

PREFÁCIO

Os ensinamentos conceituados pelo engenheiro Harry R. Cedergren por meio do livro *Drenagem dos pavimentos de rodovias e aeródromos* remetem à necessidade de se estudar o efeito que o excesso de água livre no interior da estrutura proveniente de infiltrações causa na deterioração e ruptura precoce dos pavimentos rodoviários e aeroportuários.

No entanto, a dificuldade teórica de se avaliar e comprovar os benefícios da drenagem subsuperficial, a resistência de renomados técnicos em defender a importância dos drenos de pavimentos mesmo para tráfego pesado e o aparente aumento considerável de custo dos dispositivos desencorajou-nos a publicar este livro anteriormente.

Ao longo de nossa vida profissional, porém, deparamo-nos com inúmeros casos de ruptura prematura e desempenho pífio dos pavimentos e percebemos que, se os conceitos aqui divulgados houvessem sido utilizados, em muitas situações as estruturas poderiam apresentar maior vida útil, além de melhorar as condições de fluidez, conforto e segurança do tráfego, proporcionando economia aos órgãos mantenedores e usuários ao longo do tempo.

Neste livro, estão sintetizados os conceitos básicos de infiltração e percolação de águas de chuva para o interior da estrutura e do escoamento do fluxo pelo sistema de drenagem subsuperficial, por meio da consideração das equações de Darcy em meios porosos e de Manning para condutos livres, além de análises sobre a teoria de filtro no contato entre diferentes materiais granulares, preconizadas por Bertram, Terzaghi e Casagrande.

São mostrados os problemas decorrentes da drenagem inadequada e apresentados os procedimentos e exemplos numéricos dos principais métodos de dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem dos pavimentos, empregados no país e no exterior, baseados nos estudos de Cedergren, Moulton e Ridgeway.

São apresentados também critérios adotados pela FHWA e AASHTO para estimativa de tempos de drenagem do material, propostos por Casagrande e Shannon e por Barber e Sawyer, em função do grau de saturação final da camada drenante.

INTRODUÇÃO

Em pavimentação, deve ser alcançado o objetivo principal de projetar e construir economicamente uma estrutura robusta o suficiente para suportar as cargas de tráfego e as ações das intempéries, proporcionando níveis de conforto ao rolamento e segurança aceitáveis ao longo do período de projeto.

Mesmo bem dimensionados e construídos para atender a um horizonte de projeto de dez a vinte anos, muitos pavimentos têm apresentado problemas funcionais, estruturais e até de segurança viária precocemente, ou seja, com um número de solicitações de tráfego relativamente baixo.

Um dos problemas relacionados ao desempenho pífio dos pavimentos é a aplicação de cargas do tráfego quando os materiais constituintes de sua estrutura estão sob condição saturada.

Para evitar essa situação, é necessário retirar rapidamente toda a água que cai e escoa sobre a plataforma viária por meio da implantação de adequado sistema de *drenagem superficial*, constituído de cimentos transversal e longitudinal favoráveis e instalação de valetas, sarjetas e dispositivos de captação para transportar a água a um local seguro de deságue. É importante também remover toda a água que se infiltra na estrutura por meio de sistema de *drenagem subsuperficial* num tempo relativamente curto que evite sua saturação, prevendo-se camadas permeáveis preferencialmente interligadas a drenos rasos transversais e longitudinais.

Para situações em que o nível freático é elevado, sugere-se também a instalação de drenos profundos (*sistema de drenagem profunda*) objetivando seu rebaixamento, dado que essa condição pode constituir uma fonte de saturação das camadas subjacentes do pavimento.

Tem-se constatado que a drenagem subsuperficial é um dos fatores mais importantes relacionados ao bom desempenho de um pavimento, embora esse aspecto não receba a devida atenção por parte dos especialistas em pavimentação. Dessa forma, este livro busca difundir os conceitos para justificativa de utilização e dimensionamento desse sistema.

Esse tipo de intervenção começou a ser previsto nos últimos anos, principalmente nas rodovias brasileiras de tráfego intenso e pesado, uma

Água e pavimento

1.1 Origem da água nos pavimentos

1.1.1 Fontes de umidade

A umidade excessiva no subleito e nas camadas da estrutura do pavimento pode ser proveniente de diversas fontes, a saber: infiltração, percolação, capilaridade e movimentos em forma de vapor de água.

A água no pavimento pode ser decorrente de infiltrações superficiais devido às juntas, trincas, bordos dos acostamentos e outros tipos de defeitos na superfície que podem facilitar o ingresso da água no interior de sua estrutura.

A água pode subir por percolação do nível freático elevado ou entrar lateralmente pelos bordos do pavimento e valetas dos acostamentos, como mostrado na Fig. 1.1.



Fig. 1.1 Origens da água na estrutura do pavimento

Efeitos de capilaridade e movimentos de vapor de água também são responsáveis pelo acúmulo de umidade abaixo da estrutura do pavimento. A movimentação do vapor de água está associada às variações de temperatura e de outras condições climáticas.

Quadro 1.1 Defeitos em pavimentos asfálticos

Manifestação	Problema relacionado à umidade	Problema climático	Problema relacionado ao material	Carregamento associado	Início do defeito estrutural		
					Asfalto	Base	Sub-base
Abrasão	Não	Não	Agregado	Não	Sim	Não	Não
Exsudação	Não	Acentua-se em altas temperaturas	Betume	Não	Sim	Não	Não
Desintegração	Não	Não	Agregado	Ligeiramente	Sim	Não	Não
Intemperismo	Não	Umidade	Betume	Não	Sim	Não	Não
Inchaamento	Excesso	Congelamento	Umidade	Sim	Não	Sim	Sim
Corrugação	Ligeiramente	Rel. entre clima e succção	Mistura instável	Sim	Sim	Sim	Sim
Escorregamento	Não	Acentua-se em altas temperaturas	Mistura instável Perda de ligante	Sim	Sim	Não	Não
Afundamento de trilha de roda	Excesso em grandes camadas	Succção e materiais	Propriedades de compactação	Sim	Sim	Sim	Sim
Ondulação	Excesso	Succção e Materiais	Expansão da argila suscetível ao congelamento	Não	Não inicialmente	Não	Sim
Depressão	Excesso	Succção e Materiais	Assentamento	Sim	Não	Não	Sim
Panelas	Excesso	Congelamento	Umidade	Sim	Não	Sim	Sim
Longitudinal	Sim	Perda de resistência com o degelo	Propriedades térmicas	Sim	Falha de construção	Sim	Sim
	Jacaré	Sim, drenagem	Não	Possivel problema de mistura	Sim	Sim, mistura	Sim
Transversal	Sim	Baixa temperatura gelo – degelo	Propriedades térmicas	Não	Sim, suscetível à temperatura	Sim	Sim
	Retração	Succção Perda de umidade	Sensível à umidade	Não	Sim, fortemente	Sim	Sim
Parabólico	Sim	Não	Perda de ligante	Sim	Sim, no ligante	Não	Não

Quadro 1.2 Defeitos em pavimentos rígidos

Manifestação	Problema relacionado à umidade	Problema climático	Problema relacionado ao material	Carregamento associado	Início do defeito estrutural		
					Placa	Sub-base	Subleito
Eshorcinamento	Possivelmente	Não	Possivelmente	Não	Sim	Não	Não
Escamação	Sim	Ciclos de gelo-dsgelo	Influência química	Não	Sim, no acabamento	Não	Não
D-Trincamento	Sim	Ciclos de gelo-dsgelo	Agregado	Não	Sim	Não	Não
Fissuração	Sim	Não	Rico em argamassa	Não	Sim, superfície fraca	Não	Não
Levantamento/Alçamento	Não	Temperatura	Propriedades térmicas	Não	Sim	Não	Não
Bombearamento	Sim	Umidade	Presença de furos na base sensíveis à umidade	Sim	Não	Sim	Sim
Degrau	Sim	Umidade e sucção	Deformação de assentamento	Sim	Não	Sim	Sim
Empenamento	Possivelmente	Umidade e temperatura	Não	Não	Sim	Não	Não
Punctionamento Quebras localizadas		Sim	Deformação seguida de fissuração	Sim	Não	Sim	Sim
Trincas	Junta	Produz dano depois	Possivelmente	Finos apropriados Limpeza das juntas	Não	Junta	Não
	Canto	Sim	Sim	Devido ao bombeamento	Sim	Não	Sim
	Diagonal Transversal Longitudinal	Sim	Possivelmente	Ocorre com o aumento da umidade	Sim	Não	Sim

2 Controle da água e elementos do sistema

2.1 Critérios de controle da água nos pavimentos

A umidade está sempre presente no solo e nos materiais granulares de pavimentação em uma das seguintes formas:

- ◆ Água capilar: umidade retida nos poros do solo acima do nível de saturação ou sob a ação da tensão superficial.
- ◆ Água de adesão: umidade que fica aderida à superfície das partículas do solo.
- ◆ Vapor de água: umidade no estado gasoso.
- ◆ Água livre: excesso de umidade propriamente dito.

A água livre no subleito e nas camadas de sub-base e base de pavimentos é de extrema importância, porque causa diminuição na resistência do material por:

- ◆ Redução na coesão aparente pela diminuição das forças capilares.
- ◆ Redução do atrito intergranular por lubrificação.
- ◆ Redução da densidade efetiva do material abaixo do lençol freático.
- ◆ Diminuição da capacidade pelo desenvolvimento de pressões neutras que aumentam ou oscilam sob a ação das cargas do tráfego.

Os efeitos danosos da água livre no pavimento podem ser minimizados evitando sua entrada pela superfície, prevendo drenagem subsuperficial adequada para remover rapidamente a água infiltrada, ou construindo pavimento suficientemente robusto para resistir ao efeito combinado da carga de tráfego pesado e da umidade em excesso no interior de sua estrutura.

Nos projetos de pavimentação, o maior objetivo quanto ao aspecto de drenagem subsuperficial é procurar evitar que os materiais constituintes de suas camadas fiquem saturados ou expostos a elevados níveis de umidade por longos períodos de tempo. Os três principais critérios que podem ser considerados para controlar e minimizar os problemas causados pela saturação são:

Fatores de dimensionamento hidráulico

3

Neste capítulo são tratados os aspectos hidráulicos da camada drenante destinada a remover rapidamente ou controlar o tempo de permanência da água livre proveniente das chuvas que se infiltram através das trincas e das juntas de construção existentes na superfície do pavimento.

Os principais aspectos abordados são:

- ◆ Parâmetros hidráulicos de cálculo.
- ◆ Concepção do sistema de drenagem.

Os parâmetros de cálculo para o dimensionamento hidráulico envolvem as características geométricas da via que definem a linha de maior declive do fluxo da água, as granulometrias dos materiais a serem utilizados nas diversas camadas do pavimento e a habilidade deles em reter ou permitir o escoamento da umidade excessiva.

Os conceitos de porosidade e permeabilidade dos materiais e as equações básicas de escoamento em meios porosos e suas limitações também são tratados.

Para controle dos tempos de permanência e retirada da água livre do pavimento, são consideradas duas concepções distintas no sistema hidráulico:

- ◆ Profundidade do fluxo, em que a capacidade de escoamento da camada permeável deve ser superior à infiltração de projeto.
- ◆ Tempo de drenagem, em que a camada drenante poderá ficar saturada durante o período de precipitação, e que, no entanto, deverá ser drenada algumas horas depois de cessada a chuva, para evitar danos à estrutura.

3.1 Características geométricas da via

A trajetória percorrida pelo fluxo de água no interior do pavimento pode ser determinada com base nas características geométricas da via, envolvendo o greide longitudinal e as declividades transversais de todos os elementos da plataforma (pista e acostamento), tanto da superfície como das camadas inferiores.

Camadas drenantes e separadoras

4.1 Camadas drenantes

Além da contribuição ao suporte da estrutura de pavimento, o objetivo principal da camada drenante é proporcionar a remoção rápida de água livre que eventualmente exista no interior da estrutura. Sua espessura deve variar de acordo com as condições pluviométricas locais e ser fixada em função da necessidade hidráulica de drenagem da rodovia.

As camadas drenantes devem, preferencialmente, localizar-se entre o revestimento e a base e estender-se até os drenos rasos longitudinais ou as bordas livres. As Figs. 4.1 e 4.2 mostram as posições em que são colocadas as camadas drenantes em relação aos demais elementos do pavimento, e a segunda opção é utilizada nos casos em que é possível a conexão com os drenos profundos, caso existam.

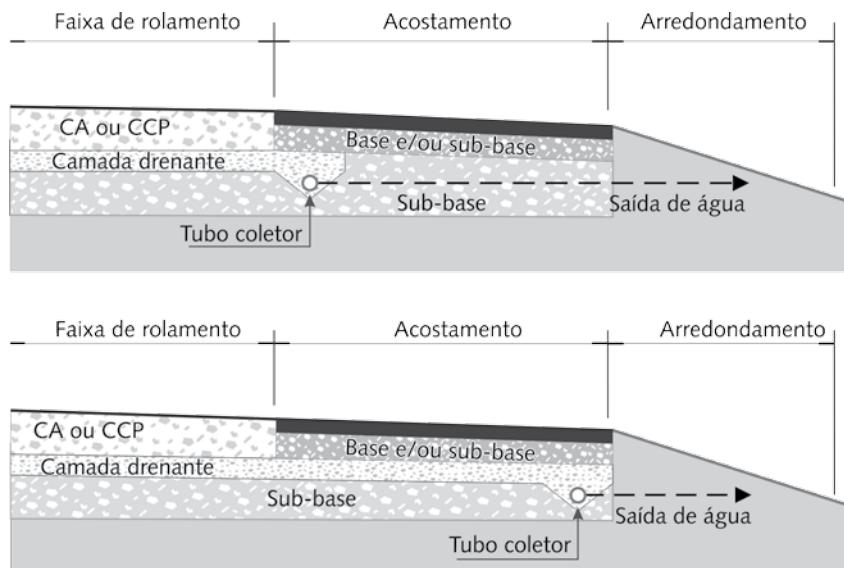


Fig. 4.1 Posicionamento da camada drenante – dreno raso

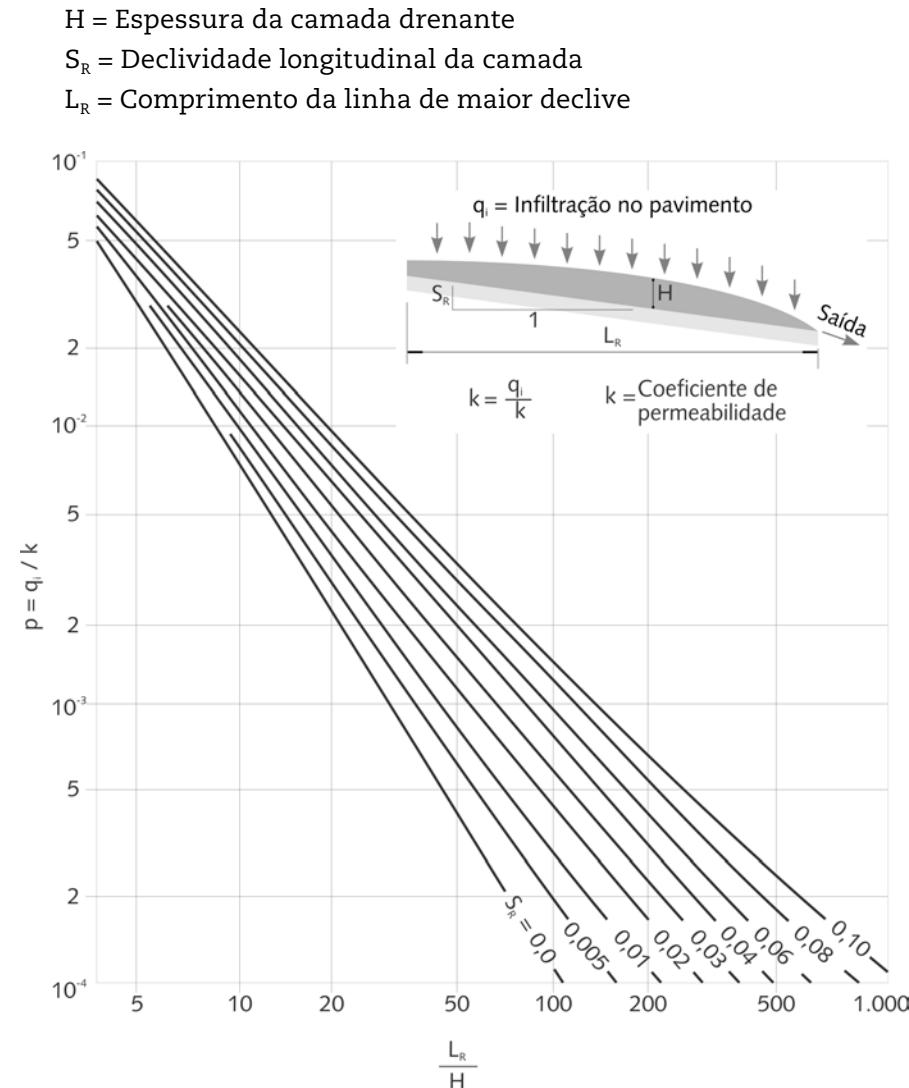


Fig. 4.3 Estimativa da espessura da camada em condição de fluxo contínuo

A equação pode ser desmembrada em duas parcelas. A primeira representa a descarga através da área H causada por um gradiente hidráulico S_R , e a segunda corresponde àquela de área $H/2$ causada por um gradiente hidráulico H/L_R .

Para declividade igual a zero, a equação corresponde à aplicação direta da fórmula de Darcy, assumindo que o nível da superfície freática

5.1 Drenos rasos longitudinais

Os drenos rasos longitudinais instalados na borda do pavimento são dispositivos essenciais para uma eficiente drenagem subsuperficial da plataforma viária. O objetivo desses drenos é coletar e remover a água que infiltra na estrutura do pavimento conduzindo-a até os pontos apropriados de deságue.

A instalação desses drenos no país começou por volta de 1970, e as primeiras aplicações de maneira sistemática em pavimentos de estradas paulistas ocorreram na Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), entre São Paulo-Campinas, e na Rodovia Ayrton Senna (SP-070), no trecho compreendido entre São Paulo e Guararema.

No passado, tais drenos foram empregados tanto com bases permeáveis ou não, e hoje é preferível que os drenos estejam conectados a bases drenantes de elevada transmissividade hidráulica.

A eficiência dos drenos rasos longitudinais depende fundamentalmente da forma ou situação em que eles são instalados. Independentemente da situação do pavimento, novo ou restauração, ele deve apresentar adequada conexão com as camadas permeáveis adjacentes, ter capacidade hidráulica suficiente para drenar todo volume de água que chega até ele e não sofrer entupimento por causa do carreamento de finos para o interior da tubulação ao longo do tempo.

A análise deve ser mais detalhada no caso de projetos de restauração e instalação posterior, pelas condicionantes adversas preexistentes de provável heterogeneidade e nível de saturação dos diversos materiais envolvidos, diferentes graus de deterioração e trincamento da estrutura, dificuldades construtivas, condições de confinamento e declividades transversais desfavoráveis das camadas.

Este capítulo trata de estudos de drenos rasos longitudinais interligados a bases de graduação aberta permeáveis e bases estabilizadas não erodíveis. O emprego de drenos de bordo junto com bases convencionais de granulometria densa não estabilizada não é recomendado, uma vez

que a água livre não poderá se movimentar efetivamente até os drenos, ou porque ocorrerá perda de finos e consequente entupimento e colmatação dos drenos.

5.1.1 Considerações iniciais

Os drenos rasos longitudinais são aqueles destinados a conduzir as águas coletadas pela camada ou base permeável para um dreno transversal ou saída lateral, dotados ou não de tubo.

Os drenos rasos longitudinais situam-se abaixo da camada drenante ou base permeável, em posição que lhes permita captar toda água infiltrada nessas camadas.

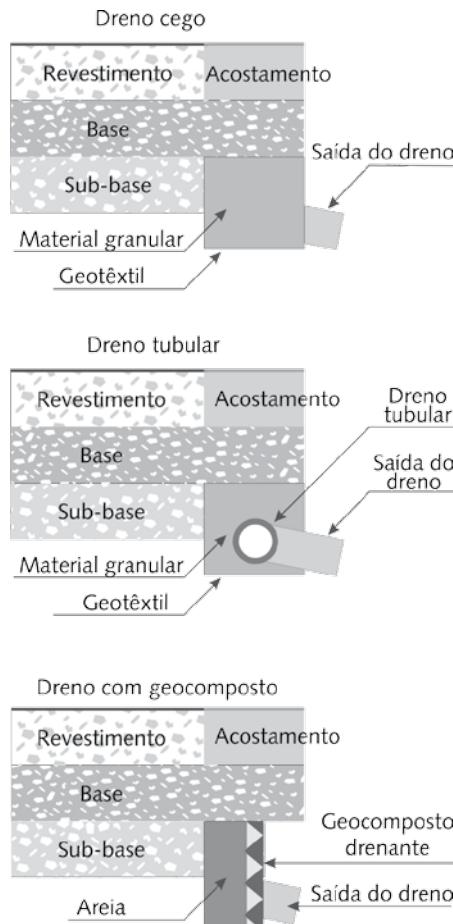


Fig. 5.1 Drenos rasos longitudinais

O dimensionamento do dreno raso longitudinal tem o objetivo de determinar:

- ◆ a área da seção de vazão.
- ◆ o comprimento em cuja extremidade se torna necessária a existência de uma saída lateral.

Os drenos rasos longitudinais, conforme mostrado na Fig. 5.1, poderão ser constituídos de diferentes tipos de materiais: essencialmente granulares (cego), tubulares e com geocompostos drenantes.

Drenos cegos

Os drenos cegos constituídos essencialmente de material granular, tipo brita ou areia, apresentam capacidade hidráulica em função da seção transversal, da declividade longitudinal e do coeficiente de permeabilidade do material se-

6 Pavimentos permeáveis

6.1 Breve histórico

Os projetos de pavimentos tradicionais procuram conferir ao revestimento a máxima impermeabilidade possível. Essa medida visa proporcionar aos materiais subjacentes não tratados proteção contra o aumento de umidade, que diminuiria sua capacidade de carga, e evitar a rápida degradação do revestimento, que se fissura quando submetido a pressões hidrodinâmicas pela ação do tráfego pesado.

Com a evolução da malha viária em todo o mundo, mais o crescimento das cidades, a impermeabilização do solo fez aumentar a frequência e a intensidade dos eventos de inundação intraurbana. Isso levou à procura de técnicas alternativas de drenagem que devolvessem ao solo a capacidade de infiltração anterior à urbanização.

O pavimento permeável ou poroso foi inicialmente empregado na França, nos anos 1945-1950, porém sem muito êxito, pois, na época, a qualidade do ligante asfáltico se apresentava heterogênea e de pouca trabalhabilidade, não sustentando as ligações da estrutura por causa do excesso de vazios. Foi novamente utilizado vinte anos mais tarde, no final dos anos 1970, quando alguns países como a França, os Estados Unidos, o Japão e a Suécia voltaram a se interessar pelo pavimento poroso.

Os principais motivos que levaram à utilização sistemática dos pavimentos permeáveis foram:

- ◆ O aumento das superfícies impermeáveis, devido ao rápido crescimento populacional do pós-guerra, que sobrecarregou os sistemas de drenagem existentes, causando frequentes inundações urbanas.
- ◆ A drenagem da pista para evitar a formação de poças de água no pavimento, o que aumenta a segurança e o conforto para dirigir durante eventos chuvosos.
- ◆ O reduzido nível de emissão de ruídos em comparação com o pavimento convencional, o que ajuda a diminuir a poluição sonora nas cidades.

Drenagem de pavimentos ferroviários

7

Normalmente, define-se na literatura técnica a superestrutura ferroviária ou via permanente como sendo o conjunto de elementos que fica apoiado sobre o subleito, ou infraestrutura. É constituído pelos trilhos, dormentes, lastro e sublastro.

Em vista da similaridade de função e comportamento, e como alguns autores consideram, empregou-se neste capítulo o termo *pavimento ferroviário* para a superestrutura, uma vez que recebe os impactos das cargas do tráfego, distribui convenientemente os esforços ao subleito e está sujeito às ações das intempéries.

Alguns trabalhos consideram, também, o emprego de uma camada de reforço do subleito, o que faz confundir ainda mais o limite a ser adotado para a interface entre a infra e a superestrutura ferroviária.

O lastro tem a função de manter os trilhos e os dormentes nas posições requeridas, receber e transmitir convenientemente os esforços verticais, transversais e longitudinais para as camadas subjacentes, além de atenuar o ruído e a vibração causada pela passagem dos trens.

Ele deve possuir vazios para acomodar materiais finos de inevitável contaminação, permitir a movimentação dessas partículas sem que a resiliência da camada seja prejudicada e evitar que ocorra o desenvolvimento de qualquer tipo de vegetação.

O material destinado ao lastro deve ter elevada capacidade drenante para facilitar o rápido escoamento da água pluvial infiltrada, além de permitir a recomposição da geometria da via férrea no caso de serviços de conservação e manutenção, principalmente por equipamentos mecânicos.

Para desempenhar adequadamente todas essas funções, o material do lastro deve ser constituído de pedra britada, uniforme, de formato angular, resistente à abrasão e mantido sempre limpo.

Um dos processos danosos e relevante no comportamento da via é a ocorrência da contaminação do lastro, que pode ser causada por um dos seguintes motivos:

Exemplos de cálculo de dimensionamento do sistema de drenagem subsuperficial

Para consolidação dos conceitos e procedimentos mostrados nos capítulos anteriores são apresentados a seguir fluxogramas dos parâmetros de projeto envolvidos e exemplos numéricos de cálculo de dimensionamento.

Especificamente para o critério de Cedergren, é apresentado um roteiro prático para dimensionamento, que pode ser empregado para regiões em que a precipitação de projeto se situa por volta de 40 mm/h, como é o caso da Região Metropolitana de São Paulo.

8.1 Método de Cedergren

8.1.1 Fluxograma de dimensionamento

Na sequência, a Fig. 8.1 apresenta um fluxograma com os parâmetros de projeto e a principal formulação utilizada.

8.1.2 Exemplo de cálculo

Aplicação em pavimento de concreto de cimento Portland

Considerando impossível a perfeita impermeabilização do pavimento rígido, a concepção proposta por Cedergren preconiza uma camada drenante no pacote estrutural e uma linha de drenos longitudinais que serão responsáveis pelo encaminhamento e retirada das águas, garantindo o bom comportamento dos materiais das camadas subjacentes, suscetíveis à ação da água por saturação.

Para uma rodovia de pistas divididas com duas faixas de tráfego por sentido, com declividade transversal de 2% em tangente e declividade longitudinal de 1%, tem-se, conforme Fig. 8.2:

Drenagem subsuperficial de pavimentos

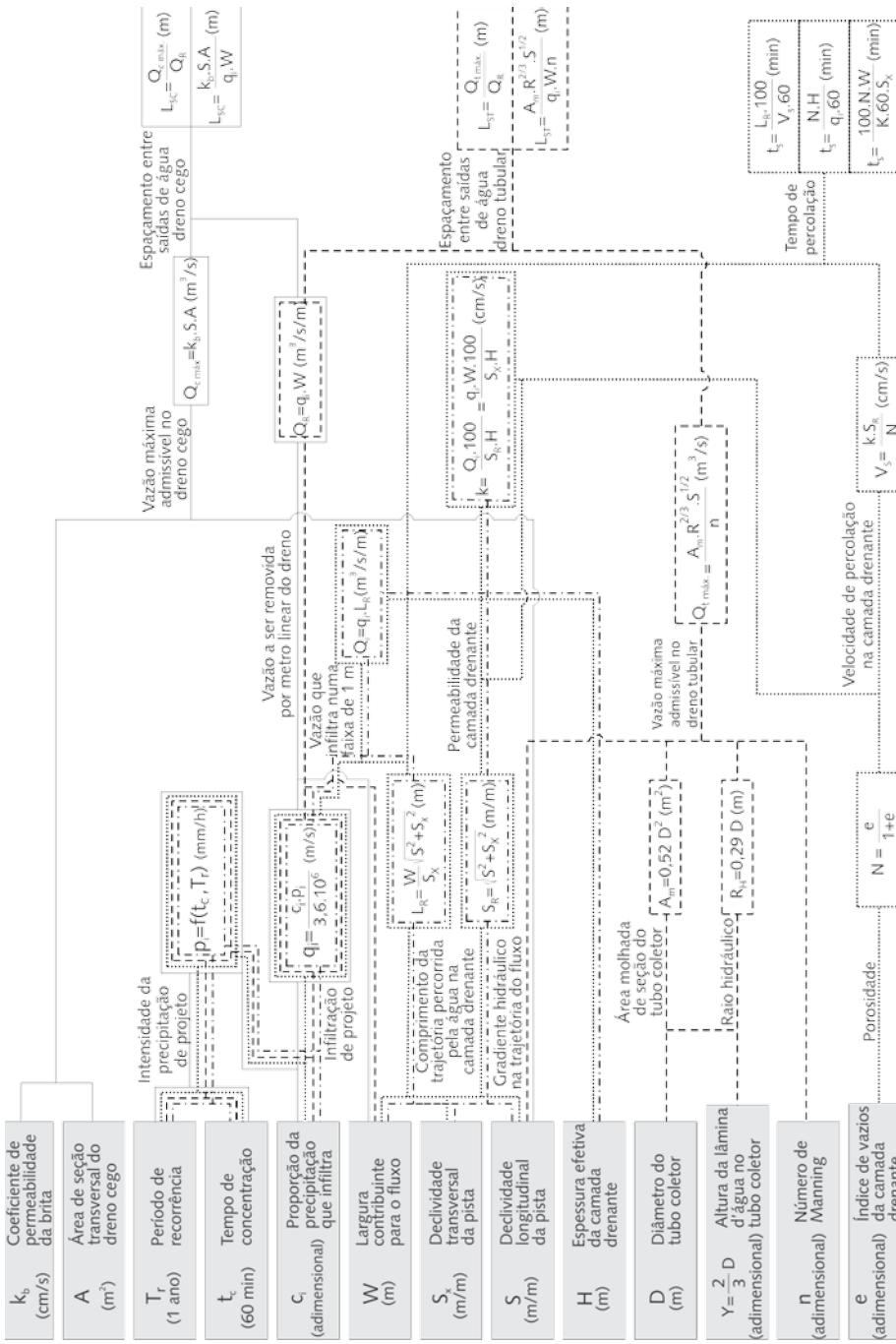


Fig. 8.1 Fluxograma de dimensionamento – método de Cedergren

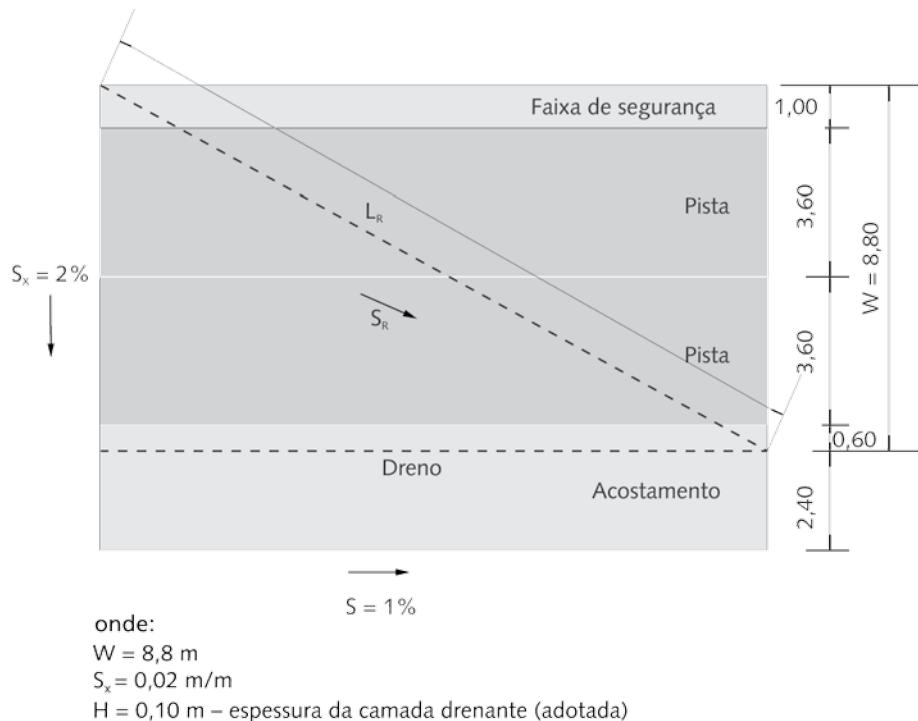


Fig. 8.2 Ilustração de rodovia com dreno

Cálculo da infiltração de projeto

- ◆ Índice pluviométrico
- ◆ Equação de chuva
- ◆ Período de retorno, $T_r = 1 \text{ ano}$
- ◆ Tempo de concentração, $t_c = 1 \text{ hora}$
- ◆ $p_i = 40 \text{ mm/h}$
- ◆ Coeficiente de infiltração, $c_i = 0,50$

$$q_i = c_i \cdot p_i = 40 \cdot 0,50 \cdot \frac{1}{3,6 \cdot 10^4} = 5,56 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

Cálculo da permeabilidade necessária

$$k = \frac{q_i \cdot W}{H \cdot S_x} = \frac{5,56 \cdot 10^{-4} \cdot 8,8 \cdot 10^2}{10 \cdot 0,02} = 2,44 \text{ cm/s}$$

A camada permeável com 10 cm de espessura efetiva (H) deverá ter coeficiente de permeabilidade (k) da ordem de 2,44 cm/s. Lembre-se de

ANEXO – TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

Conversões aproximadas para as unidades do SI:

Multiplicar	Por	Para obter
polegada	25,4	mm
pés	0,3048	m
pés ²	0,0929	m ²
pés ³	0,0283	m ³
m ³	1.000	litros
pés ³ /dia	3,277 . 10 ⁻⁷	m ³ /s
pés ³ /dia/pés	1,075 . 10 ⁻⁶	m ³ /s/m
pés ³ /dia/pés ²	3,528 . 10 ⁻⁶	m ³ /s/m ²
pés ³ /dia	3,277 . 10 ⁻⁴	litros/s
pés/dia	3,528 . 10 ⁻⁴	cm/s
cm/s	864	m/dia
libra/pés ³	0,1571	kN/m ³
libra/pés ²	0,0479	kN/m ²
libra/polegada ²	6,895	kN/m ²

Conversões aproximadas para as unidades do Sistema Métrico

Multiplicar	Por	Para obter
mm	0,0394	polegada
m	3,2808	pés
m ²	10,7639	pés ²
m ³	35,3147	pés ³
litros	0,001	m ³
m ³ /s	3,05 . 10 ⁶	pés ³ /dia
m ³ /s/m	9,30 . 10 ⁶	pés ³ /dia/pés
m ³ /s/m ²	2,8345 . 10 ⁵	pés ³ /dia/pés ²
litros/s	3.051,572	pés ³ /dia
cm/s	2.834,467	pés/dia
m/dia	0,0012	cm/s
kN/m ³	6,3654	libra/pés ³
kN/m ²	20,8856	libra/pés ²
kN/m ²	0,1450	libra/pés ²