _____. **Instruções para drenagem de rodovias**. Rio de Janeiro, 1978. 136p.
 26. ELFINO, M.K.; DAVIDSON, J.L. An evaluation of design high-water clearances for pavements. Transportation Research Record 1121, p.66-76, 1987.
 27. ELSAYED, A.S.; LINDLY, J.K. Estimating permeability of untreated roadway bases. Transportation Research Record 1519, p.11-18, 1996
 28. FARH, Y.; FREER-HEWISH, R.J.; CARSON, A.M. Horizontal infiltration of moisture in road pavements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUBDRAINAGE IN ROADWAY PAVEMENTS AND SUBGRADES, Granada (Espanha), nov. 1998. **Symposium**. Granada: Asociación Técnica de Carreteras, 1998. p.195-202.

29. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Manual of practice:** material and procedures for sealing and filling cracks in asphalt surface pavement. Virginia: FHWA-RD-99-147, 1999. p.12-13.
30. _____. **Concrete Pavement Manual.** Washington, DC: FHWA-HI-92-015, 1992. p.121-160.
31. _____. **Drainage Requirements in Pavements.** Washington, DC: FHWA-SA-96-070, 1998. 54p.
32. FWA, T.F. Water-induced distress in flexible pavement in a wet tropical climate. Transportation Research Record 1121, p.57-65, 1987.
33. GARBER, N.J.; HOEL, L.A. **Traffic and highway engineering.** 2.ed. Virginia, 1999. p. 789-811.
34. GARCEZ, L.N. **Elementos de engenharia hidráulica e sanitária.** 2.ed. São Paulo: Editora edgard blücher ltda, 1969. p.10-16.
35. HIGHWAY RESEARCH RECORD. AASHO Road test results applied to pavement design in Illinois. Washington, number 90, publication 1306, 1965. 42p.
36. HUANG Y.H. **Pavement analysis and design.** Estados Unidos: Prentice Hall, 1993. p.371-405. p. 531-663.
37. -HUDSON, W.R.; FLANAGAN, P.R. An examination of environmental versus load effects on pavements. Transportation Research Record 1121, p.34-39, 1987.
38. JANOO, V.; SHEPHERD, K. Seasonal variation of moisture and subsurface layer moduli. Transportation Research Record 1709, p.98-107, 2000.
39. JANSSEN, D.J. Moisture in Portland cement concrete. Effects of temperature and water on pavement performance. Transportation Research Record 1121, p.40-44, 1987.

40. LENCASTRE, ARMANDO. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1972. p.184-190.
41. LOULIZI, A.; AL-QADI, I.L.; BHUTTA, S.A.; FLINTSCH, G.W. Evaluation of geosynthetics used as separators. Journal of the Transportation Research Record 1687, p.104-111, 1999.
42. LTTP DATA ANALYSIS: FREQUENTLY ASKED QUESTIONS ABOUT JOINT FAULTING WITH ANSWERS FROM LTTP. Virginia: Federal Highway Administration – RD-97-101, Ago. 1997.
43. MALLELA, J.; TITUS-GLOVER, L.; DARTER, M.I. Considerations for providing subsurface drainage in jointed concrete pavements. Transportation Research Record 1709, p.1-10, 2000.
44. MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. p.42-59.
45. MOULTON, L.K. **Highway Subdrainage Design**. Report nº FHWA - TS - 80.224 - Federal Highway Administration, p. 162, ago. 1980.
46. MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como agentes melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. 2001. 122p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
47. NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Editora Vilibor, 1995. p.76-81.
48. OLIVEIRA, A.L. **Drenagem subsuperficial de pavimentos flexíveis**. 1982. 157p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1982.
49. PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. p.101-119.

50. PORTO, H.G. **Pavimentos drenantes**. 1.ed. São Paulo: D & Z Computação Gráfica e Editora, 1999. 105p.
51. PREVEDOUROS, P.D.; PAPACOSTAS, C.S. **Transportation engineering and planning**. 2.ed. Hawaii: Prentice-Hall, 1993. p. 112-113.
52. RIDGEWAY, H.H. Infiltration of Water Through the Pavement Surface. Transportation Research Record 616, p. 98-100, 1976.
53. RIDGEWAY, H. H. 1982. Pavement Subsurface Drainage Systems, Synthesis of Highway Practice 96, Transportation Research Board.
54. SANTAMARÍA, J.; SINIS, F.; ALONSO, M.; OLIVA, J.L.G. The proposal for a new spanish standard on road subdrainage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUBDRAINAGE IN ROADWAY PAVEMENTS AND SUBGRADES, Granada (Espanha), nov. 1998. **Symposium**. Granada: Asociación Técnica de Carreteras, 1998. p.403-410.
55. SÃO PAULO. Prefeitura do Município de São Paulo. **Diretrizes de projeto de pavimentação: DP-P02 - Diretrizes de projeto para classificação das vias**. São Paulo: jun. 1999. 2v. p.31-54.
56. SÃO PAULO. Prefeitura do Município de São Paulo. **Diretrizes de projeto de pavimentação: DP-P05 - Diretrizes de projeto para dimensionamento de pavimentos rígidos**. São Paulo: jun. 1999. 2v. p.82-121.
57. SÃO PAULO. Prefeitura do Município de São Paulo. **Diretrizes de projeto de pavimentação: DP-P06 - Diretrizes de projeto para dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego muito leve, leve e médio**. São Paulo: jun. 1999. 2v. p.122-151.
58. SÃO PAULO. Prefeitura do Município de São Paulo. **Diretrizes de projeto de pavimentação: DP-P07 - Diretrizes de projeto para dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego meio pesado, pesado e muito pesado**. São Paulo: jun. 1999. 2v. p.152-175.

59. SÃO PAULO. Prefeitura do Município de São Paulo. **Diretrizes de projeto de pavimentação: DP-P08** - Diretrizes de projeto para pavimento com peças pré-moldadas de concreto – procedimento de dimensionamento e instrução de implantação. São Paulo: jun. 1999. 2v. p.183-204.
60. SARAF, C.; CHOU, C.; MCCULLOUGH B.F. Effect of rainfall on the performance of continuously reinforced concrete pavements in Texas. Transportation Research Record 1121, p.45-49, 1987.
61. SEEDS, S.B.; HICKS, R.G. Development of drainage coefficients for the 1986 AASHTO guide for design of pavement structures. Journal of the Transportation Research Record 1307, p. 256-267, 1991.
62. SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1997. p. 409-619. v1.
63. THOM, N.H.; BROWN, S.F. Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base. Transportation Research Record 1121, p.50-56, 1987.
64. YODER E. J and WITCZAK M. W. **Principles of Pavement Design**. 2.ed. John Wiley & Sons Inc, 1975.
65. WYATT, T.R.; MACARI, E.J. Effectiveness analysis of subsurface drainage features based on design adequacy. Transportation Research Record 1709, p.69-77, 2000.