

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Edmir José dos Santos Júnior

Estudo da Drenagem Subsuperficial e Subterrânea de Sítios
Aeroportuários

Trabalho de Graduação
2013

Civil

Edmir José dos Santos Júnior

**Estudo da Drenagem Subsuperficial e Subterrânea
de Sítios Aeroportuários**

Orientadora

Profa. Dra. Íria Fernandes Vendrame (ITA)

Co-orientador

Ten. Cel. Steven Meier (V COMAR)

Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Santos Júnior, Edmir J.

Estudo da Drenagem Subsuperficial e Subterrânea de Sítios Aeroportuários / Edmir José dos Santos Júnior.

São José dos Campos, 2013.

92 f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.
Orientadora: Profa. Dra. Íria Fernandes Vendrame.

1. Drenagem 2. Aeroportos 3. Rodovias 4 Subsuperficiais 5 Permeabilidade 6 Porosidade 7 Planejamento de aeroportos 8 Engenharia civil I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II.Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS JÚNIOR, Edmir J. **Estudo da Drenagem Subsuperficial e Subterrânea em Sítios Aeroportuários**. 2013. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Edmir José dos Santos Júnior

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo da Drenagem Subsuperficial e Subterrânea de Sítios Aeroportuários

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2013

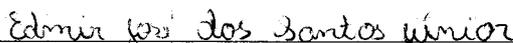
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Edmir José dos Santos Júnior
Edmir José dos Santos Júnior

Rua Jesus Ramos Moreira, nº 102 – Vale das Palmeiras
CEP 35701-176 – Sete Lagoas – MG

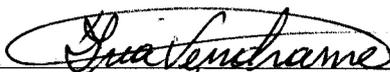
ESTUDO DA DRENAGEM SUBSUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA DE SÍTIOS AEROPORTUÁRIOS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



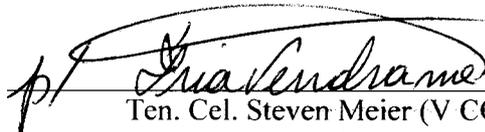
Edmir José dos Santos Júnior

Autor



Profª. Dra. Iria Fernandes Vendrame (ITA)

Orientadora



Ten. Cel. Steven Meier (V COMAR)

Co-orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 24 de novembro de 2013

Dedico este trabalho ao meu avô,
José Antônio Duarte Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças mesmo nas horas difíceis e permitiu que eu chegasse até aqui. Agradeço também à minha família, alicerce de tudo. Agradeço a Aline, minha companheira, sempre disposta a me ajudar e sempre com as palavras certas nas horas certas.

À Força Aérea Brasileira, pela disponibilidade de recursos e por permitir o enriquecimento do trabalho.

À minha orientadora, Prof. Dr. Iria Fernandes Vendrame, pelo auxílio prestado e pelo conhecimento passado.

Aos Professores do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, em especial aos da divisão de Engenharia Civil-Aeronáutica, que dia-a-dia lutam para manter a instituição entre as melhores do Brasil.

“Cada degrau que se sobe,
houve alguém para lhe dar a mão.”

Edmar Antônio da Silva

RESUMO

Os sistemas de drenagem são uma importante etapa no dimensionamento da estrutura de um pavimento, seja ele rodoviário ou aeroportuário. Em particular, os sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea reduzem as quantidades de água que atingem a estrutura da via. Vários problemas, decorrentes da umidade excessiva das camadas granulares, fazem com que a via de tráfego reduza seu nível de serviço e muitas vezes perca sua serventia. O benefício de tais sistemas muitas vezes não é percebido em pavimentos recém-construídos. Entretanto, quando há a necessidade de uma intervenção na estrutura, esta muitas vezes se torna economicamente inviável simplesmente pela falta de um sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea.

Baseando-se nesses argumentos, o presente trabalho realiza um estudo dos sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea. Inicialmente faz-se uma revisão bibliográfica, diretamente voltada ao movimento de fluidos em solos, pois, no dimensionamento da camada drenante, características como porosidade efetiva e permeabilidade são cruciais nas definições de que material utilizar e qual espessura adotar. São descritos ensaios de laboratório e de campo, a fim de se determinar essas grandezas utilizando não apenas equações empíricas.

Definidas as grandezas necessárias, realiza-se o passo a passo para o dimensionamento dos sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea, baseando-se nas diretrizes do Apêndice G do Advisory Circular 150/5320-5C, modificação 1, da Federal Aviation Administration (FAA, 2009).

Por fim, aplicam-se os critérios definidos anteriormente para dimensionamento da drenagem subsuperficial num estudo de caso, utilizando para isso alguns dos parâmetros do Aeroporto Internacional Salgado Filho, situado em Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: Drenagem, Aeroportos, Rodovias, Subsúperfcies, Permeabilidade, Porosidade, Planejamento de aeroportos, Engenharia civil.

ABSTRACT

Drainage systems are an important step in the design of a pavement structure, whether for roads or airports. In particular, subsurface and groundwater drainage systems reduce the amount of water that reaches the track structure. Several problems arising from excessive moisture of granular layers can make the traffic lanes reduce their level of service and often lose their usefulness. The benefit of such systems is usually not perceived in newly constructed pavements. However, when there is the need to intervene on the structure, it often becomes economically impractical simply by the lack of a system for subsurface drainage and groundwater.

Based on these topics, this work makes a study of subsurface and groundwater drainage systems. Initially it is presented a literature review, directly facing the movement of fluids in soils, therefore, in the design of drainage layer characteristics such as effective porosity and permeability that are crucial in the definitions of what material to use and what thickness adopt. Laboratory and field tests are described, in order to determine these quantities not only using empirical equations.

Once the quantities needed are defined, the step by step for the design of subsurface and groundwater drainage systems is showed, based on the guidelines of Appendix G of the Advisory Circular 150/5320-5C , modification 1, the Federal Aviation Administration (FAA 2009).

Finally, the criteria defined previously are applied to dimension the subsurface drainage system in a case study, using for this purpose some of the parameters of the Salgado Filho International Airport, located in Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Keywords: Drainage, Airports, Highways, Subsurface, Permeability, Porosity, Airports planning, Civil Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Origem das águas livres na estrutura do pavimento (Pereira, 2003)	21
Figura 2 – Ação da água livre em estruturas de pavimentos de concreto asfáltico sob carregamento dinâmico (Cedergreen, 1980, modificada por Azevedo, 2007).....	23
Figura 3 – Ação da água livre em estruturas de pavimentos de concreto de cimento Portland sob carregamento dinâmico (Cedergreen, 1980, modificada por Azevedo, 2007)	23
Figura 4 – Curva de distribuição granulométrica de uma amostra de areia	30
Figura 5 – Permeâmetro de carga constante	36
Figura 6 – Permeâmetro de carga variável	37
Figura 7 – Ensaio de tubo aberto para determinação da permeabilidade do solo em campo ...	38
Figura 8 – Ensaio de tubo aberto com carga constante para o cálculo da permeabilidade do solo em campo	40
Figura 9 – Dados de Teste de Permeabilidade (Lambe e Whitman, 1979)	43
Figura 10 – Geometria do Pavimento para cálculo de tempo de drenagem (FAA, 2009)	49
Figura 11 – Rebaixamento do lençol freático (DNIT, 2006)	65
Figura 12 – Visão em planta do sistema de drenagem subterrânea.....	67
Figura 13 – Detalhe do dreno subterrâneo interior típico de pavimento rígido (FAA, 2009, adaptada).....	69
Figura 14 – Detalhe do dreno subterrâneo de borda típico de pavimento rígido (FAA, 2009, adaptada).....	70
Figura 15 – Detalhe do dreno subterrâneo interior típico de pavimento flexível (FAA, 2009, adaptada).....	70
Figura 16 – Detalhe do dreno subterrâneo de borda típico de pavimento flexível (FAA, 2009, adaptada).....	71
Figura 17 – Desenho esquemático do sistema de saída dupla (FAA, 2009, adaptada)	74
Figura 18 – Ilustração de curvas de grande raio recomendado para saídas de drenagem (FAA, 2009, adaptada).....	74

Figura 19 – Detalhe da saída de drenagem recomendada (FAA, 2009, adaptada).....	74
Figura 20 – Exemplo de projeto para um headwall (FAA, 2009, adaptada).....	75
Figura 21 – Aeroporto Internacional Salgado Filho (Borges, 2012).....	76
Figura 22 – Folha 1 da carta ADC do Aeroporto Internacional Salgado Filho.....	80
Figura 23 – Folha 2 da carta ADC do Aeroporto Internacional Salgado Filho.....	81
Figura 24 – Mapa pedológico da região de Porto Alegre num raio de 80 km a partir do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Folha SH 22 Porto Alegre, volume 33, 1980).....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação quanto ao tamanho das partículas do solo	29
Tabela 2 – Coeficientes de permeabilidade para areia e cascalho.....	43
Tabela 3 – Granulometrias e classificação de materiais utilizados nas camadas de drenagem	62
Tabela 4 – Propriedades e classificação de materiais utilizados nas camadas de drenagem....	62
Tabela 5 – Granulometria de materiais testados para potencialmente serem utilizados em camadas de drenagem.....	63
Tabela 6 – Critérios para a granulometria da camada de separação.....	63
Tabela 7 – Critérios para o geotêxtil utilizado como camada de separação.....	64
Tabela 8 – Coeficiente de rugosidade de Manning para diferentes tipos de tubos	68
Tabela 9 – Critérios para os geotêxteis utilizados na construção das valas	72
Tabela 10 – Composição granulométrica para o solo PEa	85
Tabela 11 – Composição granulométrica para o solo PVd	85
Tabela 12 – Composição granulométrica para o solo PBPe.....	85
Tabela 13 – Composição granulométrica para o solo PVa.....	86
Tabela 14 – Composição granulométrica para o solo TRe.....	86
Tabela 15 – Porosidades efetivas para diferentes valores de espessura da camada drenante ..	87

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

FAA – Federal Aviation Administration

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CCP – Concreto de Cimento Portland

ICAO – International Civil Aviation Organization

CA – Concreto Asfáltico

SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos

ATR – Afundamentos em Trilha de Roda

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

MIT – Massachusetts Institute of Technology

USDA – United States of Agriculture

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

USACE – United States Army Corps of Engineers

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBR – California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)

RDM – Material de Drenagem Rápida

OGM – Material de Graduação Aberta

AOS – Tamanho de Abertura Aparente

ASTM – American Society for Testing and Materials

INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária

DISME – Distrito de Meteorologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	DANOS CAUSADOS PELA ÁGUA NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO	18
2.1	Problemas do excesso de água na superfície	19
2.2	Problemas do excesso de água de infiltração	20
2.2.1	Porosidade elevada	21
2.2.2	Perda de suporte e expansão dos materiais granulares	24
2.2.3	Empenamento da placa em pavimentos rígidos	25
2.3	Problemas na Gerência de Pavimentos	26
2.4	Minimização dos problemas relativos à drenagem	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	Composição do Solo.....	28
3.1.1	Formação e Classificação dos Solos.....	28
3.1.2	Propriedades físicas do solo	31
3.1.2.1	Teor de umidade do solo	31
3.1.2.2	Peso específico aparente do solo	31
3.1.2.3	Índice de vazios	32
3.1.2.4	Porosidade	32
3.1.2.5	Grau de saturação do solo.....	33
3.1.3	Água contida no solo	33
3.2	Interação entre água e solo	33
3.2.1	Lei de Darcy	34
3.2.2	Determinação do coeficiente de permeabilidade.....	34
3.2.2.1	Determinação em laboratório do coeficiente de permeabilidade.....	35
a.	Permeâmetro de carga constante	35
b.	Permeâmetro de carga variável.....	36
3.2.2.2	Determinação em campo do coeficiente de permeabilidade	38

4 MANUAL DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS 40

4.1 Princípios da drenagem de pavimentos.....	41
4.1.1 Fluxo de água através do solo.....	41
4.1.2 Fatores que afetam a permeabilidade	41
4.1.2.1 Coeficiente de permeabilidade	41
4.1.2.2 Efeito do fluido nos poros e da temperatura na permeabilidade.....	42
4.1.2.3 Efeito da granulometria e do índice de vazios na permeabilidade	42
4.1.2.4 Efeito da estrutura e da estratificação na permeabilidade.....	45
4.1.3 Quantidade e taxa de escoamento subsuperficial e subterrâneo.....	46
4.1.3.1 Efeitos da superfície do pavimento e da precipitação.....	46
4.1.3.2 Capacidade da camada de drenagem	47
4.1.3.3 Tempo de drenagem	48
4.1.3.4 Comprimento e inclinação do caminho de drenagem.....	49
4.1.3.5 Taxa de fluxo	50
4.1.4 Utilização das camadas de drenagem	50
4.1.4.1 Propósito.....	50
4.1.4.2 Instalação.....	50
4.1.4.3 Condições de permeabilidade	50
4.1.5 Utilização de filtros	51
4.1.5.1 Propósito.....	51
4.1.5.2 Requisitos para evitar o bombeamento.....	51
4.1.5.3 Requisitos de permeabilidade	52
4.1.6 Utilização das camadas de separação	52
4.1.6.1 Finalidade	52
4.1.6.2 Requisitos	52
4.1.7 Utilização de geotêxteis.....	53
4.1.7.1 Propósito.....	53
4.1.7.2 Requisitos de geotêxteis para filtros	53
4.1.7.3 Requisitos de geotêxteis para camada de separação.....	54
4.2 Projeto do sistema de drenagem subsuperficial	54
4.2.1 Métodos	54
4.2.2 Pré-requisitos de projeto.....	55
4.2.2.1 Condições ambientais	55

4.2.2.2	Propriedades dos solos	56
4.2.2.3	Fonte de dados	56
4.2.3	Crêterios para o sistema de drenagem subsuperficial	57
4.2.3.1	Necessidade do sistema	57
4.2.3.2	Entrada de �gua	57
4.2.3.3	Comprimento e inclina�o do caminho de drenagem	58
4.2.3.4	Espessura da camada de drenagem	58
4.2.3.5	Crêterios de drenagem	59
4.2.4	Localiza�o dos sistemas de drenagem subsuperficial	60
4.2.4.1	Pavimentos rígidos	60
4.2.4.2	Pavimentos flexíveis	60
4.2.4.3	Camada de separa�o	60
4.2.5	Propriedades dos materiais	61
4.2.5.1	Camadas de drenagem	61
4.2.5.2	Materiais para a camada de separa�o	63
4.2.5.3	Geotêxtil para a camada de separa�o	64
4.3	Drenos Coletores Profundos	64
4.3.1	Propósito	64
4.3.2	Vazão de projeto	64
4.3.2.1	água proveniente da camada drenante	65
4.3.2.2	água proveniente do rebaixamento do lençol freático	65
4.3.3	Projeto de Drenos Coletores	66
4.3.3.1	Traçado do sistema de drenagem subterrânea	66
4.3.3.2	Materiais do sistema coletor	67
4.3.3.3	Tamanho e inclina�o do tubo coletor	68
4.3.3.4	Instala�o da camada de drenagem e do dreno coletor	69
4.3.3.5	Reaterro	71
4.3.3.6	Geotêxteis nas valas	71
4.3.3.7	Cobertura da vala	72
4.3.4	Saídas laterais	72
4.3.4.1	Projeto	72
4.3.4.2	Emissário para tubo de saída	73

5	ESTUDO DE CASO.....	76
5.1	Precipitação.....	77
5.2	Infiltração.....	78
5.3	Grandezas Geométricas	79
5.4	Espessura da camada drenante e material utilizado.....	82
5.5	Verificação para o tempo de drenagem.....	87
6	RECOMENDAÇÕES	88
7	CONCLUSÃO	89
8	BIBLIOGRAFIA.....	90

1 INTRODUÇÃO

A drenagem dos pavimentos é uma das importantes etapas no dimensionamento tanto de rodovias quanto de aeroportos. Diversas pesquisas indicam que desde o século XIX, projetistas rodoviários já haviam constatado que a água em excesso na estrutura do pavimento reduzia sua vida útil, processo verificado pelo acelerado surgimento de defeitos estruturais e funcionais em pavimentos não providos de sistema de drenagem.

Com a evolução das ideias de se tentar ao máximo eliminar a água da estrutura dos pavimentos, vários métodos de drenagem foram criados pelos engenheiros. Atualmente, existem três tipos de drenagem de pavimentos: superficial, subsuperficial e subterrânea.

A drenagem superficial visa eliminar a água existente na superfície, devido principalmente às precipitações. A drenagem subsuperficial visa eliminar a água existente imediatamente abaixo do revestimento, devido principalmente às infiltrações e à ascensão capilar. A drenagem subterrânea visa abaixar lençóis freáticos elevados e desviar possíveis fluxos de água.

O presente trabalho visa analisar a importância das drenagens subsuperficiais e subterrâneas na estrutura de pavimentos aeroportuários, tanto rígidos quanto flexíveis, criar um Manual de Drenagem Subsuperficial e Subterrânea para pistas de aeroportos, baseado nas diretrizes do Apêndice G do Advisory Circular 150/5320-5C, modificação 1, da Federal Aviation Administration (FAA, 2009) e também analisar um estudo de caso para aplicação prática do dimensionamento de drenagem subsuperficial.

2 DANOS CAUSADOS PELA ÁGUA NA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

A estrutura de um pavimento aeroportuário é composta, basicamente, pelo revestimento, podendo ser de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) ou de concreto de cimento Portland (CCP), base normalmente granular, logo abaixo do revestimento, sub-base, eventualmente um reforço para o subleito e o subleito. O revestimento do pavimento tem as funções de reduzir as solicitações de carga que

alcançam a base e de fornecer atrito suficiente para que as aeronaves consigam trafegar de forma segura na via. A base e a sub-base tem a função principal de reduzir as cargas de solicitação que chegam ao subleito, impedindo que deformações plásticas excessivas alcancem essa estrutura, que normalmente tem resistência mais baixa que as demais camadas.

O controle tecnológico existente na construção da estrutura de um pavimento visa deixá-lo o mais selado possível, ou seja, livre da presença indesejada de água em excesso, pois a compactação das camadas é feita numa determinada umidade, denominada umidade ótima. Portanto, qualquer alteração da quantidade de água presente na estrutura pode comprometê-la a ponto de causar deformações e trincamentos capazes de inutilizá-la.

As águas que atingem o pavimento podem prejudicar sua utilidade e causar problemas tanto por estar em excesso na superfície quanto por estar em excesso nas camadas abaixo da superfície. A seguir, serão descritos os problemas originados do excesso de água em cada uma dessas situações.

2.1 Problemas do excesso de água na superfície

Quando se pensa nos danos que a água livre pode causar num pavimento a primeira ideia que se tem é em relação à aquaplanagem. A presença de lâmina d'água nas pistas de pouso e decolagem podem representar riscos à segurança nos aeródromos. A International Civil Aviation Organization (ICAO) estabelece, no item 2.4 da parte 2 do documento 9137 que medidas corretivas de manutenção devem ser realizadas sempre que se verificar depressões na pista de pouso e decolagem que permitam empoçamento de água com lâmina superior a 3 mm de espessura, denominada pela ICAO (2002) de espessura crítica de hidroplanagem. O fenômeno da hidroplanagem consiste na diminuição do coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento numa das rodas do trem de pouso, gerando um torque resultante que faz com que a aeronave gire e perca a direção.

Outro problema que o excesso de água na superfície pode causar na estrutura do pavimento ocorre quando esse pavimento já se encontra com trincas excessivas, sobretudo as do tipo panela. A força mecânica da precipitação intensifica os processos de trincamentos e formação de panelas, causando, muitas vezes, o esborcinamento do revestimento e a conseqüente perda de sua serventia.

2.2 Problemas do excesso de água de infiltração

Os pavimentos são estruturas que normalmente apresentam grandes áreas superficiais expostas às intempéries e à solitação do tráfego. As ações combinadas de mudanças de temperatura, de precipitações e de solitação pelo tráfego causam ações danosas à sua estrutura. Algumas dessas ações são mais intensificadas quando há a presença de água em excesso nos espaços entre as camadas ou mesmo nos poros dessas camadas. Essa água em excesso pode se originar de várias fontes, dentre elas:

- infiltração através de superfícies permeáveis, juntas, trincas ou fissuras;
- infiltração lateral de águas acumuladas;
- fluxos de água ascendente, proveniente de lençol freático elevado, nascentes e enchente de rios;
- sucção capilar;
- condensação de vapor d'água, como resultado das variações de temperatura e da pressão atmosférica.

Moulton (1980) diz que o montante de água proveniente da condensação do vapor d'água disperso na estrutura do pavimento é desprezível quando comparada com a oriunda das demais fontes. Essas, por sua vez, fornecem volumes suficientes para gerar água livre no interior da estrutura dos pavimentos. O movimento dessas águas livres nos poros do solo seguem as leis da Hidráulica.

Ainda segundo Moulton (1980), são as águas livres as responsáveis pela degradação da estrutura do pavimento, relacionadas à variação do teor de umidade. Entretanto, de acordo com Cedergreen (1980), a razão completa da deterioração e falência dos pavimentos é muito complexa, pois muitos fatores colaboram para isso. Mesmo assim, algumas dessas ações são intensificadas quando há água em excesso nos espaços entre camadas do pavimento ou nos poros dessas camadas. Durante os primeiros anos da vida do pavimento, é possível que os efeitos prejudiciais da água livre não sejam notados. A Figura 1 apresenta as origens das águas livres na estrutura do pavimento.

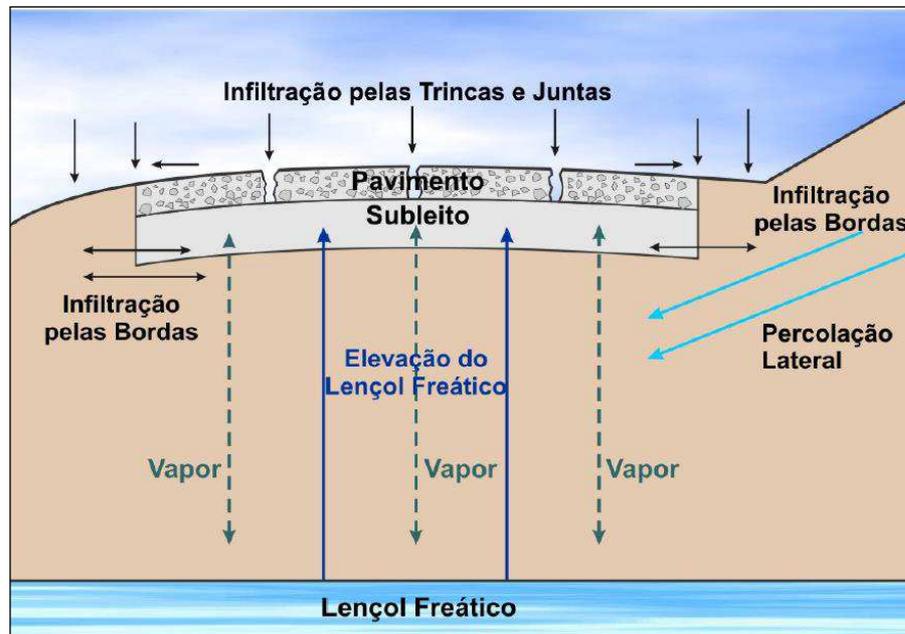


Figura 1 – Origem das águas livres na estrutura do pavimento (Pereira, 2003)

Em função da intensidade dos danos causados às estruturas dos pavimentos associados a falhas no sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea, realizaram-se uma grande quantidade de estudos e investigações sobre os mecanismos de deterioração e falência dos pavimentos originados dessa causa. Os principais mecanismos estudados são:

- bombeamento de finos, devido à poro pressão elevada gerada pelo tráfego;
- redução da capacidade de suporte de materiais não estabilizados da estrutura do pavimento;
- comportamento insatisfatório de solos expansivos devido à presença de água;
- empenamento da placa de concreto em pavimento rígidos.

Esses mecanismos de deterioração dos pavimentos estão interligados entre si, ou seja, muitas vezes mais de um desses problemas aparecem na estrutura do pavimento e a causa de um deles é a existência de outros. A seguir, será detalhado separadamente cada um desses problemas.

2.2.1 Poro pressão elevada

As pressões de bombeamento que aparecem no interior do pavimento quando solicitado por cargas dinâmicas constituem um mecanismo causador de danos à sua estrutura. Em relação a esse dano, Cedergreen (1980) escreve que:

“A 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 na serventia do pavimento. Quando a água livre preenche completamente essas camadas, e também os vazios das aberturas nos limites entre as camadas, as rodas pesadas, aplicadas às superfícies destes pavimentos, produzem impactos sobre a água que são comparados a uma ação do tipo golpe de aríete. As ações da água podem desintegrar bases estabilizadas com cimento, enfraquecer bases granulares pelo rearranjo da estrutura interna dos materiais de granulometria fina das misturas de agregados, sobrecarregar subleitos, onde as espessuras totais forem inadequadas, e causar diversas ações prejudiciais.”

O fenômeno citado por Cedergreen (1980) consiste na transição de um determinado regime de escoamento para outro. Essa transição é acompanhada de ondas de pressão, sendo um caso particular dos fenômenos transitórios aplicados a condutos fechados. Além disso, aplica-se também a esse fenômeno o princípio de Pascal, que diz que uma pressão aplicada a um fluido confinado é igualmente transmitida por todos os pontos do fluido.

Em pavimentos que apresentam trincas, a cada impacto das rodas do tráfego, há um aumento da poro pressão da água livre nas camadas abaixo do revestimento. Essas poro pressões elevadas provocam o bombeamento de finos através das trincas da superfície do pavimento, conforme apresentado nas Figuras 2 e 3.

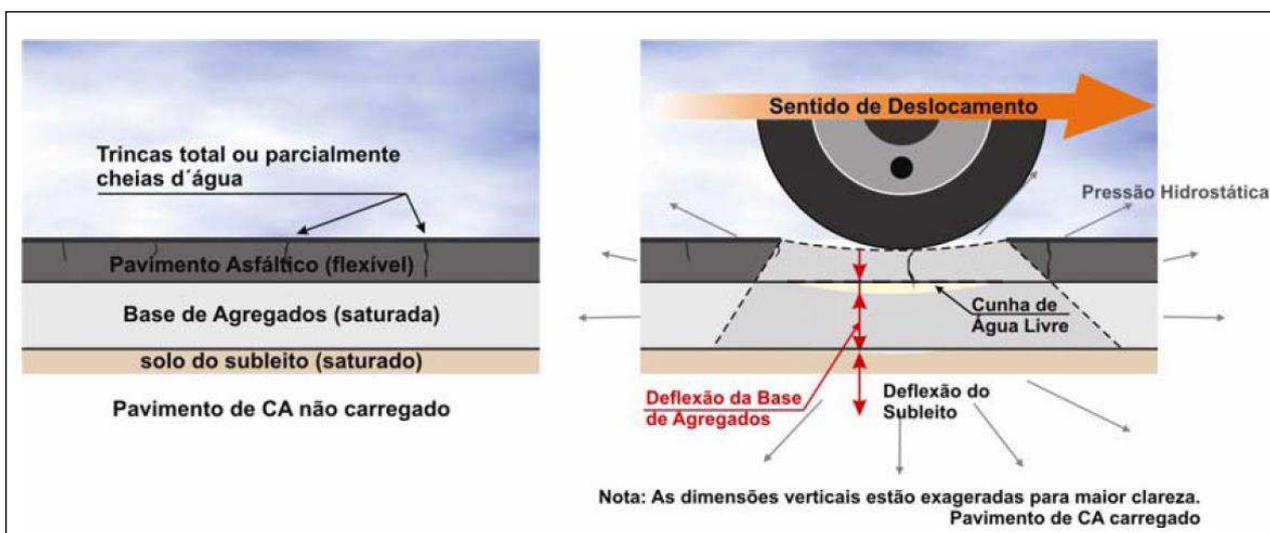


Figura 2 – Ação da água livre em estruturas de pavimentos de concreto asfáltico sob carregamento dinâmico (Cedergreen, 1980, modificada por Azevedo, 2007)

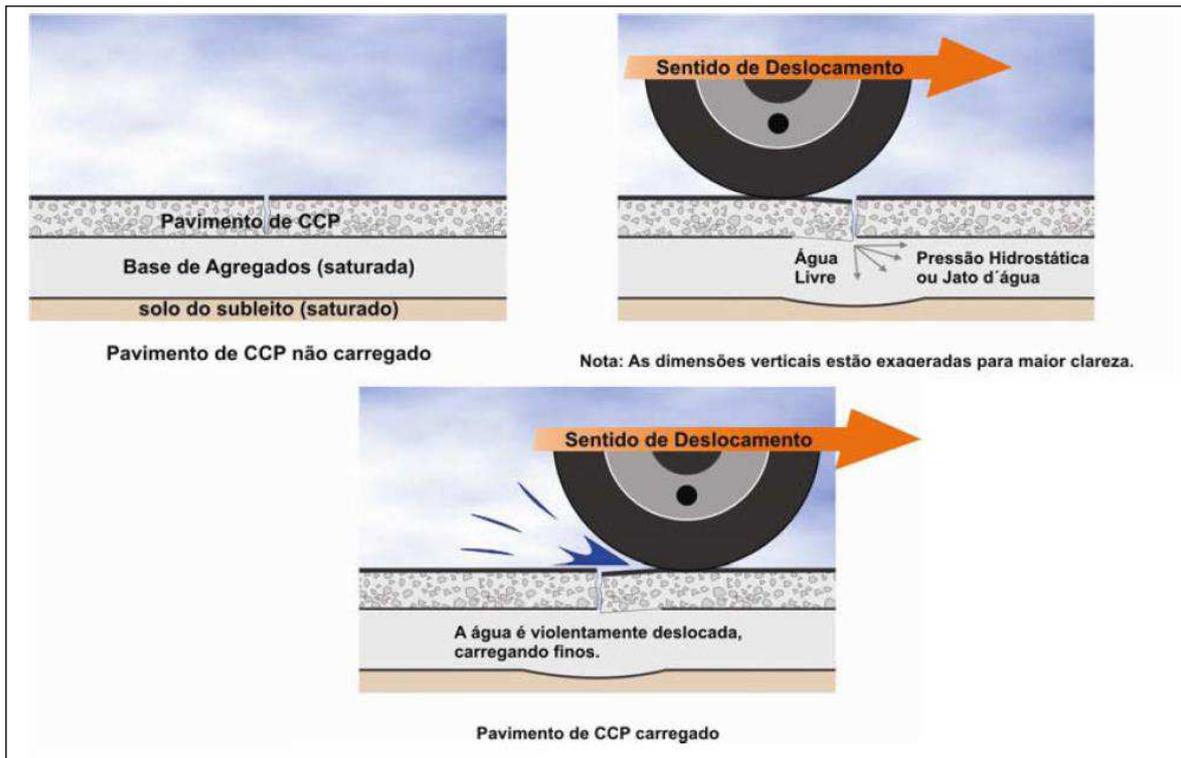


Figura 3 – Ação da água livre em estruturas de pavimentos de concreto de cimento Portland sob carregamento dinâmico (Cedergreen, 1980, modificada por Azevedo, 2007)

Devido às trincas transversais e longitudinais, o efeito do bombeamento se apresenta mais característico nos pavimentos rígidos, mas ocorrem também nos pavimentos flexíveis, sobretudo quando as trincas atingem um estado avançado. Observa-se que esse fenômeno se autoalimenta, uma vez que os finos bombeados ocupam os vazios das trincas existentes, impedindo o fenômeno da auto selagem em pavimentos flexíveis e aumentando, assim, a amplitude das fissuras.

Pode-se dizer, então, que a água livre serve como um meio para que a argila e outros finos sejam forçados para dentro das fissuras incipientes na parte inferior dos pavimentos de CA, evitando o autofechamento dessas fissuras. A água livre nos pavimentos de CA contribui, também, para o fissuramento do revestimento por retração, para a oxidação do material e pela perda da flexibilidade do mesmo, podendo levar ao trincamento e à deterioração geral dos revestimentos e bases estabilizadas.

De acordo com a FAA (2009):

“A água tem um efeito negativo sobre o desempenho do pavimento, principalmente pelo enfraquecimento dos materiais

subterrâneos e pela erosão desses devido ao livre movimento de água. Para pavimentos flexíveis, o enfraquecimento da base, sub-base, ou subleito quando saturado com água é uma das principais causas de falha do pavimento. Para pavimentos rígidos, a água livre, presa entre a superfície de concreto e a camada impermeável abaixo da superfície, move-se devido à pressão provocada por cargas no pavimento. Este movimento da água (denominado bombeamento) corrói o material subterrâneo, criando espaços vazios abaixo da superfície de concreto. A drenagem subterrânea mal projetada, ou mal executada, pode contribuir também para danos secundários, tais como fratura “D” (ou trinca de canto) ou expansão dos materiais do subsolo”.

Assim, tem-se como consequência da presença e atuação da poro pressão:

- o desarranjo da estrutura das camadas granulares;
- o bombeamento de finos e consequente desagregação e erosão das camadas granulares;
- abrasão das camadas cimentadas.

2.2.2 Perda de suporte e expansão dos materiais granulares

A redução da capacidade de suporte de uma estrutura de um pavimento é característica típica de materiais granulares. Há dois tipos básicos que justificam essa redução: o primeiro é a diminuição do atrito interno, pelo aumento da quantidade de fluido nos poros, que ocasiona um decréscimo da resistência ao cisalhamento, e o segundo é a expansão dos materiais susceptíveis a isso.

De acordo com Vargas (1978) apud Azevedo (2007), o aumento do volume de solos e sua consequente expansão ocorrem primeiramente devido à sucção da água para dentro dos poros e posteriormente por adsorção para o interior da estrutura cristalina dos grãos. O afastamento dos grãos devido à sucção da água ocasiona uma desestruturação interna da camada. Além disso, o solo é compactado numa umidade ótima, o que lhe confere uma resistência máxima naquele grau de compactação definido. Uma variação na umidade dessa camada é acompanhada de uma redução em sua capacidade de suporte, podendo gerar deformações plásticas excessivas na camada e uma consequente instabilidade do subleito, devido à solicitação de tráfego.

O aumento do teor de umidade nas camadas de base, sub-base e subleito provoca o aumento do efeito de lubrificação nos contatos entre as partículas constituintes dos materiais, provocando a redução do atrito interno e, conseqüentemente, a diminuição da resistência ao cisalhamento. Já a expansão, característica de materiais de granulometria fina, provoca o afastamento dos grãos, ocasionando o aparecimento de espaços intergranulares que são preenchidos pela água livre, tendo como consequência a desestruturação interna da camada. Uma vez que o teor de umidade retorna a valores próximos ao da umidade ótima, os vazios gerados na expansão, antes ocupados pela água, serão ocupados pelo ar, tornando o solo poroso. Assim, há uma redução na capacidade de suporte e no módulo de resiliência.

2.2.3 Empenamento da placa em pavimentos rígidos

O empenamento da placa de CCP utilizada em pavimentos rígidos não depende somente da umidade, mas depende também de aspectos relacionados à concepção do pavimento, como por exemplo, a presença de barras de transferência ou a própria espessura da placa. Conforme Janssen (1987) apud Azevedo (2007) o CCP, durante a contração devido à perda de umidade, não deve ser impedido de se movimentar, ou do contrário surgirão tensões de tração no concreto. Caso ocorra variação de umidade entre as faces inferior e superior da placa, pode ocorrer o empenamento dessa, devido às tensões de tração numa face e de compressão em outra. Além disso, a tendência das placas é de retrair a face superior, o que provoca o levantamento das bordas. Quando se utiliza barras de transferência esse fenômeno se torna menos intenso, porém, em pavimentos desprovidos das barras, as placas perdem o contato com a base nas bordas, gerando trinca de cantos ou mesmo o efeito da “placa bailarina”.

Juntamente a esses defeitos, o empenamento da placa pode resultar também numa intensificação do efeito do bombeamento de finos. Ao se descolar da base nas bordas, o espaço existente entre a placa e a base passa a ser ocupada pelas águas de infiltração e, durante a passagem de cargas de tráfego, ocorre o fenômeno da elevação das poro pressões na região, acarretando o carreamento de finos e a conseqüente perda de suporte da base.

2.3 Problemas na Gerência de Pavimentos

O Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é definido como sendo a determinação do momento mais eficaz, em termos econômicos, para se executar a restauração dos pavimentos de uma rede viária ou de um aeródromo. Sabe-se que todas as estruturas sofrem um processo gradual de deterioração, ou seja, devido a utilização, há uma perda gradual de sua serventia e do seu nível de serviço. No caso dos pavimentos, quando essa serventia atinge níveis não mais aceitáveis, é necessário que se faça uma análise dos problemas existentes e que se proponha uma solução para que o pavimento retorne aos níveis de serviço adequados.

Inicialmente, elabora-se um diagnóstico do pavimento, que consiste em esclarecer e compreender os mecanismos através dos quais sua deterioração vem se processando ao longo do tempo. Para isso, realiza-se uma análise dos efeitos das duas principais fontes de sollicitação mecânica: o clima, nas variações de temperatura e umidade, e a sollicitação do tráfego. Esses efeitos externos devem ser analisados de forma conjunta às condições inerentes do pavimento, que são: materiais utilizados, estrutura existente e sistemas de drenagem. Problemas como trincamento excessivo, afundamentos em trilha de roda (ATR), deformações plásticas excessivas ou desagregação superficial não devem ser analisados tomando como base apenas um dos elementos do pavimento, mas sim como sendo um conjunto de ações de deterioração, que se relacionam entre si. (Rodrigues, 2012)

Com relação, por exemplo, aos ATR, deve-se pesquisar, a princípio, a correlação com a deformação vertical de compressão no topo do subleito. Caso ela exista, há um indício forte de que o subleito está contribuindo de forma decisiva para a geração de afundamentos plásticos. A não existência dessa relação mostra que as deformações plásticas devem ter se acumulado preferencialmente nas outras camadas do pavimento, como a base e a sub-base, em decorrência, por exemplo, do seu enfraquecimento pela entrada de águas pluviais através das trincas. Ainda, não sendo verificada nenhuma deformação plástica nas camadas granulares, resta analisar a composição da mistura asfáltica. Uma dosagem excessiva do cimento asfáltico de petróleo (CAP) pode ocasionar um amolecimento do CBUQ, em pavimentos flexíveis, sendo gerados, por isso, os ATR. (Rodrigues, 2012)

Segundo Rodrigues (2012), uma análise relativa à desagregação superficial mostra que quando um pavimento asfáltico se encontra trincado, durante época de

chuvas intensas é comum se observar a abertura rápida de panelas nas áreas trincadas, decorrentes da ação do excesso de pressões neutras na água quando da passagem das cargas em movimento. Este tipo de defeito deve ser reparado imediatamente, por levar a situações de risco para o tráfego.

Verifica-se que, nos dois exemplos citados de análise dos problemas existentes em um pavimento, há a preocupação de manter a água livre fora de sua estrutura. Essa preocupação, segundo Rodrigues (2012) é, principalmente, porque quando o pavimento permaneceu trincado por um longo período de tempo e a entrada de água pelas trincas levou à formação de ATR, tende a ser necessária a reconstrução total ou parcial do pavimento, em virtude do comprometimento provável das camadas de base e sub-base. Essa reconstrução consiste na remoção, em determinados casos, até o nível do subleito, e reconstrução com um pavimento novo. Entretanto, se esse trincamento excessivo não vier acompanhado de ATR significativos, e a análise da estrutura do pavimento mostrar a existência de um eficiente sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea, que impeça as águas pluviais de atingirem as camadas de base e sub-base, uma alternativa de restauração do pavimento passa a ser uma simples fresagem, para eliminação das trincas, acompanhada de um recapeamento.

Dessa forma nota-se que a existência do sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea pode não ter efeito no início da utilização do pavimento. Assim, uma análise precoce da necessidade de sua existência pode gerar conclusões errôneas por parte dos engenheiros. Do exposto nesse item, fica claro que a existência de tal sistema é sentida pelo pavimento em longo prazo, quando da necessidade de sua restauração. Assim, inicialmente, pode-se ter um projeto mais caro, mas que, quando houver necessidade de intervenção, essa será menos robusta e, tornará o sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea economicamente viável.

2.4 Minimização dos problemas relativos à drenagem

Os problemas causados pela água livre na estrutura dos pavimentos podem ser a princípio, solucionadas por uma das seguintes formas:

- mantendo-se a água fora das estruturas dos pavimentos, através da impermeabilização;
- retirando-se de forma rápida e segura as águas que se infiltram no pavimento;

- dimensionando a estrutura do pavimento para resistir aos carregamentos dinâmicos e estáticos na presença de água em excesso.

Nota-se que, caso fosse aplicado alguma dessas soluções separadamente, os custos e/ou a robustez da estrutura a tornaria inviável. Sendo assim, o ideal é que se aplique uma combinação de cada uma dessas soluções apresentadas.

Portanto, para que o dimensionamento seja eficiente, o pavimento deve ser tão impermeável quanto possível, para que o volume de água que infiltre seja minimizado; deve propiciar, também, a rápida eliminação de água de infiltração, para que a estrutura seja solicitada por um tempo curto com taxas de umidades elevadas e as camadas de base, sub-base e subleito devem considerar a eficiência da camada drenante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de iniciar o processo de dimensionamento dos sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea, vê-se necessária a definição de alguns conceitos relativos aos solos e ao movimento de fluidos em solos. Essas definições são importantes para um entendimento mais claro dos requisitos impostos no Manual de Drenagem Subsuperficial e Subterrânea, descrito em 4.

3.1 Composição do Solo

3.1.1 Formação e Classificação dos Solos

Solos são materiais formados por um conjunto de partículas que resultam do intemperismo nas rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. O tamanho dessas partículas que compõem o solo tem uma ampla faixa de variação. Normalmente elas recebem o nome de pedregulho, areia, silte ou argila, dependendo do tamanho predominante numa amostra. Várias organizações definem uma variação de tamanho para cada uma dessas partículas. A Tabela 1 apresenta a definição de algumas dessas organizações para a dimensão das partículas constituintes do solo.

Tabela 1 – Classificação quanto ao tamanho das partículas do solo

Organização	Tamanho dos Grãos (mm)			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
MIT	> 2,000	2,000 – 0,060	0,060 – 0,002	< 0,002
USDA	> 2,000	2,000 – 0,050	0,050 – 0,002	< 0,002
AASHTO	76,200 – 2,000	2,000 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
USACE	76,200 – 4,750	4,750 – 0,075	< 0,075	
ABNT	76,000 – 4,800	4,800 – 0,050	0,050 – 0,005	< 0,005

A ciência que estuda os solos, sobretudo sua formação e classificação, recebe o nome de Pedologia. Existem várias classificações para os solos, pois vários são os parâmetros relacionados aos materiais. Quando se deseja, por exemplo, utilizar o solo para a agricultura, pode-se classificá-lo de acordo com sua fertilidade, enquanto que se a designação for para fins de pavimentação, uma classificação estrutural, de acordo com a resistência do solo, deve ser mais viável.

Um importante estudo que se faz do solo é a sua análise granulométrica. Ela consiste na determinação da faixa de tamanho das partículas presentes nele, expresso como uma porcentagem do peso total seco da amostra analisada. Para a determinação da faixa granulométrica realiza-se o ensaio de peneiramento, que consiste em agitar uma amostra de solo por um conjunto de peneiras que tenham aberturas progressivamente menores. A NBR 7181:1984 detalha o procedimento para realizar a análise granulométrica em solos.

Depois de realizado o ensaio, constrói-se a curva de distribuição granulométrica, que representa, sobre o eixo das abscissas, de forma logarítmica, as dimensões das partículas e sobre o eixo das ordenadas as porcentagens, em peso, do material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada. A Figura 4 apresenta uma curva granulométrica típica de uma amostra de areia.

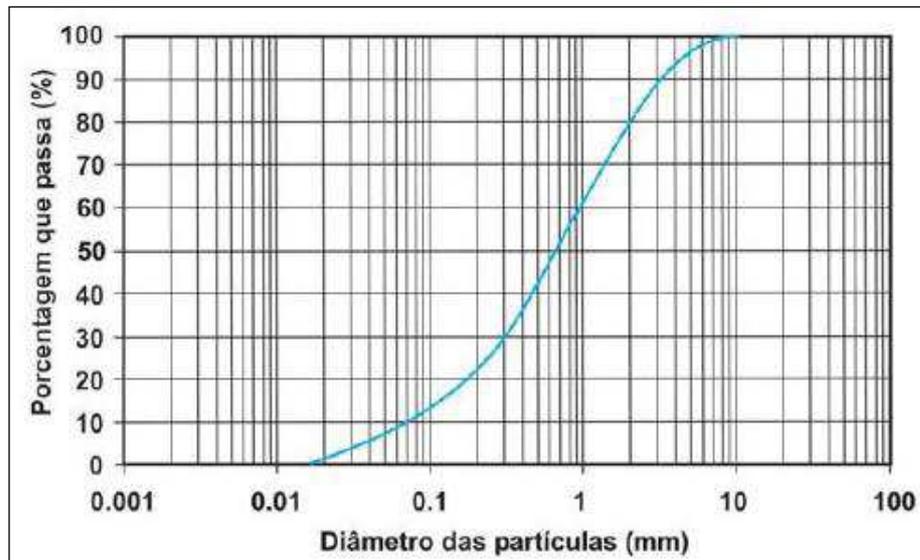


Figura 4 – Curva de distribuição granulométrica de uma amostra de areia

A curva de distribuição granulométrica pode ser utilizada para definir três parâmetros do solo importantes para a engenharia. São eles:

1. Diâmetro efetivo das partículas de Hazen: é o diâmetro correspondente a 10% em peso total, de todas as partículas menores que ele, ou seja, é o diâmetro médio das partículas correspondentes aos 10% mais finos. Essa grandeza é uma boa medida para estimar o coeficiente de permeabilidade de um solo. Normalmente é representado como D_{10} ou D_{ef} .
2. Coeficiente de uniformidade: é a razão entre os diâmetros correspondentes aos 60% mais finos e aos 10% mais finos, ou seja

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Essa relação, apesar do nome, indica na verdade a falta de uniformidade, pois quanto mais uniforme o material, menor é o valor de C_u .

3. Coeficiente de curvatura: é definido pela equação 2.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

em que D_{30} é o diâmetro correspondente aos 30% mais finos. Para solos bem graduados, o valor do coeficiente de curvatura está compreendido entre 1 e 3.

A composição granulométrica do solo, ou seja, as porcentagens de pedregulho, areia, silte e argila, podem ser estimadas a partir da curva de distribuição granulométrica. Basta, para isso, analisar as aberturas das peneiras e as porcentagens passantes nessas peneiras com o tamanho dos grãos.

3.1.2 Propriedades físicas do solo

Outras grandezas do solo são importantes para se entender os requisitos existentes no dimensionamento do sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea de pavimentos. Essas grandezas normalmente são conhecidas como índices físicos e se baseiam no sistema constituinte da estrutura do solo, formado pelas fases sólida (partículas do solo), líquida (água que ocupa os vazios) e gasosa (ar que ocupa os vazios). Para isso, tem-se que o volume total de uma dada amostra de solo é dado pela equação 3.

$$V = V_s + V_v = V_s + V_a + V_w, \quad (3)$$

em que:

V_s = volume dos sólidos do solo;

V_v = volume dos vazios do solo;

V_a = volume de ar nos vazios;

V_w = volume de água nos vazios.

Como o peso do ar pode ser desconsiderado, por ser muito pequeno quando comparado ao peso da água e dos sólidos presentes no solo, tem-se que o peso total de uma amostra é dado pela equação 4.

$$P = P_s + P_w, \quad (4)$$

em que:

P_s = peso dos sólidos do solo;

P_w = peso da água.

3.1.2.1 Teor de umidade do solo

Define-se umidade do solo como sendo a razão entre o peso de água contida num determinado volume de solo e o peso dos sólidos existentes nesse mesmo volume.

$$w = \frac{P_w}{P_s}. \quad (5)$$

A umidade do solo é expressa em termos de porcentagem.

3.1.2.2 Peso específico aparente do solo

É dado, por definição, pela equação 6.

$$\gamma = \frac{P}{V}. \quad (6)$$

Normalmente, o peso de um solo é dado em kN e o volume em m³, fazendo com que o peso específico tenha unidade de kN/m³.

A equação 6 fornece o peso específico aparente do solo para uma umidade diferente de zero. Quando a umidade for zero, ou seja, quando se deseja calcular o peso específico aparente do solo seco, substitui-se, na equação 6, o peso total pelo peso dos sólidos. A equação 7 define o peso específico aparente do solo seco.

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V}. \quad (7)$$

Dividindo a equação 7 por $P = P_s + P_w$, fica:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V} = \frac{\frac{P_s}{P_s + P_w}}{\frac{V}{P}} = \frac{\gamma}{1 + w}. \quad (8)$$

A relação entre γ e γ_s é de grande importância para a engenharia.

3.1.2.3 Índice de vazios

O índice de vazios (e) é definido como a razão entre o volume de vazios de uma determinada amostra e o volume de sólidos dessa mesma amostra.

$$e = \frac{V_v}{V_s}. \quad (9)$$

Em ensaios de laboratório, a determinação do índice de vazios é feita em função de γ_g (peso específico das partículas do solo) e γ_s . A expressão 10 mostra essa relação.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{V/P_s}{V_s/P_s} - 1 = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1. \quad (10)$$

3.1.2.4 Porosidade

A porosidade (n) é definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra de solo. A equação 11 apresenta essa relação.

$$n = \frac{V_v}{V}. \quad (11)$$

Dividindo-se ambos os termos por V_s , tem-se:

$$n = \frac{V_v/V_s}{V/V_s} = \frac{e}{V_v/V_s + V_s/V_s} = \frac{e}{e + 1}. \quad (12)$$

3.1.2.5 Grau de saturação do solo

É definido como sendo a porcentagem de água contida nos vazios de um solo. A equação 13 apresenta essa relação.

$$S = \frac{V_a}{V_v}. \quad (13)$$

3.1.3 Água contida no solo

É extremamente complicado separar numericamente os diferentes estados em que a água se apresenta na estrutura do solo. Entretanto, é de interesse estabelecer uma distinção qualitativa entre esses estados. Assim, a água contida na estrutura do solo pode ser classificada como:

- Água de constituição: é a que faz parte da estrutura molecular das partículas do solo, ou seja, faz parte da constituição dessas partículas.
- Água adsorvida: é a água que se adere fortemente às partículas do solo e se apresentam em forma de filmes finos, envolvendo as partículas sólidas.
- Água livre: é a que se encontra numa determinada região do solo, preenchendo os vazios. A análise do movimento dessa água é dada pelas leis da Hidráulica.
- Água higroscópica: é a que se encontra no solo seco ao ar livre.
- Água capilar: é a existente em solos de grãos finos e que sobe pelos interstícios capilares existentes das partículas sólidas.

3.2 Interação entre água e solo

A água livre que se encontra nos vazios existentes entre as partículas do solo pode fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia. Esse escoamento de água através do solo é de grande importância para vários setores da engenharia, sobretudo nos sistemas de drenagem. A propriedade que o solo apresenta de permitir esse escoamento é denominada permeabilidade, sendo que o grau de permeabilidade, ou seja, o quanto de água o solo consegue escoar, é definida pelo “coeficiente de permeabilidade”.

3.2.1 Lei de Darcy

A determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizada experimentalmente pelo engenheiro francês Darcy, em 1856 (Caputo, 1976). Ele verificou que a velocidade de fluxo de um fluido numa amostra de solo, também chamada de velocidade de percolação, era diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, que por sua vez é a razão entre a diferença de altura e a distância entre dois pontos. Nessa proporção, o coeficiente de proporcionalidade é o próprio coeficiente de permeabilidade do solo ensaiado. A equação 14 apresenta a conclusão obtida por Darcy.

$$v = k.i, \quad (14)$$

em que:

v = velocidade de fluxo da água através do solo (m/s);

k = coeficiente de permeabilidade do solo (m/s);

i = gradiente hidráulico (m/m).

A lei de Darcy é válida para um escoamento laminar e, na maioria dos solos, o fluxo de água pelos espaços vazios pode ser considerado laminar.

3.2.2 Determinação do coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade varia muito para solos diferentes, pois é uma grandeza que depende de vários fatores, tais como: viscosidade do fluido, distribuição de tamanho dos poros, distribuição granulométrica, índice de vazios, rugosidade das partículas minerais e grau de saturação do solo. A determinação do valor do coeficiente de permeabilidade depende do tipo de solo que se deseja analisar e do local onde esse solo irá atuar. Há algumas equações empíricas que fornecem meios de calcular o valor desse coeficiente baseado na distribuição granulométrica do solo, por exemplo. Talvez a mais simples e mais difundida equação empírica que permite o cálculo do coeficiente de permeabilidade é a definida por Hazen, em 1930 (Caputo, 1976). Essa equação, utilizada somente para areias uniformes, ou seja, que apresentam pequeno coeficiente de uniformidade, definido pela equação 1, baseia-se no diâmetro efetivo das partículas de Hazen. A equação 15 apresenta essa relação.

$$k = c(D_{10})^2 \quad (15)$$

em que:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

D_{10} = diâmetro efetivo das partículas de Hazen (mm);

c = constante que varia de 1,0 a 1,5.

Segundo Das (2003), outros engenheiros, como Kezeny em 1927, Carman em 1938 e 1956 e Carrier em 2003, estudaram várias amostras e definiram outras equações capazes de fornecer o coeficiente de permeabilidade através de propriedades de fluidos e dos índices físicos do solo. Entretanto, essas equações sempre se restringem a um determinado tipo de solo.

Outra maneira de se encontrar o coeficiente de permeabilidade de um solo é utilizar ensaios de laboratório e ensaios de campo, que são mais gerais e podem ser aplicados para praticamente todo tipo de solo. Os itens 3.2.2.1 e 3.2.2.2 descrevem alguns desses ensaios.

3.2.2.1 Determinação em laboratório do coeficiente de permeabilidade

Há dois tipos de ensaios típicos em laboratório que servem para determinar o valor do coeficiente de permeabilidade para uma dada amostra de solo: o ensaio com carga constante (ou permeâmetro de carga constante) e o ensaio com carga variável (ou permeâmetro de carga variável).

a. Permeâmetro de carga constante

O permeâmetro de carga constante normalmente é empregado para se descobrir o coeficiente de permeabilidade de solos granulares. O experimento consiste em medir a quantidade de água, mantida a nível constante, que atravessa, em um determinado tempo, uma amostra de solo. Nesse experimento, o fornecimento de água é ajustado de modo que a diferença de cotas entre a entrada e a saída de água permaneça constante durante o ensaio. Espera-se até que a vazão de saída passe a ser constante para que se inicie a coleta, realizada num frasco graduado durante um período de tempo conhecido. A Figura 5 apresenta o esquema de um permeâmetro de carga constante.

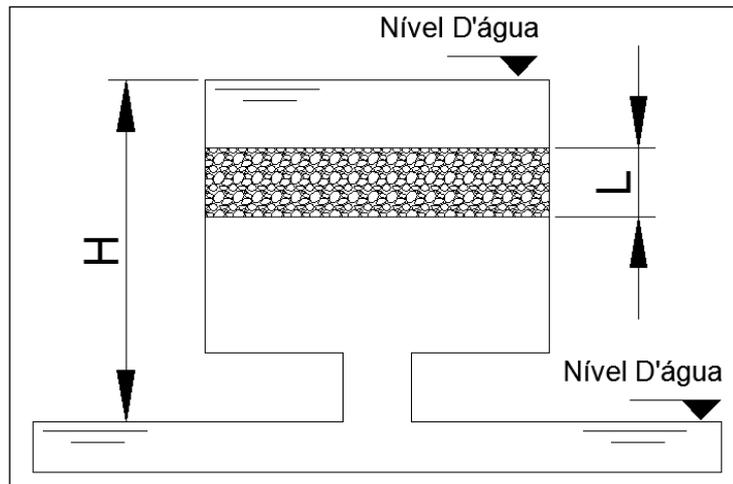


Figura 5 – Permeômetro de carga constante

O volume total de água, em m^3 , coletado no frasco graduado é dado pela equação 16.

$$V = A.v.t \quad (16)$$

em que:

A = área da seção transversal da amostra (m^2);

v = velocidade de fluxo, dada pela lei de Darcy (m/s);

t = tempo de coleta (s).

Substituindo a equação de Darcy, equação 14, na equação 16, e sabendo-se que,

$$i = \frac{h}{L}, \quad (17)$$

com h e L dado em metros, o coeficiente de permeabilidade é calculado pela equação 18.

$$k = \frac{V.L}{A.h.t} \quad (18)$$

A NBR 13292:1995 descreve os requisitos e os procedimentos para se ensaiar amostras de solo em permeômetros de carga constante, a fim de se determinar o coeficiente de permeabilidade. Recomenda-se, na referida norma, que esse ensaio seja utilizado para solos com coeficiente de permeabilidade acima de 10^{-5} m/s.

b. Permeômetro de carga variável

O permeômetro de carga variável é utilizado mais frequentemente para solos com quantidade considerável de finos. A Figura 6 apresenta o esquema de um permeômetro de carga variável.

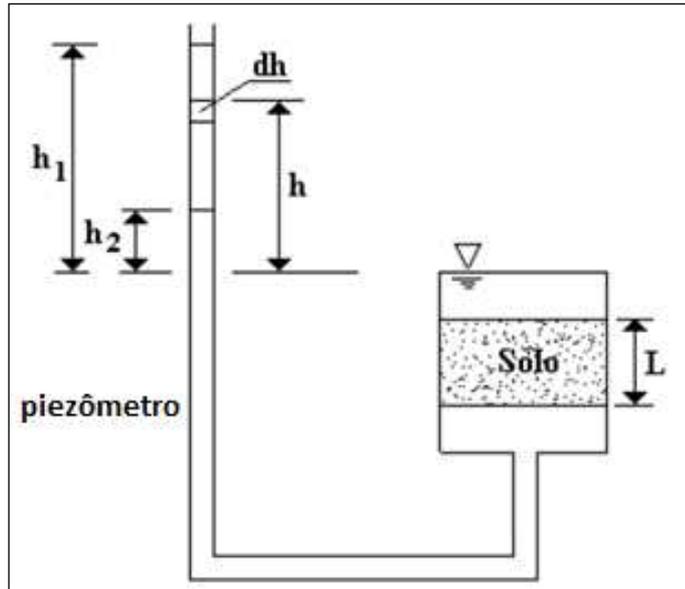


Figura 6 – Permeâmetro de carga variável

A água do piezômetro escoar através do solo e o seu volume é medido a partir da altura do piezômetro. Durante um pequeno intervalo de tempo, dt , o nível de água no piezômetro decresce dh . Considerando o piezômetro com área de seção a , tem-se:

$$dV = - a \cdot dh \quad (19)$$

pois V decresce com o tempo. Da amostra do solo, tem-se:

$$dV = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \cdot dt \quad (20)$$

Igualando as equações 19 e 20, fica:

$$-\frac{dh}{h} = k \cdot \frac{A}{L \cdot a} \cdot dt \quad (21)$$

Considerando o período total de descarga como sendo $\Delta t = t_2 - t_1$, durante o qual o nível decresceu de h_1 para h_2 , integra-se a equação 21 entre esses limites e obtêm-se a equação 22, que representa o coeficiente de permeabilidade para o ensaio com o permeâmetro de carga variável.

$$k = 2,3 \cdot \frac{L \cdot a}{A \cdot \Delta t} \cdot \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (22)$$

em que:

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

L = altura do corpo de prova (m);

a = área de seção do piezômetro (m^2);

A = seção transversal da amostra (m^2);

Δt = intervalo de tempo para a água ir da altura h_1 para h_2 (s);

h_1 = altura inicial da água no piezômetro (m);

h_2 = altura final da água no piezômetro (m).

A NBR 14545:2000 descreve os requisitos e os procedimentos para se ensaiar amostras de solo em permeâmetros de carga variável, a fim de se determinar o coeficiente de permeabilidade. Recomenda-se, na referida norma, que esse ensaio seja utilizado para solos com coeficiente de permeabilidade abaixo de 10^{-5} m/s.

3.2.2.2 Determinação em campo do coeficiente de permeabilidade

Para determinação em campo do coeficiente de permeabilidade, o ensaio mais comumente utilizado é o ensaio do tubo aberto. Esse ensaio consiste em cravar um tubo de sondagem no terreno, na profundidade desejada, e enchê-lo com água, medindo-se a velocidade com que a água escoo pelo tubo e se infiltra no terreno, segundo superfícies esféricas concêntricas. A Figura 7 apresenta o esquema desse ensaio.

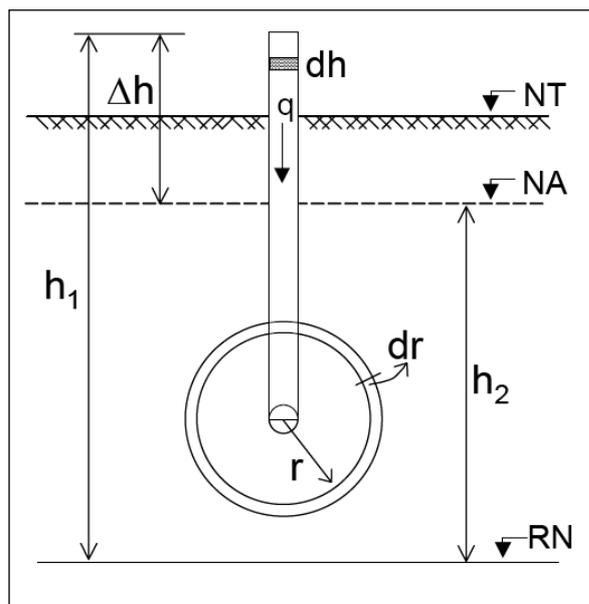


Figura 7 – Ensaio de tubo aberto para determinação da permeabilidade do solo em campo

Para uma esfera de raio r , tem-se que a velocidade de escoamento pode ser dada pela equação 23.

$$v = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (23)$$

Da lei de Darcy, equação 14, tem-se que:

$$v = k.i = -k \cdot \frac{dh}{dr}. \quad (24)$$

Igualando as equações 23 e 24, fica:

$$-dh = \frac{q}{4.k.r} \cdot \frac{dr}{r^2}. \quad (25)$$

Integrando a equação 25 entre limites inicial e final e isolando o coeficiente de permeabilidade, tem-se:

$$k = \frac{q}{4.\pi.\Delta h.r_1}. \quad (26)$$

Ainda, tendo em vista a continuidade do fluxo, tem-se:

$$\pi.r_1^2 . dh = q . dt. \quad (27)$$

Por fim, isolando “q” na equação 26 e substituindo-o na equação 27, supondo ainda que para pequenas variações de t e as correspondentes variações de h, pode-se substituir $\frac{dh}{dt}$ por $\frac{\Delta h}{\Delta t}$, obtêm-se a equação 28, que é a expressão usualmente empregada nesse ensaio.

$$k = \frac{r_1}{4.h} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad (28)$$

em que:

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

r₁ = raio do tubo aberto (m);

h = diferença de carga entre o nível de água do terreno e o nível de água do tubo aberto (m);

Δh = variação do nível de água no tubo aberto (m);

Δt = intervalo de tempo para que se ocorra a variação Δh no tubo aberto (s).

Para terrenos nos quais a permeabilidade é alta, como por exemplo, areias grossas e pedregulhos, o experimento do tubo aberto é realizado com carga constante, pois devido ao alto valor da permeabilidade, torna-se difícil a medida exata do abaixamento do nível d’água. A Figura 8 apresenta o esquema do ensaio de tubo aberto com carga constante.

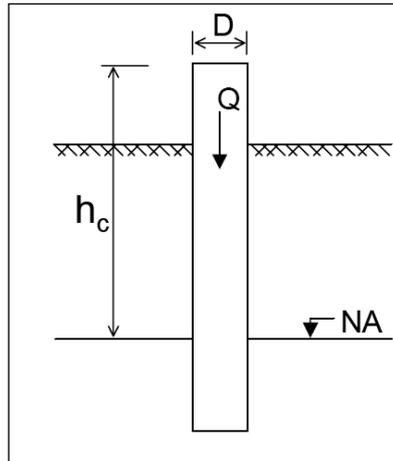


Figura 8 – Ensaio de tubo aberto com carga constante para o cálculo da permeabilidade do solo em campo

A equação 29 é utilizada para determinar o coeficiente de permeabilidade a partir desse ensaio.

$$k = \frac{Q}{F \cdot h_c}, \quad (29)$$

em que:

Q = vazão necessária para manter o nível constante na boca do tubo (m^3/s);

h_c = carga hidráulica (m);

F = fator que depende da geometria do tubo.

Para tubo circulares, tem-se:

$$F = 2,75 \cdot D, \quad (30)$$

em que:

D = diâmetro do tubo (m).

4 MANUAL DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

O Manual de Drenagem Subsuperficial e Subterrânea de pavimentos aeroportuários descrito a seguir foi baseado no Apêndice G do Advisory Circular 150/5320-5C, modificação 1, da Federal Administration Aviation (FAA), publicado em 30/09/2008. Algumas adaptações foram realizadas visando torná-lo mais coerente com a realidade climática e de solos do Brasil.

4.1 Princípios da drenagem de pavimentos

4.1.1 Fluxo de água através do solo

O fluxo de água através do solo, dado empiricamente pela lei de Darcy e representado pela equação 14, indica que a velocidade de fluxo é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, como descrito em 3.2.1. A equação 14 pode ser expandida para se obter a taxa de fluxo através de uma área da seção transversal do solo, normal à direção do fluxo.

$$Q = k.i.A, \quad (31)$$

em que:

Q = taxa de fluxo (m^3/s);

A = área da seção transversal normal ao fluxo (m^2).

De acordo com a lei de Darcy, a velocidade de fluxo e a taxa de fluxo através de um meio poroso são diretamente proporcionais ao gradiente hidráulico. Entretanto, para que esta condição seja verdadeira, o fluxo deve ser laminar (ou não turbulento). Todavia, em especificações de drenagem subsuperficial e subterrânea, há certa tolerância a fim de permitir a utilização dessas equações quando o fluxo for turbulento. Os critérios e as incertezas dependem fortemente da permeabilidade dos solos na estrutura do pavimento e, por isso, mostra-se interessante analisar a influência de vários fatores sobre a permeabilidade. Os materiais de maior preocupação, e que necessitam de uma análise mais cuidadosa, são os agregados utilizados na base, na sub-base e nas próprias camadas de drenagem.

4.1.2 Fatores que afetam a permeabilidade

4.1.2.1 Coeficiente de permeabilidade

Sabe-se que o coeficiente de permeabilidade depende principalmente das características dos materiais permeáveis, mas é também uma função das propriedades do fluido nos poros. A equação 32, desenvolvida por Taylor, mostra a influência do solo e das propriedades do fluido sobre a permeabilidade e baseia-se no fluxo através de meios porosos.

$$k = D_{10}^2 \cdot C \left(\frac{\gamma \cdot e^3}{\mu \cdot (1 - e)} \right), \quad (32)$$

em que:

k = coeficiente de permeabilidade (m/s)

D_{10} = diâmetro efetivo da partícula Hazen (m)

C_u = coeficiente de uniformidade (adimensional)

γ = peso específico do fluido nos poros (kg/m³)

μ = viscosidade do fluido nos poros (kg/m.s)

e = índice de vazios (adimensional)

4.1.2.2 Efeito do fluido nos poros e da temperatura na permeabilidade

No projeto de sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea para pavimentos, o principal fluido nos poros (e o de maior preocupação) é a água. Portanto, quando a permeabilidade é mencionada, a água é assumida como sendo esse fluido. A equação 32 indica que a permeabilidade é diretamente proporcional ao peso específico de água e inversamente proporcional à viscosidade. O peso específico da água é, essencialmente, constante, mas a viscosidade da água varia com a temperatura. Ao longo de toda a variedade de temperatura encontrada em problemas de infiltração, a viscosidade varia cerca de 100 por cento. Embora essa variação pareça grande, pode ser insignificante quando analisada no contexto das variações que ocorrem com as mudanças nas características do material.

4.1.2.3 Efeito da granulometria e do índice de vazios na permeabilidade

É evidente que, quanto menor o tamanho dos grãos e menores os espaços vazios que constituem os canais de fluxo, menor a permeabilidade do meio. A equação 32 sugere que a permeabilidade varie com o quadrado do diâmetro efetivo das partículas e com o cubo do índice de vazios. Geralmente o índice de vazios é uma função da granulometria do material, a influência do diâmetro efetivo da partícula é ampliada. Considerando-se, por exemplo, que o tamanho efetivo da partícula aumente de 0,075 mm (peneira n° 200) para 1,18 mm (peneira n° 16), a permeabilidade do meio, de acordo com a equação 32, aumentará de aproximadamente 250. Admitindo-se ainda que esse aumento no tamanho efetivo de partícula resulte num aumento do índice de vazios de no mínimo duas vezes, a permeabilidade, devido ao aumento no índice de vazios, aumentaria por um fator de 8.

Assim, o aumento total de permeabilidade, devido ao aumento do tamanho efetivo da partícula e do aumento do índice de vazios seria aproximadamente de 2000.

Além do tamanho efetivo da partícula, a forma dos espaços vazios tem uma influência direta sobre a permeabilidade. Assim, a relação entre o tamanho dos grãos, o índice de vazios e a permeabilidade são complexas. Empiricamente sabe-se que partículas mais finas do solo têm uma maior influência sobre a permeabilidade do meio. O coeficiente de permeabilidade da areia e do cascalho, por exemplo, situados entre limites especificados para bases e sub-bases de pavimentos, dependem principalmente da porcentagem em peso de partículas que passam na peneira 0,075 mm (n° 200). A Tabela 2 fornece estimativas do coeficiente de permeabilidade para esses materiais para várias porcentagens em peso que passam na peneira de 0,075 mm (n° 200).

Tabela 2 – Coeficientes de permeabilidade para areia e cascalho

Porcentagem em peso que passa na peneira 0,075 mm (n° 200)	Permeabilidade para amostras modeladas (mm/s)
3	$5 \cdot 10^{-1}$
5	$5 \cdot 10^{-2}$
10	$5 \cdot 10^{-3}$
15	$5 \cdot 10^{-4}$
20	$5 \cdot 10^{-5}$

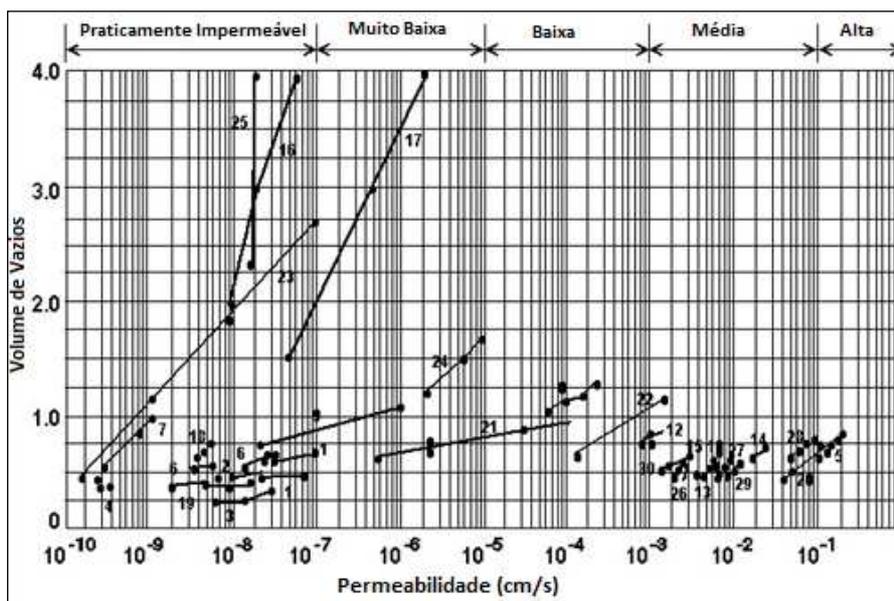


Figura 9 – Dados de Teste de Permeabilidade (Lambe e Whitman, 1979)

A seguir serão descritos os tipos de solo apresentados no gráfico da Figura 9.

Código de Identificação dos Solos

1 – Caliche compactado	14 – Areia da Ilha Plum
2 – Caliche compactado	15 – Areia de Fort Peck
3 – Areia siltosa	17 – Silte de Boston
4 – Argila arenosa	18 - Loess
5 – Areia de praia	19 – Argila Lean
7 – Argila azul de Boston compactada	20 – Areia de Union Falls
8 – Argila Vicksburg Buckshot	21 – Silte da Carolina do Norte
9 – Silte de Boston	22 – Areia de From Dike
10 – Areia de Ottawa	23 – Sodium Boston Blue Clay
11 – Areia de Gaspee-Point	24 – Calcium Kaolinite
12 – Areia de Franklin Falls	25 – Sodium Montmorillonite
13 – Areia de Scituate	26 → 30 – Sand (Dam Filter)

A Figura 9 apresenta a permeabilidade de diferentes solos como sendo uma função do índice de vazios. A quantidade de água contida num solo se relaciona diretamente com o índice de vazios. Porém, nem toda a água contida no solo pode ser drenada por gravidade, pois parte dela é retida como filmes finos e aderida às partículas do solo, sendo mantida ali pelo efeito da capilaridade. Por isso, para determinar o volume de água que pode ser removido do solo, é essencial que se conheça a porosidade efetiva (n_e). Ela é definida como sendo a razão entre o volume de vazios que pode ser drenado sob ação da gravidade e o volume total do solo, e pode ser calculada através da equação 33.

$$n_e = 1 - \frac{\gamma_s}{G_s \cdot \gamma_w} (1 + G_s \cdot w_e), \quad (33)$$

em que:

γ_s = peso específico seco do solo (N/m^3);

G_s = peso específico relativo dos sólidos do solo (adimensional);

γ_w = Peso específico de água (N/m^3);

w_e = teor de umidade efetivo (após o solo ter sido drenado), expresso como uma fração decimal em relação ao peso seco (adimensional).

Materiais bem graduados, utilizados em camadas de base, como areia e cascalho, apresentam porosidade efetiva menor ou igual a 0,15. Solos uniformemente graduados, como areias média e grossa, apresentam porosidade efetiva entre 0,15 e 0,25. Agregados

de graduação aberta, utilizados em camadas de drenagem, apresentam porosidade efetiva acima de 0,25.

4.1.2.4 Efeito da estrutura e da estratificação na permeabilidade

Geralmente, solos *in situ* apresentam grau de estratificação ou de heterogeneidade na estrutura. As águas depositadas nos solos normalmente se apresentam numa série de camadas horizontais. Essas camadas horizontais variam em relação à dimensão do grão e à permeabilidade e, em geral são mais permeáveis na horizontal do que na vertical. Isso se deve ao método utilizado na construção dessas camadas: os materiais do subleito, da sub-base e da base são depositados e compactados em camadas horizontais, o que resulta numa permeabilidade diferente na direção vertical quando comparada à permeabilidade na direção horizontal. A drenagem vertical de água a partir de um pavimento pode ser interrompida por uma única camada relativamente impermeável. Para a maioria dos pavimentos, os subleitos têm uma permeabilidade muito baixa em comparação com a permeabilidade da base e da sub-base. Portanto, a água na estrutura do pavimento pode ser removida com mais sucesso através de fluxo horizontal. Em uma estrutura de pavimento em camadas, a permeabilidade efetiva horizontal é obtida a partir de uma média ponderada da permeabilidade de cada camada com a espessura dessas camadas.

$$k = \frac{(k_1 \cdot d_1 + k_2 \cdot d_2 + k_3 \cdot d_3 + \dots)}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots)}, \quad (34)$$

em que:

k = permeabilidade horizontal efetiva;

k_1, k_2, k_3, \dots = permeabilidade horizontal das camadas individuais;

d_1, d_2, d_3, \dots = espessuras das camadas individuais.

Quando uma camada de drenagem é utilizada na seção de pavimento, a permeabilidade do material dessa camada será, provavelmente, várias ordens de grandeza maior do que a dos outros materiais na seção. Uma vez que o fluxo de água a partir da seção do pavimento é proporcional à permeabilidade, ele pode ser calculado apenas com base nas características da camada de drenagem.

4.1.3 Quantidade e taxa de escoamento subsuperficial e subterrâneo

A água que flui a partir da seção de um pavimento pode se originar da infiltração através da superfície do pavimento ou de águas subterrâneas de lençol freático elevado. Normalmente, os fluxos de água subterrânea coletados pelos drenos a partir do subleito são insignificantes quando comparados ao fluxo proveniente da infiltração. O volume de água devido à infiltração a partir do pavimento depende de fatores como: tipo e condição da superfície, duração e intensidade da precipitação, propriedades da camada de drenagem, gradiente hidráulico, tempo permitido para a drenagem e área de influência. No projeto do sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea todos estes fatores devem ser considerados.

4.1.3.1 Efeitos da superfície do pavimento e da precipitação

O tipo e as condições da superfície do pavimento têm influência considerável sobre o volume de água que infiltra em sua estrutura. No projeto de drenagem superficial, toda a chuva que cai sobre superfícies pavimentadas é considerada para o cálculo do escoamento. Para pavimentos recém-construídos e com pouco tempo de utilização, a consideração de 100 por cento de escoamento é uma suposição boa e conservadora para o projeto de instalações de drenagem superficial. Entretanto, para o projeto das instalações de drenagem subsuperficial e subterrânea, a taxa de infiltração deve ser considerada para um pavimento deteriorado. Assim, considera-se que aproximadamente 50 por cento das chuvas podem infiltrar através da superfície de um pavimento em mau estado.

É evidente que a quantidade de água infiltrada no pavimento é diretamente proporcional à intensidade e à duração da precipitação. Precipitações de intensidades relativamente baixas podem ser usadas para o projeto de instalações de drenagem subsuperficial e subterrânea, pois a precipitação não aumenta muito o efeito desfavorável da água sobre o desempenho do pavimento. As chuvas em excesso, uma vez que a base e sub-base estejam saturadas, escoam como drenagem superficial. Por essa razão, uma precipitação aparentemente não conservativa pode ser utilizada para o projeto de drenagem subsuperficial e subterrânea.

4.1.3.2 Capacidade da camada de drenagem

Se a água entra na estrutura do pavimento em uma taxa maior do que a taxa de saída, a estrutura do pavimento torna-se saturada. O projeto das camadas de drenagem horizontal na estrutura do pavimento é baseado, em parte, nessas camadas servirem como um reservatório para o excesso de água que entra na estrutura do pavimento. A capacidade da camada de drenagem, então, é uma função da capacidade de armazenamento da camada e a quantidade de água que ela escoar durante um evento de chuva. A capacidade de armazenagem (q_s), por sua vez, será uma função da porosidade efetiva do material de drenagem e da espessura da camada de drenagem.

$$q_s = n_e \cdot h, \quad (35)$$

em que:

n_e = porosidade efetiva (adimensional);

h = espessura da camada de drenagem (m).

Na equação 35, a dimensão de q_s será a mesma de h . Como é assumido que nem toda a água será drenada a partir da camada de drenagem, a capacidade de armazenagem será reduzida à quantidade de água na camada no início do evento da chuva. O critério para o projeto da camada de drenagem é que 85 por cento da água será drenada a partir da camada de drenagem dentro de 24 horas e, portanto, assume-se que, conservadoramente, apenas 85 por cento do volume de armazenagem estará disponível no início de um evento de chuva. Assim, a capacidade de armazenagem da camada no começo de um evento de chuva, dada por uma modificação da equação 35, será:

$$q_s = 0,85 \cdot n_e \cdot h. \quad (36)$$

A quantidade de água que escoar a partir da camada de drenagem durante o evento da chuva pode ser estimada utilizando a equação 37.

$$q_d = \frac{t \cdot k \cdot i \cdot h}{2 \cdot L}, \quad (37)$$

em que:

t = duração do evento chuva (s);

L = comprimento do percurso de escoamento (m);

k = permeabilidade da camada de drenagem (m/s);

i = declividade da camada de drenagem (m/m);

h = espessura da camada de drenagem (m).

A capacidade total (q) da camada de drenagem será a soma de (q_s) e (q_d). Assim, a capacidade total da camada de drenagem é dada pela equação 38.

$$q = (0,85.n_e.h) + \frac{t.k.i.h}{2.L} \quad (38)$$

Conhecendo a entrada de água no pavimento, a equação 38 pode ser utilizada para calcular a espessura da camada de drenagem de tal modo que ela tenha a capacidade de um dado evento de chuva. Na maioria das situações, a quantidade de água drenada a partir da camada de drenagem será reduzida em comparação com a capacidade de armazenamento. Portanto, na maioria dos casos, a equação 36 pode ser utilizada para estimar a espessura requerida para a camada de drenagem.

4.1.3.3 Tempo de drenagem

A água deve ser drenada das camadas de base e de sub-base o mais rápido possível. O tempo de drenagem dessas camadas é uma função do grau de porosidade efetiva, do comprimento do percurso de escoamento, da espessura das camadas, da declividade do caminho de drenagem e da permeabilidade das camadas. Critérios especificam que a base e a sub-base devem apresentar um grau de 50 por cento da drenagem num período de 10 dias. A equação 39 apresenta o tempo de drenagem de 50 por cento.

$$T_{50} = \frac{n_e.D^2}{2.k.H_0} \quad (39)$$

em que:

T_{50} = tempo para 50 por cento de drenagem (s);

n_e = porosidade efetiva do solo (adimensional);

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

D , H_0 e H = dimensões da base e da sub-base (m) (ilustradas na Figura 10).

Se na Figura 10 a espessura da camada de drenagem é pequena quando comparada ao comprimento do percurso de drenagem, o declive do caminho de drenagem (i) pode ser representado por $\left(\frac{H_0}{D}\right)$ e a equação 39 pode ser escrita como:

$$T_{50} = \frac{n_e.D}{2.i.k} \quad (40)$$

A prática mostra que os materiais da base e da sub-base, quando compactadas em densidades necessárias na construção dos pavimentos, raramente têm permeabilidade suficiente para satisfazer o critério de drenagem de 10 dias. Em tais

pavimentos, os materiais de base e sub-base se tornam saturados, causando uma redução na vida útil desses pavimentos. Quando uma camada de drenagem é incorporada à estrutura do pavimento a fim de melhorar a drenagem, o critério para o projeto dessa camada é que ela tenha que atingir um grau de drenagem de 85 por cento em 24 horas. O tempo de drenagem de 85 por cento (T_{85}) é aproximadamente o dobro do tempo de drenagem de 50 por cento. T_{85} é dado pela equação 41.

$$T_{85} = \frac{n_e \cdot D}{i \cdot k} \quad (41)$$

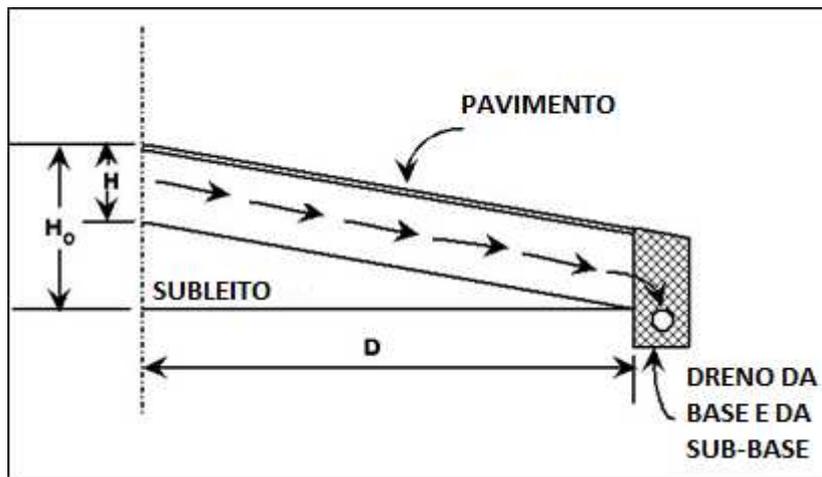


Figura 10 – Geometria do Pavimento para cálculo de tempo de drenagem (FAA, 2009)

4.1.3.4 Comprimento e inclinação do caminho de drenagem

De acordo com a equação 39, o tempo de drenagem é uma função do quadrado do comprimento do percurso de drenagem. Por essa razão, e pelo fato de que na maioria dos modelos de pavimento o comprimento do percurso de drenagem pode ser controlado, esse comprimento é um parâmetro importante no projeto do sistema de drenagem. O comprimento do percurso de escoamento (L) pode ser calculado a partir da equação 42.

$$L = \frac{L_t \cdot \sqrt{i_t^2 + i_e^2}}{i_t}, \quad (42)$$

em que:

L_t = comprimento da inclinação transversal da camada de drenagem (m);

i_t = inclinação transversal da camada de drenagem (m/m);

i_e = inclinação longitudinal da camada de drenagem (m/m).

A inclinação do caminho de drenagem (i) é uma função da inclinação transversal e da inclinação longitudinal da camada de drenagem, e é calculado pela equação 43.

$$i = \sqrt{i_t^2 + i_e^2} \quad (43)$$

4.1.3.5 Taxa de fluxo

Os drenos de borda para pavimentos com camadas de drenagem devem ser projetados para atuar com a taxa máxima de fluxo na camada de drenagem. A taxa máxima de fluxo será obtida quando a camada de drenagem estiver fluindo plena, ou seja, completa, e pode ser estimada utilizando a equação 38.

4.1.4 Utilização das camadas de drenagem

4.1.4.1 Propósito

As camadas de drenagem são utilizadas para promover a drenagem horizontal tanto das águas de infiltração quanto das águas originadas de lençóis freáticos elevados, além de evitarem o acúmulo de poro pressão nas estruturas dos pavimentos.

4.1.4.2 Instalação

Em pavimentos rígidos, a camada de drenagem é instalada, normalmente, diretamente abaixo da placa de concreto. Neste local, a camada de drenagem vai interceptar a entrada de água através de trincas e de juntas, e permitir uma rápida drenagem para longe da parte inferior da placa de concreto. Em pavimentos flexíveis, a camada de drenagem é instalada, normalmente, por baixo da base adensada de agregado graúdo. Ao instalar a camada de drenagem abaixo da base, as tensões sobre ela ficarão reduzidas a um nível aceitável e a drenagem será abastecida pela camada de base.

4.1.4.3 Condições de permeabilidade

Os materiais utilizados nas camadas de drenagem devem ter permeabilidade suficiente para permitir o escoamento rápido da água e dissipar rapidamente a poro pressão, além de fornecer resistência e estabilidade suficientes para suportar as tensões de carga do tráfego. Existe uma relação entre a resistência, a estabilidade e a permeabilidade; portanto, os materiais utilizados nas camadas de drenagem devem ter

um mínimo de permeabilidade para a aplicação de drenagem requerida. Para a maioria dos casos, um material com permeabilidade de 300 m/dia é suficiente para atender ao critério de drenagem.

4.1.5 Utilização de filtros

4.1.5.1 Propósito

A utilização dos filtros nas estruturas dos pavimentos tem o intuito de, além de impedir o movimento do solo (piping ou bombeamento), permitir o fluxo de água de um material, ou de uma camada, para outro. A necessidade do filtro é ditada pela existência de fluxo de água a partir de materiais de granulometria fina para materiais de granulometria grossa, fato que gera potencial para o movimento do material de granulometria fina. O principal local na estrutura do pavimento onde há fluxo a partir de materiais de granulometria fina para materiais de granulometria grossa é a partir da base, sub-base, ou subleito para o agregado graúdo em torno do tubo de drenagem. Assim, a principal utilização do filtro num sistema de pavimento será na prevenção do bombeamento de finos do solo para dentro do tubo de drenagem. Apesar de raro, existe a possibilidade de a poro pressão forçar um fluxo de água para cima, ou seja, da camada de sub-base ou do subleito para a camada de drenagem de pavimento. Nessa condição, seria necessário projetar um filtro para separar a camada de drenagem do material fino.

4.1.5.2 Requisitos para evitar o bombeamento

O critério utilizado para proteger a camada drenante da intrusão de materiais finos que poderiam colmatá-la e, conseqüentemente, reduzir sua permeabilidade é dado pela equação 44, e , segundo Cedergreen (1980), foi desenvolvido por K. Terzaghi em 1922.

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{solo})} \leq 5, \quad (44)$$

em que:

$D_{15}(\text{filtro})$ = diâmetro de 15 por cento passante da camada filtrante (m);

$D_{85}(\text{solo})$ = diâmetro de 85 por cento passante do material do solo (m).

Esse critério foi desenvolvido para evitar a falência, por expansão e bombeamento de barragens, e utiliza uma camada de agregado graúdo colocada sobre um filtro apropriado, que impede que os solos finos subam através do material graúdo.

Outro critério a ser utilizado com o intuito de evitar a utilização de materiais com graduação descontínua é dado pela equação 45.

$$\frac{D_{50}(\text{filtro})}{D_5(\text{solo})} \leq 25, \quad (45)$$

em que:

$D_{50}(\text{filtro})$ = diâmetro de 50 por cento passante da camada filtrante (m);

$D_5(\text{solo})$ = diâmetro de 5 por cento passante do material do solo (m).

4.1.5.3 Requisitos de permeabilidade

Para assegurar que o material utilizado no filtro seja suficientemente permeável para permitir a passagem da água sem a formação de poro pressões elevadas, o critério apresentado na equação 46 deve ser satisfeito.

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{solo})} \leq 5, \quad (46)$$

em que:

$D_{15}(\text{filtro})$ = diâmetro de 15 por cento passante da camada filtrante (m);

$D_{15}(\text{solo})$ = diâmetro de 15 por cento passante do material do solo (m).

4.1.6 Utilização das camadas de separação

4.1.6.1 Finalidade

Quando as camadas de drenagem são utilizadas na estrutura dos pavimentos, elas têm de ser separadas dos materiais de granulometria fina do subleito. Essa separação evita tanto a penetração do material de drenagem para o aterro quanto o bombeamento de finos do aterro para as camadas de drenagem.

4.1.6.2 Requisitos

Os principais requisitos da camada de separação estão relacionados à resistência e à permeabilidade. Primeiramente, o material utilizado na camada de separação deve ter uma resistência tal que impeça o material utilizado na camada de drenagem de se

mover em direção ao aterro. Além disso, a permeabilidade do material utilizado na camada de separação deve ser suficiente para evitar o acúmulo de poro pressões no aterro. Para satisfazer as exigências de resistência, o material da camada de separação deverá ter um Índice de Suporte Califórnia (CBR) mínimo de 50. Já para evitar o acúmulo de poro pressão no aterro, a camada de separação deverá ter uma permeabilidade maior do que a do subleito. Normalmente o segundo critério já é satisfeito, visto que a permeabilidade do subleito é várias ordens de grandeza menor do que a permeabilidade de um material de CBR 50. Entretanto, ainda assim, para garantir permeabilidade suficiente, aplicam-se na camada de separação, as condições de permeabilidade aplicadas para o filtro.

4.1.7 Utilização de geotêxteis

4.1.7.1 Propósito

Os geotêxteis podem ser utilizados para substituir tanto o filtro quanto a camada de separação. A principal utilização do geotêxtil é como filtro ao redor do tubo para os drenos de borda. Embora eles possam ser utilizados como um substituto da camada de separação, um geotêxtil não acrescenta força à estrutura de pavimento e, devido a isso, essa prática não é recomendada.

4.1.7.2 Requisitos de geotêxteis para filtros

Quando os geotêxteis estiverem servindo como um revestimento de filtro da vala do dreno de borda, sua principal função é a de impedir a entrada de finos no sistema de drenos de borda. Para pavimento com camadas de drenagem, há pouca necessidade de se ter fluxo de água através do tecido e, portanto, para a maioria das aplicações, é preferível que se tenha um tecido mais pesado do que aquele que seria utilizado como sendo um filtro. Como as camadas de drenagem têm uma elevada permeabilidade, os geotêxteis nunca devem ser colocados entre ela e os drenos de borda. A permeabilidade dos geotêxteis é regida pelo tamanho das aberturas no tecido, que são especificadas nos termos do “Tamanho de Abertura Aparente” em milímetros. Quando utilizado como filtro da vala para a drenagem de borda, o geotêxtil deve sempre ter um tamanho de abertura aparente igual ou inferior a 0,212 milímetro. Quando utilizado como filtro em drenos instalados para interceptar o fluxo de águas subterrâneas, o geotêxtil deve ser

selecionado com base em critérios semelhantes aos critérios utilizados para projetar filtros, descritos em 4.1.5.

4.1.7.3 Requisitos de geotêxteis para camada de separação

Os geotêxteis utilizados como camadas de separação sob camadas de drenagem devem ser selecionados com base principalmente em sua vida útil, com uma preocupação menor em relação ao tamanho de abertura aparente. Quando os geotêxteis são utilizados como camada de separação, sua vida útil deve ser muito bem avaliada pelo método de classificação da “AASHTO M 28890, Especificação Padrão para Geotêxteis”. Essa análise garante a duração do geotêxtil sob as cargas de tráfego durante a vida útil do pavimento. Para garantir que os materiais finos não sejam bombeados para dentro da camada de drenagem e que ainda haja fluxo de água, para evitar o acúmulo de poro pressão, o tamanho de abertura aparente do geotêxtil deve ser menor ou igual a 0,212 milímetro e também maior ou igual a 0,125 milímetro.

4.2 Projeto do sistema de drenagem subsuperficial

A metodologia descrita a seguir refere-se a projetos de sistema de drenagem subsuperficial de pavimentos aeroportuários e tem como princípio básico a rápida remoção das águas de infiltração, tanto as de origem superficial quanto aquelas oriundas de lençol freático elevado.

4.2.1 Métodos

Para a maioria das estruturas de pavimentos, a água é removida por uma camada especial de drenagem que permite seu rápido escoamento horizontal. Essa camada drenante deve ser projetada para escoar a infiltração superficial de uma dada chuva de projeto e ainda suportar a carga de tráfego solicitada no pavimento. Já a camada de separação, localizada abaixo da camada drenante, deve ser construída para evitar a penetração de finos do subleito ou da sub-base para a camada de drenagem. A água escoada pela camada de drenagem deve alimentar um sistema de coleta que, por sua vez, deve ser projetado para manter progressivamente as maiores capacidades de escoamento na direção do fluxo. A saída para os drenos subterrâneos deve ser devidamente localizada e protegida para evitar o refluxo do sistema de drenagem

superficial. Pavimentos nos quais o material do aterro apresenta permeabilidade suficiente para que a água escoe na direção vertical podem não necessitar de um sistema de drenagem subsuperficial. Além disso, alguns pavimentos dimensionados para tráfego muito leve podem não justificar o gasto com um sistema de drenagem subsuperficial. Mesmo para pavimentos dimensionados para tráfego muito leve, deve-se assegurar que os materiais da base e da sub-base são de livre escoamento e que a água não ficará presa em sua estrutura.

4.2.2 Pré-requisitos de projeto

No projeto do sistema de drenagem subsuperficial, deve-se ter uma compreensão das condições ambientais, das propriedades do solo e do subsolo e das condições subterrâneas.

4.2.2.1 Condições ambientais

Para que seja possível o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem subsuperficial, deve-se conhecer qual a precipitação aplicável à região na qual se deseja instalar o sistema. Os dados de precipitação são utilizados para estimar o volume de água a ser drenado. A literatura relativa à hidrologia fornece diferentes métodos de estimar a precipitação, sejam através de dados pluviométricos ou de estimativas, levando-se em consideração regiões com condições ambientais semelhantes. O que se deseja, então, é definir quanto vale a intensidade de chuva numa determinada região. Para isso, encontram-se as equações idf 's, em que:

i = intensidade da chuva (mm/h);

d = duração do evento de chuva (h);

f = frequência da chuva (anos).

No caso específico de dimensionamento do sistema de drenagem de aeroportos, considera-se que o inverso da frequência da chuva, também conhecida como período de retorno, seja de 2 anos e que a duração do evento seja de 1 hora. Essas considerações irão interferir diretamente na intensidade da chuva, que por sua vez irá influenciar todo o dimensionamento do sistema de drenagem. Sendo assim, quando o projetista achar conveniente, os valores da frequência e da duração do evento podem ser alterados, sempre a favor da segurança, levando-se em conta a importância da drenagem naquele aeroporto.

4.2.2.2 Propriedades dos solos

Na maioria dos casos, as propriedades do solo investigadas para outros fins, como aqueles relacionados ao projeto do pavimento, irão fornecer informações que podem ser utilizadas para o projeto do sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea. A propriedade de maior interesse é o coeficiente de permeabilidade.

Conhecer o coeficiente de permeabilidade dos solos existentes é essencial para determinar se as camadas de drenagem horizontal são necessárias no pavimento. Para pavimentos com subleitos de elevado coeficiente de permeabilidade, a entrada de água no pavimento será drenada verticalmente e as camadas de drenagem horizontal, portanto, não serão necessárias. Para pavimentos que apresentam subleito com um baixo coeficiente de permeabilidade, a água que entra no pavimento deve ser drenada horizontalmente para um sistema coletor.

4.2.2.3 Fonte de dados

Os dados são obtidos a partir de explorações de campo feitas em sintonia com a concepção do projeto, incluindo mapas topográficos com o traçado do pavimento proposto e dos arredores, indicando todos os córregos, valas, poços e reservatórios naturais. É feita uma análise de fotografias aéreas, para obter informações gerais sobre o solo e sobre as condições das águas. Sondagens feitas durante a exploração do solo fornecem a profundidade dos lençóis freáticos e tipos de solo do subleito. Valores típicos de permeabilidade dos solos de subleito são obtidos através da Figura 9. Embora o valor de permeabilidade determinado a partir da Figura 9 seja considerado apenas como uma estimativa, ele deve ser suficientemente preciso para determinar se as drenagens subsuperficial e subterrânea são necessárias para o pavimento. Para os materiais granulares, determinam-se as estimativas da permeabilidade através da equação 47.

$$k = \frac{217,5 \cdot (D_{10})^{1,478} \cdot (n)^{6,654}}{(P_{200})^{0,597}} \text{ em mm/s,} \quad (47)$$

em que:

$$n = \text{porosidade (adimensional)} = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_g \cdot G};$$

G = peso específico relativo dos sólidos do solo (adimensional);

γ_s = peso específico seco do material (N/m^3);

γ_w = peso específico da água (N/m^3);

D_{10} = diâmetro efetivo das partículas correspondentes aos 10% mais finos (mm);

P_{200} = porcentagem que passa na peneira de abertura 0,075 mm (n° 200);

γ_g = peso específico das partículas do solo (N/m^3).

Em alguns casos, os testes laboratoriais de permeabilidade podem ser necessários, no entanto, deve-se precaver e estar ciente de que a permeabilidade dos materiais granulares muito abertos é muito sensível aos métodos de ensaio, aos métodos de compactação e à gradação da amostra. Devido a isso, usam-se valores conservadores de permeabilidade da camada de drenagem para o projeto.

4.2.3 Critérios para o sistema de drenagem subsuperficial

4.2.3.1 Necessidade do sistema

Nem todos os pavimentos exigem um sistema de drenagem subsuperficial, seja porque o subleito é suficientemente permeável para permitir que a água seja drenada verticalmente nele ou porque a estrutura do pavimento não justifica o gasto com o sistema. Mesmo que o pavimento atenda aos requisitos de isenção, pode-se realizar uma análise de drenagem, e a inclusão do sistema pode trazer benefícios ao projeto. Para pavimentos rígidos, em particular, deve-se ter o cuidado de assegurar que a água seja drenada rapidamente a partir do fundo da placa de concreto e que o material diretamente abaixo da placa de concreto não seja susceptível ao efeito de bombeamento.

4.2.3.2 Entrada de água

O projeto de drenagem subsuperficial do pavimento deve se basear na infiltração de água oriunda de uma chuva de projeto de duração de 1 hora e um período de retorno esperado de 2 anos. A quantidade de água infiltrada é determinada multiplicando-se o índice de chuva de projeto pelo coeficiente de infiltração. O coeficiente de infiltração irá variar ao longo da vida do pavimento de acordo com o tipo de pavimento, com a drenagem superficial, com a manutenção do pavimento e com o seu estado estrutural. Como a determinação de um valor preciso para o coeficiente de infiltração de um pavimento em particular é muito difícil, assume-se, conservadoramente, um valor de 0,5 para o projeto.

4.2.3.3 Comprimento e inclinação do caminho de drenagem

O comprimento do caminho de drenagem é medido ao longo do declive da camada de drenagem a partir da crista do talude até onde a água sairá da camada de drenagem. Em termos simples, o comprimento do caminho de escoamento da água é a distância máxima que a água irá percorrer na camada de drenagem. O comprimento do caminho de drenagem (L), em metros, pode ser calculado utilizando a equação 42, e a inclinação (i) do caminho de drenagem pode ser calculada utilizando a equação 43.

4.2.3.4 Espessura da camada de drenagem

A espessura da camada de drenagem é calculada de tal forma que sua capacidade seja igual ou maior à infiltração da chuva de projeto. A equação 48 fornece a espessura da camada de drenagem para o caso citado anteriormente.

$$H = \frac{2.F.R.L.t}{(1,7.n_e.L) + (k.i.t)}, \quad (48)$$

em que:

H = espessura da camada de drenagem (m);

F = coeficiente de infiltração (adimensional);

R = índice de chuva de projeto (m/h);

L = comprimento do caminho de drenagem (m);

t = duração da chuva de projeto (h);

n_e = porosidade efetiva (adimensional);

k = permeabilidade da camada de drenagem (m/h);

i = declividade do caminho de drenagem (m/m).

Caso o termo (k.i.t) seja pequeno quando comparado ao termo (1,7. n_e .L), o que aconteceria no caso de longos caminhos de drenagem (acima de 6 metros), a espessura desejada da camada de drenagem pode ser estimada suprimindo o termo (k.i.t) a partir da equação 48.

$$H = \frac{F.R.t}{0,85.n_e}, \quad (49)$$

em que as unidades são as mesmas descritas na equação 48.

4.2.3.5 Critérios de drenagem

Os critérios de drenagem subsuperficial para pistas de táxi e pistas de pouso exigem que, se a camada de drenagem ficar saturada, o sistema seja capaz de drenar 85 por cento dentro de 24 horas. Para pistas de estacionamento, pátios de aeronaves e outras áreas que recebem baixo volume de tráfego, e de baixa velocidade, o tempo de 85 por cento de drenagem sobe para 10 dias. O tempo de drenagem de 85 por cento é calculado pela equação 50.

$$T_{85} = \frac{n_e \cdot L}{i \cdot k}, \quad (50)$$

em que:

T_{85} = tempo de drenagem de 85% (dia);

L = comprimento do caminho de drenagem (m);

i = gradiente hidráulico (m/m);

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

O tempo de drenagem pode ser modificado alterando o material de drenagem e o comprimento ou a inclinação do caminho de drenagem. Alterando-se o material de drenagem, mudar-se-á tanto a porosidade efetiva quanto a permeabilidade, sendo que a permeabilidade se altera de maneira mais acentuada do que a porosidade efetiva. Assim, utilizando-se um material de drenagem mais aberto, o tempo de drenagem irá diminuir. Entretanto, materiais mais abertos são menos estáveis e, devido a isso, é desejável manter o material de drenagem o mais denso possível.

A camada de drenagem de pavimento é geralmente colocada paralelamente à superfície e, portanto, na maior parte dos casos, o gradiente hidráulico é regido pela geometria da superfície do pavimento. Para grandes superfícies pavimentadas, como pátio de aeronaves, o tempo de drenagem é mais bem controlado através do projeto do sistema de coleta das águas de infiltração, a fim de minimizar o comprimento do caminho de drenagem. Para drenos de borda ao longo das pistas de táxi e de pouso, pode ser difícil reduzir o comprimento do caminho de drenagem sem recorrer à colocação de drenos sob o pavimento. Pavimentos com inclinações longitudinais longas podem exigir drenos coletores transversais para evitar longos caminhos de drenagem. Assim, para satisfazer os critérios do tempo de drenagem num projeto de drenagem subsuperficial, deve-se levar em conta o tipo de material de drenagem, o comprimento do caminho de drenagem e o gradiente hidráulico.

4.2.4 Localização dos sistemas de drenagem subsuperficial

4.2.4.1 Pavimentos rígidos

No caso dos pavimentos rígidos, a camada de drenagem, quando necessária, deve ser colocada diretamente abaixo da placa de concreto. Na concepção estrutural da placa de concreto, a camada de drenagem, junto com qualquer camada de separação granular, é considerada uma camada de base, e seu benefício estrutural pode ser considerado.

4.2.4.2 Pavimentos flexíveis

No caso dos pavimentos flexíveis, a camada de drenagem deve ser colocada diretamente abaixo da camada de concreto asfáltico ou abaixo da camada de base. Se a espessura desejada de sub-base é igual ou maior que a espessura da camada de drenagem mais a espessura da camada de separação, a camada de drenagem é colocada abaixo da base. Quando a espessura total da estrutura do pavimento for inferior a 300 mm, a camada de drenagem pode ser colocada diretamente abaixo da camada de superfície e a camada de drenagem pode ser utilizada como uma camada base. Quando a camada de drenagem for colocada abaixo da base, é necessário limitar, para a base, o material passante na peneira 0,075 milímetro (n° 200) a 8 por cento.

4.2.4.3 Camada de separação

A camada de drenagem tem de ser protegida contra a contaminação de finos das camadas subjacentes através de uma camada de separação colocada diretamente abaixo dela. Na maioria dos casos, a camada de separação deverá ser de um material composto por agregado graúdo e satisfazer aos requisitos de uma sub-base com CBR 50, podendo ser considerada como parte da sub-base. Para projetos nos quais já existe uma fundação firme ou um solo de subleito favoravelmente resistente, a camada de separação pode ser substituída por um geotêxtil (caso a espessura da camada de separação não seja necessária para fins estruturais).

4.2.5 Propriedades dos materiais

4.2.5.1 Camadas de drenagem

O material utilizado na camada de drenagem deve ser um agregado que tenha estabilidade e que possa resistir à degradação sob tráfego de construção e sob tráfego de serviço. Embora seja desejável para a resistência e para a estabilidade que o agregado seja bem graduado, a permeabilidade do material deve ser mantida. Para a maioria das camadas de drenagem, os materiais devem ter uma permeabilidade mínima de 300 m/dia. Dois tipos de materiais têm sido utilizados em camadas de drenagem: material de drenagem rápida (RDM) e material de graduação aberta (OGM).

O RDM é um material com nível suficientemente elevado de permeabilidade (300 m/dia a 1500 m/dia), servindo como camada de drenagem e apresentando estabilidade necessária para suportar as cargas do tráfego de construção e resistência estrutural para servir como base e/ou sub-base. Já o OGM é um material que tem uma elevada permeabilidade (superior a 1500 m/dia), e que pode ser usado numa camada de drenagem. Entretanto, esse material normalmente necessita de estabilização para servir como base num pavimento flexível, em virtude de sua baixa resistência estrutural e de sua baixa estabilidade de construção.

Os intervalos de granulometria para os dois materiais são indicados na Tabela 3, e as propriedades de projeto são apresentadas na Tabela 4. As granulometrias indicadas na Tabela 3 fornecem intervalos longos, e é possível produzir granulometrias dentro destes intervalos que podem não ser suficientemente estáveis para a construção sem a utilização de estabilização química. A Tabela 5 fornece as especificações de granulometria de três materiais, todos em concordância com os critérios de estabilidade. Para espessuras de camada de drenagem inferior a 6 cm, podem ser utilizadas as granulometrias número 1 ou 2. Para camadas de drenagem de 6 cm ou mais de espessura, qualquer uma das três granulometrias podem ser utilizadas, mas as granulometrias com agregados maiores irão produzir uma camada mais estável. Cada uma das granulometrias descritas irá produzir uma camada de drenagem com permeabilidade de cerca de 300 m/dia.

Tabela 3 – Granulometrias e classificação de materiais utilizados nas camadas de drenagem

Designação da peneira (mm)	Porcentagem passante nas peneiras	
	Material de drenagem rápida (RDM)	Material de graduação aberta (OGM)
38,00	100	100
25,00	70 - 100	95 - 100
19,00	55 - 100	-
12,50	40 - 80	25 - 80
9,50	30 - 65	-
4,75 (n° 4)	0 - 50	0 - 10
2,36 (n° 8)	0 - 25	0 - 5
1,18 (n° 16)	0 - 5	-

Tabela 4 – Propriedades e classificação de materiais utilizados nas camadas de drenagem

Propriedade	Material de drenagem rápida (RDM)	Material de graduação aberta (OGM)
Permeabilidade em m/dia	300 - 1500	> 1500
Porosidade efetiva	0,25	0,32
Porcentagem de faces fraturadas (método da USACE)	90 por cento para CBR 80 75 por cento para CBR 50	90 por cento para CBR 80 75 por cento para CBR 50
C_u	> 3,5	-
Abrasão LA	< 40	< 40
Nota: C_u é o coeficiente de uniformidade = D_{60}/D_{10} .		

Tabela 5 – Granulometria de materiais testados para potencialmente serem utilizados em camadas de drenagem

Tamanho da peneira	Granulometria #1		Granulometria #2		Granulometria #3	
	Porcentagem que passa	Tolerância	Porcentagem que passa	Tolerância	Porcentagem que passa	Tolerância
37,00 mm					100	-5
25,00 mm			100	-5	79	±8
19,00 mm	100	-5	85	±8	66	±8
12,50 mm	78	±8	65	±8	52	±8
9,50 mm	63	±8	53	±8	42	±8
4,75 mm (n° 4)	38	±8	32	±6	25	±6
2,36 mm (n° 8)	19	±6	16	±6	12	±4
1,18 mm (n° 16)	2	±2	2	±2	2	±2

4.2.5.2 Materiais para a camada de separação

A camada de separação impede a infiltração ou o bombeamento de finos para dentro da camada de drenagem e proporciona uma plataforma de trabalho durante a construção e a compactação da camada de drenagem. O material utilizado na camada de separação deve ser um agregado graúdo com CBR máximo de 50, exceto quando o tamanho máximo do agregado for inferior a 0,25 da espessura da camada de separação. A permeabilidade da camada de separação deve ser maior do que a permeabilidade do aterro, mas o material não deve ser tão aberto de forma a permitir o bombeamento de finos para a camada de separação. Para evitar esse bombeamento, a razão de D_{15} da camada de separação para D_{85} do aterro tem que ser menor ou igual a 5. Os requisitos de propriedades de material para a camada de separação estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Critérios para a granulometria da camada de separação

Tamanho máximo do agregado	Menor que 50 mm ou 0,25 da espessura da camada
CBR máximo	50
Porcentagem máxima passante na peneira 2,00 mm (n° 10)	50
Porcentagem máxima passante na peneira 0,075 mm (n° 200)	15
Limite de liquidez máximo	25
Índice de plasticidade máximo	5
D_{15} da camada de separação para D_{85} do subleito	≤ 5

4.2.5.3 Geotêxtil para a camada de separação

Embora o geotêxtil proporcione uma proteção contra o bombeamento, ele não gera estabilidade extra para a compactação da camada de drenagem, por isso, esses tecidos devem ser selecionados somente quando o aterro fornecer suporte adequado para a compactação da camada de drenagem. As características mais importantes do tecido são a força para suportar as cargas de construção e de tráfego e o tamanho de abertura aparente (AOS) para evitar o bombeamento de finos da camada de drenagem. O filtro de tecido utilizado na camada de separação deve ter uma resistência à tração máxima nas duas direções de acordo com a NBR 10319:2013 de 8 kN/m a 50% de alongamento e uma resistência mínima ao puncionamento em conformidade com a NBR 12236:3013 de 0,35 kN. A Tabela 7 fornece os tamanhos de abertura aparentes (AOS).

Tabela 7 – Critérios para o geotêxtil utilizado como camada de separação

Tipo de solo	Critério
Solo com 50% ou menos passante na peneira n° 200	AOS < 0,6 mm Maior que a peneira n° 30
Solo com mais que 50% passante na peneira n° 200	AOS < 0,297 mm Maior que a peneira n° 50

4.3 Drenos Coletores Profundos

4.3.1 Propósito

Os drenos coletores profundos são indispensáveis nos pavimentos que utilizam o sistema de drenagem subsuperficial através de camada drenante e nos pavimentos onde se deseja interceptar o fluxo de água subterrânea através do rebaixamento do lençol freático.

4.3.2 Vazão de projeto

O sistema coletor deve ser capaz de escoar a água captada a partir da camada de drenagem mais a água proveniente do fluxo de água subterrânea originada do

rebaixamento do lençol freático. Para o dimensionamento da vazão do dreno coletor, deve-se considerar separadamente cada uma dessas fontes e, quando for o caso, somá-las para se encontrar a vazão total de projeto.

4.3.2.1 Água proveniente da camada drenante

A quantidade de água coletada pelo sistema originada da camada de drenagem é calculada considerando que essa camada esteja saturada, ou seja, fluindo de forma plena. Assim, o volume de água (Q), em metros cúbicos por segundo por metro, originados da camada de drenagem, assumindo que a camada de drenagem é apenas de um lado do coletor, será:

$$Q = H \cdot i \cdot k, \quad (51)$$

em que:

H = espessura da camada de drenagem (m);

i = gradiente hidráulico (m/m);

k = permeabilidade do material da camada de drenagem (m/s).

Se o sistema coletor tiver a entrada de água em ambos os lados, o volume de projeto a se considerar será duas vezes o volume definido pela equação 51.

4.3.2.2 Água proveniente do rebaixamento do lençol freático

Para se calcular a vazão coletada pelo dreno profundo que se origina do rebaixamento do lençol freático, considera-se o esquema da Figura 11, que apresenta a contribuição apenas de um lado do dreno e uma extensão de 1 m desse dreno.

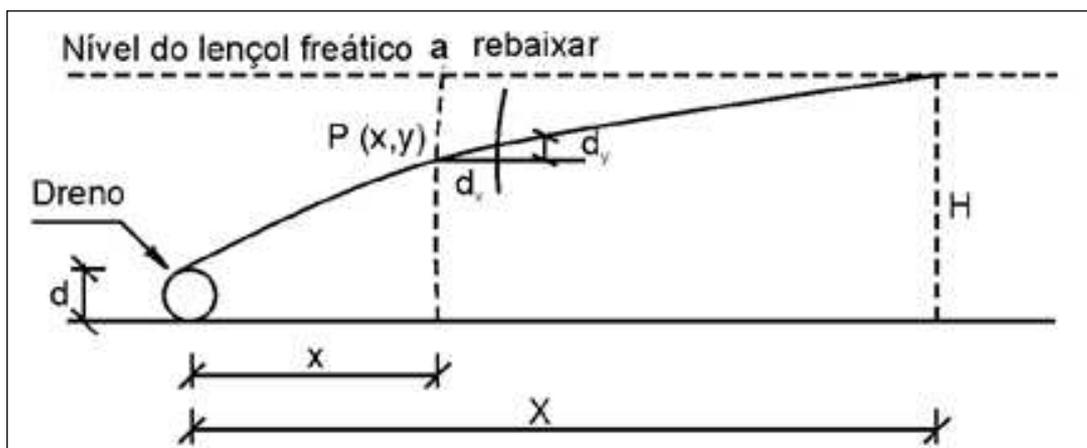


Figura 11 – Rebaixamento do lençol freático (DNIT, 2006)

De acordo com a lei de Darcy, apresentada na equação (31) tem-se:

$$Q = k.A.i, \quad (52)$$

em que:

Q = descarga no meio poroso (m^3/s);

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

A = área da seção normal à direção do fluxo (m^2);

i = gradiente hidráulico (m/m);

H = altura máxima do lençol (m);

X = distância entre o dreno profundo e o ponto de altura máxima do lençol (m).

Considerando um ponto P de coordenadas x e y na linha do lençol freático a ser rebaixado, de largura 1 m, tem-se que:

$$A = y.1 \text{ e } i = dy/dx.$$

Substituindo as relações anteriores na lei de Darcy tem-se:

$$Q = k.y \frac{dy}{dx} \Rightarrow Q.dx = k.y.dy.$$

Integrando toda a equação anterior, tem-se:

$$Q.x = k \frac{y^2}{2} + c. \quad (53)$$

De acordo com a Figura 11, quando $x = 0$, $y = d$ e quando $x = X$, $y = H$. Substituindo na equação 53 algum desses pontos, encontra-se a equação que fornece a vazão coletada pelo dreno coletor devido ao rebaixamento do lençol freático.

$$Q = \frac{k}{2.X}.H^2. \quad (54)$$

4.3.3 Projeto de Drenos Coletores

4.3.3.1 Traçado do sistema de drenagem subterrânea

Os drenos coletores são instalados normalmente ao longo da borda do pavimento, tal como ilustrado na Figura 12. A colocação dos drenos subterrâneos abaixo de regiões onde a carga de tráfego é mais intensa pode resultar em recalques indesejados e deformações excessivas. Por isso, sempre que possível, evita-se esse tipo de concepção e, quando ela é utilizada, realiza-se uma análise mais detalhada da capacidade de suporte da estrutura na região do dreno.

O sistema é composto por, além dos próprios tubos para a coleta das águas, caixas de inspeção, localizadas de acordo com a necessidade prevista pelo projetista, descargas laterais, sempre que o tubo apresentar determinado nível de preenchimento, geotêxteis, para prevenir a entrada de finos no tubo e de um material drenante para preenchimento da vala.

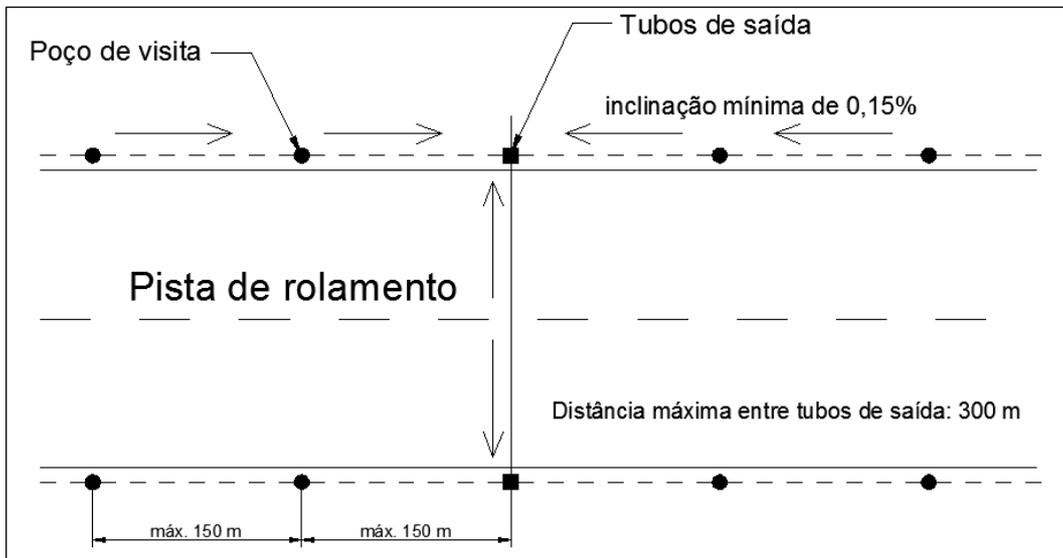


Figura 12 – Visão em planta do sistema de drenagem subterrânea

4.3.3.2 Materiais do sistema coletor

Os materiais empregados em cada um dos componentes do sistema coletor diferenciam-se de acordo com as suas funções, e devem estar de acordo com as prescrições descritas pelo projetista. O tubo coletor pode ser de concreto poroso ou perfurado, cerâmico, de fibro-cimento, de materiais plásticos – nesse caso podendo ser corrugados, flexíveis ou ranhurados – ou mesmo metálicos. A Tabela 8 fornece coeficientes de rugosidade de alguns dos materiais possivelmente empregados nos tubos coletores. Para os materiais drenantes utilizados no reaterro da vala podem-se utilizar britas, cascalho grosso lavado ou qualquer outro material que forneça permeabilidade suficiente e suporte adequado. Em particular, quando o projetista julgar desnecessária a utilização de tubo coletor para os drenos de borda, o sistema coletor recebe o nome de “dreno cego”.

4.3.3.3 Tamanho e inclinação do tubo coletor

O tubo coletor deve ser dimensionado de acordo com a equação 55, a fim de ter uma capacidade suficiente para escoar o fluxo de pico abaixo do pavimento, originado tanto da camada drenante quanto do rebaixamento do lençol freático. A equação 55 é de Manning para o cálculo da capacidade de escoamento pleno de um dreno circular. A equação para o fluxo (Q) em metros cúbicos por segundo é:

$$Q = \frac{1,0}{n} (A) \cdot \left(\frac{d}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot (s)^{\frac{1}{2}}, \quad (55)$$

em que:

n = coeficiente de rugosidade do tubo ($s/m^{1/3}$)

A = área do tubo (m^2)

d = diâmetro do tubo (m)

s = inclinação invertida do tubo (m/m)

O coeficiente de rugosidade para diferentes tipos de tubos podem ser obtidos a partir da Tabela 8. O diâmetro mínimo recomendado para os drenos coletores é de 150 mm. Normalmente o diâmetro mínimo satisfaz o escoamento da maioria das instalações de drenagem subterrânea, excetuando-se longas linhas de interceptação e condições adversas de águas subterrâneas. A inclinação mínima recomendada para os drenos é de 0,15 por cento.

Tabela 8 – Coeficiente de rugosidade de Manning para diferentes tipos de tubos

Tipo de tubo	Coeficiente de rugosidade, n
Argila, concreto, plástico de parede lisa, fibrocimento	0,013
Revestimento betuminoso, tubo de metal corrugado não revestido, tubo de metal corrugado	0,024

4.3.3.4 Instalação da camada de drenagem e do dreno coletor

Em geral, a camada de drenagem é colocada abaixo da superfície de concreto para um pavimento rígido e abaixo da camada de base para um pavimento flexível. Os detalhes da instalação da camada de drenagem estão descritos em 4.2.4.

Já para a instalação dos drenos coletores, as recomendações são de que a vala seja grande o suficiente para apresentar 150 mm de folga de cada lado do tubo e a profundidade da escavação seja suficiente para fornecer um mínimo de 300 mm a partir da parte superior do subleito do pavimento para o centro do tubo, mais 80 mm de profundidade abaixo do tubo. Os detalhes típicos de projetos para a instalação da camada de drenagem e do dreno coletor são apresentados nas Figuras 13, 14, 15 e 16.

A concepção para a instalação dos drenos coletores é baseada no fato de o preenchimento da vala ser de material com permeabilidade suficiente para permitir a drenagem vertical em direção aos tubos coletores. Além disso, o geotêxtil deve ter uma AOS suficiente para não impedir o fluxo de água direcionado ao dreno coletor.

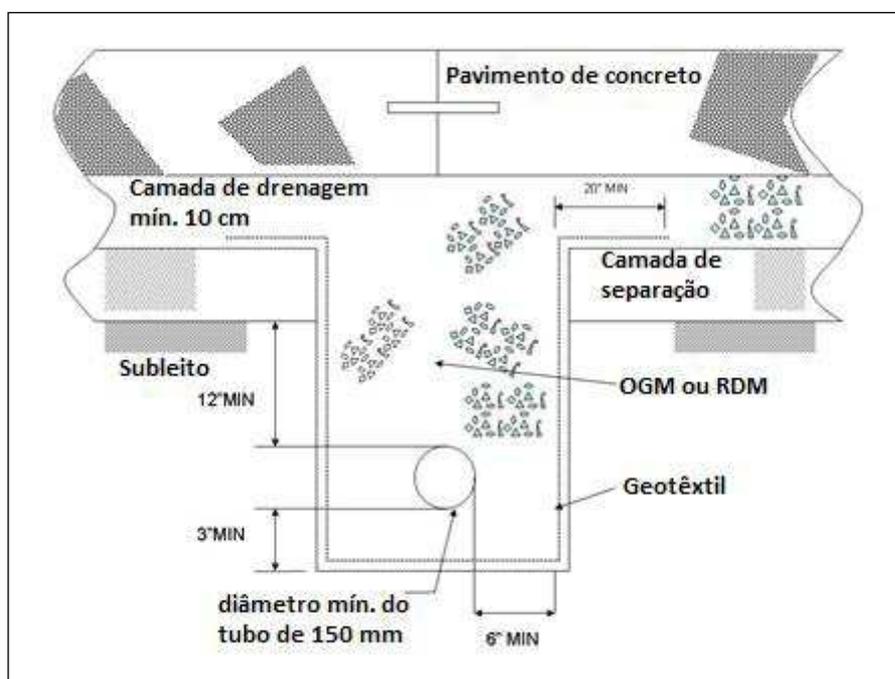


Figura 13 – Detalhe do dreno subterrâneo interior típico de pavimento rígido (FAA, 2009, adaptada)

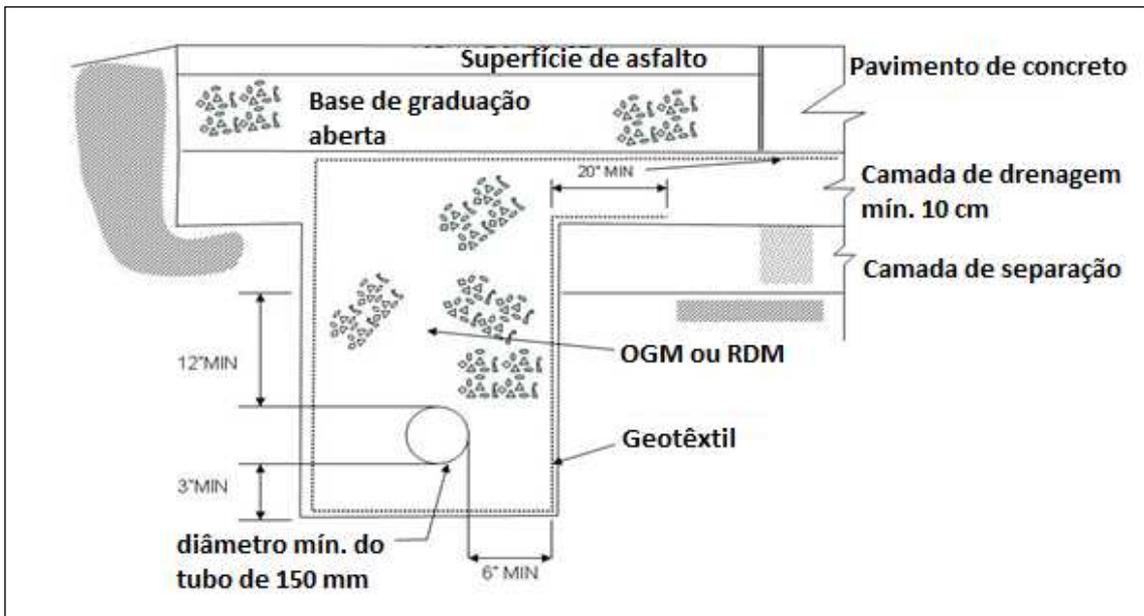


Figura 14 – Detalhe do dreno subterrâneo de borda típico de pavimento rígido (FAA, 2009, adaptada)

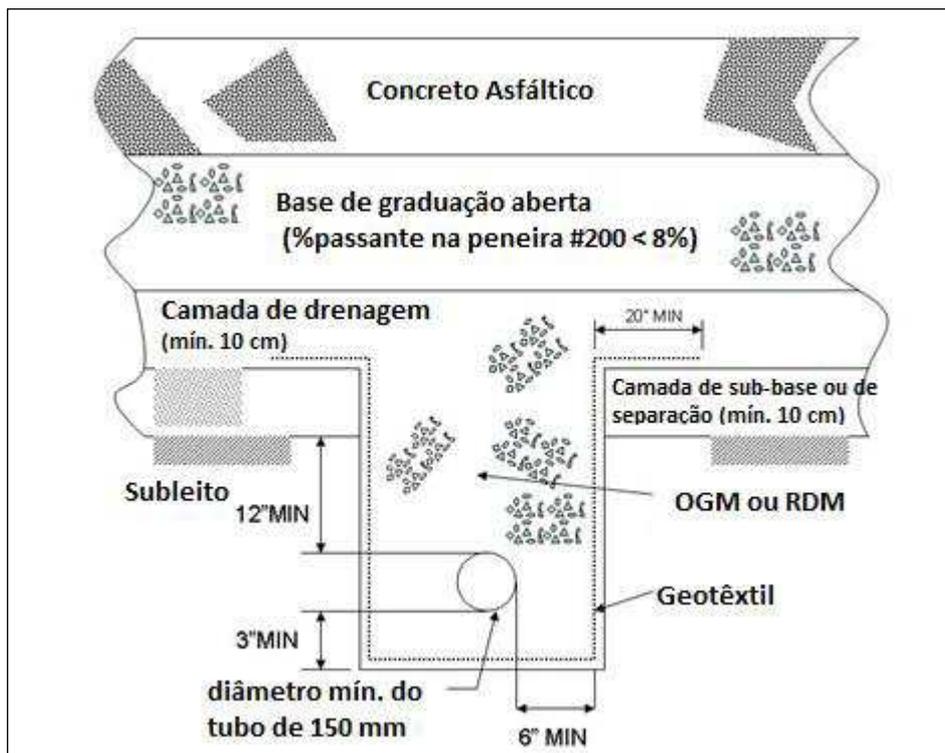


Figura 15 – Detalhe do dreno subterrâneo interior típico de pavimento flexível (FAA, 2009, adaptada)

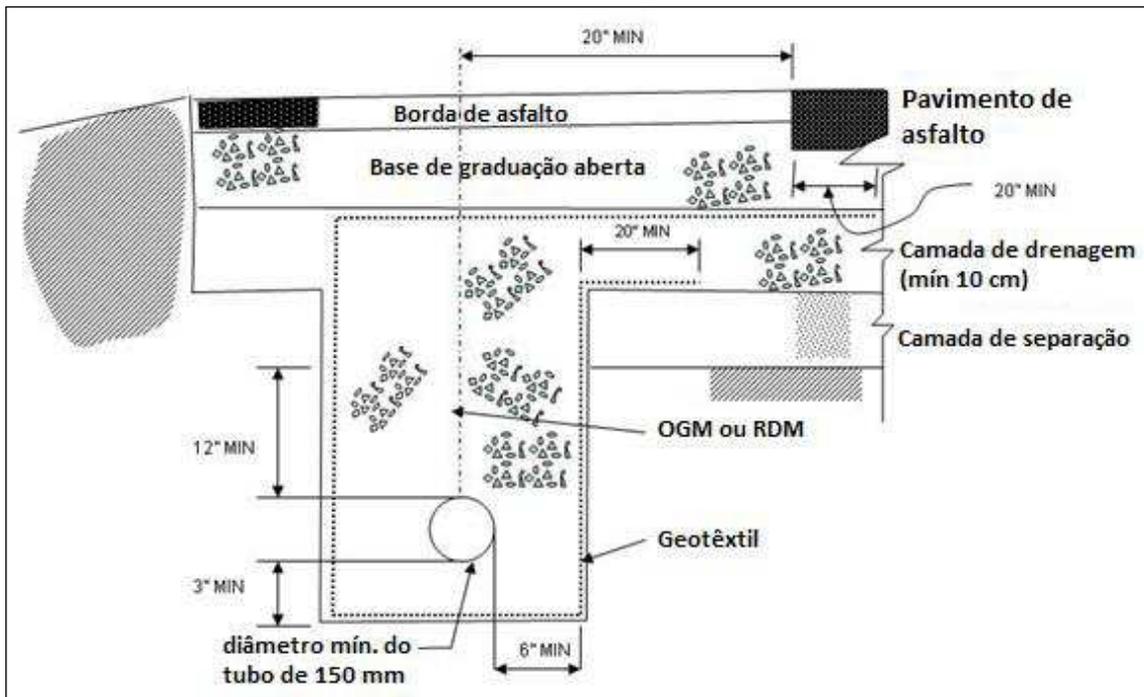


Figura 16 – Detalhe do dreno subterrâneo de borda típico de pavimento flexível (FAA, 2009, adaptada)

4.3.3.5 Reaterro

As valas abertas para instalação dos drenos subterrâneos devem ser recobertas com um material permeável e que possa transmitir rapidamente a água para o tubo de drenagem. O material de preenchimento pode ser tanto um RDM quanto um OGM, ou mesmo outro agregado uniformemente graduado. Um mínimo de 80 mm de agregado deve ser colocado acima do tubo de drenagem. É necessário que no reaterro haja uma compactação adequada ou mesmo uma estabilização química, a fim de se evitar recalques indesejados, sobretudo nos drenos subterrâneos localizados em áreas de tráfego intenso. Ao executar o reaterro, deve-se compactá-lo em camadas de no máximo 200 mm.

4.3.3.6 Geotêxteis nas valas

As Figuras de 13 a 16 fornecem um típico trecho de vala com a utilização de um geotêxtil. O geotêxtil deve ser colocado para separar o aterro permeável da vala a partir dos materiais do subleito ou da sub-base, mas isso não deve impedir o fluxo de água a partir da camada de drenagem para o tubo. O geotêxtil deve também proteger o tubo coletor da infiltração de finos de quaisquer camadas de superfície. Isto é particularmente

importante para os drenos colocados fora da zona do pavimento, onde a água pode entrar na superfície de drenagem através da superfície do solo. O geotêxtil para a vala deve atender aos critérios descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Critérios para os geotêxteis utilizados na construção das valas

Características do solo ou do geotêxtil	Método de teste ABNT	Critérios
Solo com 50% ou menos passante na peneira n° 200	NBR 15224: 2005	AOS < 0,6 mm (Peneira n° 30)
Solo com mais de 50% passante na peneira n° 200	NBR 15224: 2005	AOS < 0,297 mm (Peneira n° 50)
Resistência mínima à tração com 50% alongamento	NBR 10319:2013	0,6 kN
Resistência mínima ao puncionamento	NBR 12236: 2013	0,25 kN

4.3.3.7 Cobertura da vala

Os drenos de borda instalados do lado externo da área pavimentada devem ser recobertos com uma camada de material de baixa permeabilidade, como uma superfície de asfalto estabilizada, por exemplo, para reduzir a infiltração da água da superfície para o sistema de drenagem subterrânea.

4.3.4 Saídas laterais

4.3.4.1 Projeto

As saídas laterais fornecem meios de condução da água para fora dos drenos coletores e possibilitam a limpeza e a inspeção do sistema. Os tubos coletores devem ser instalados com saídas laterais espaçadas em intervalos de 90 m a 150 m. Para facilitar a limpeza dos drenos, os tubos de saídas laterais devem ser colocados num ângulo de aproximadamente 45 graus a partir da direção de fluxo do dreno coletor subterrâneo. O tubo lateral deve ser de metal ou de parede rígida sólida e deve ser equipado com uma estrutura na saída. Recomenda-se um declive de 3 por cento a partir da borda de

drenagem para a estrutura de saída. Sempre que possível, os tubos de saída lateral devem ser ligados aos bueiros, a fim de reduzir a manutenção. Os tubos colocados nas saídas laterais devem ter um diâmetro mínimo de 150 mm. Para evitar o bombeamento, as valas dos tubos de saída devem ser recobertas com um material de baixa permeabilidade. Recomenda-se a instalação de saídas duplas, a fim de facilitar a manutenção, pois o sistema de dupla saída permite que seções de drenos coletores sejam liberadas para a limpeza. A Figura 17 apresenta o esquema de dupla saída. A seguir são apresentados alguns detalhes adicionais de projeto para as saídas laterais.

(a) Nas saídas duplas, as curvaturas dos drenos devem ter grande raio, como mostrado na Figura 18.

(b) Nas saídas laterais deve-se utilizar tubos com paredes rígidas e não perfurados. Normalmente utiliza-se o mesmo diâmetro do dreno coletor. A capacidade de escoamento das saídas deve ser maior do que nos drenos coletores. Em geral, por causa da maior inclinação prevista nos tubos de saída, a capacidade hidráulica não é um problema.

(c) Recomenda-se que a extremidade do tubo de saída lateral em descarga tenha diâmetro de pelo menos 150 mm acima do projetado para o fluxo. Esta exigência aplica-se mesmo se a saída estiver desaguando em entradas de bueiros.

4.3.4.2 Emissário para tubo de saída

O emissário para o tubo de saída deve ser fornecido com um headwall (ou muros de testa) para proteger o tubo de saída de danos, evitar a erosão do talude e facilitar a localização dos tubos de saída. Headwalls devem ser colocados alinhados com a inclinação, de modo a que as operações de corte não sejam prejudicadas. Telas facilmente removíveis devem ser instaladas no tubo de saída, a fim de evitar que insetos entrem no tubo. O headwall pode ser pré-moldado ou executado in loco. A Figura 20 ilustra um exemplo de uma concepção para um headwall.

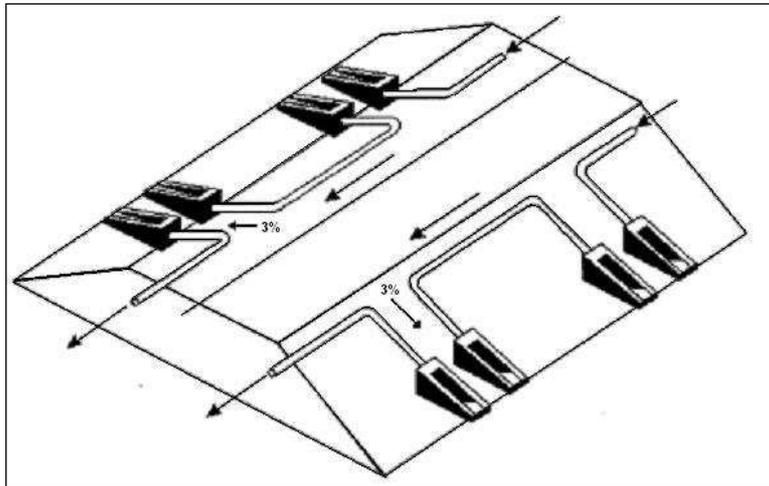


Figura 17 – Desenho esquemático do sistema de saída dupla (FAA, 2009, adaptada)

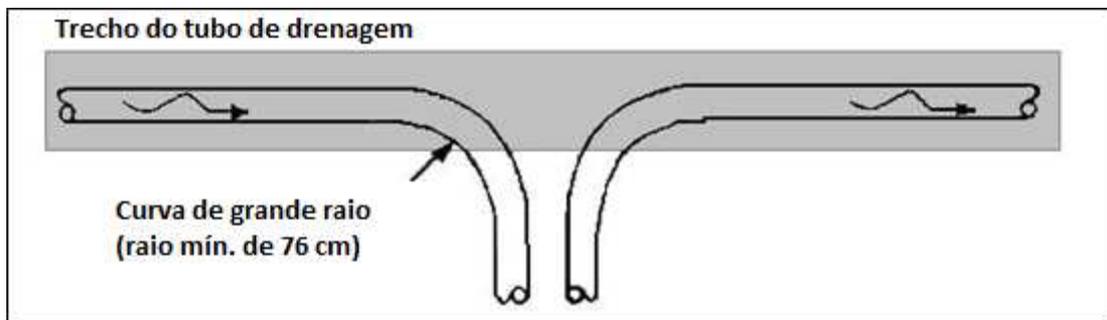


Figura 18 – Ilustração de curvas de grande raio recomendado para saídas de drenagem (FAA, 2009, adaptada)

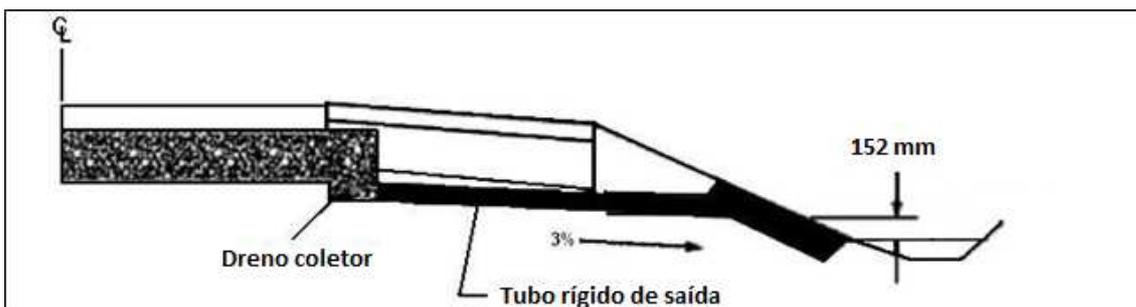


Figura 19 – Detalhe da saída de drenagem recomendada (FAA, 2009, adaptada)

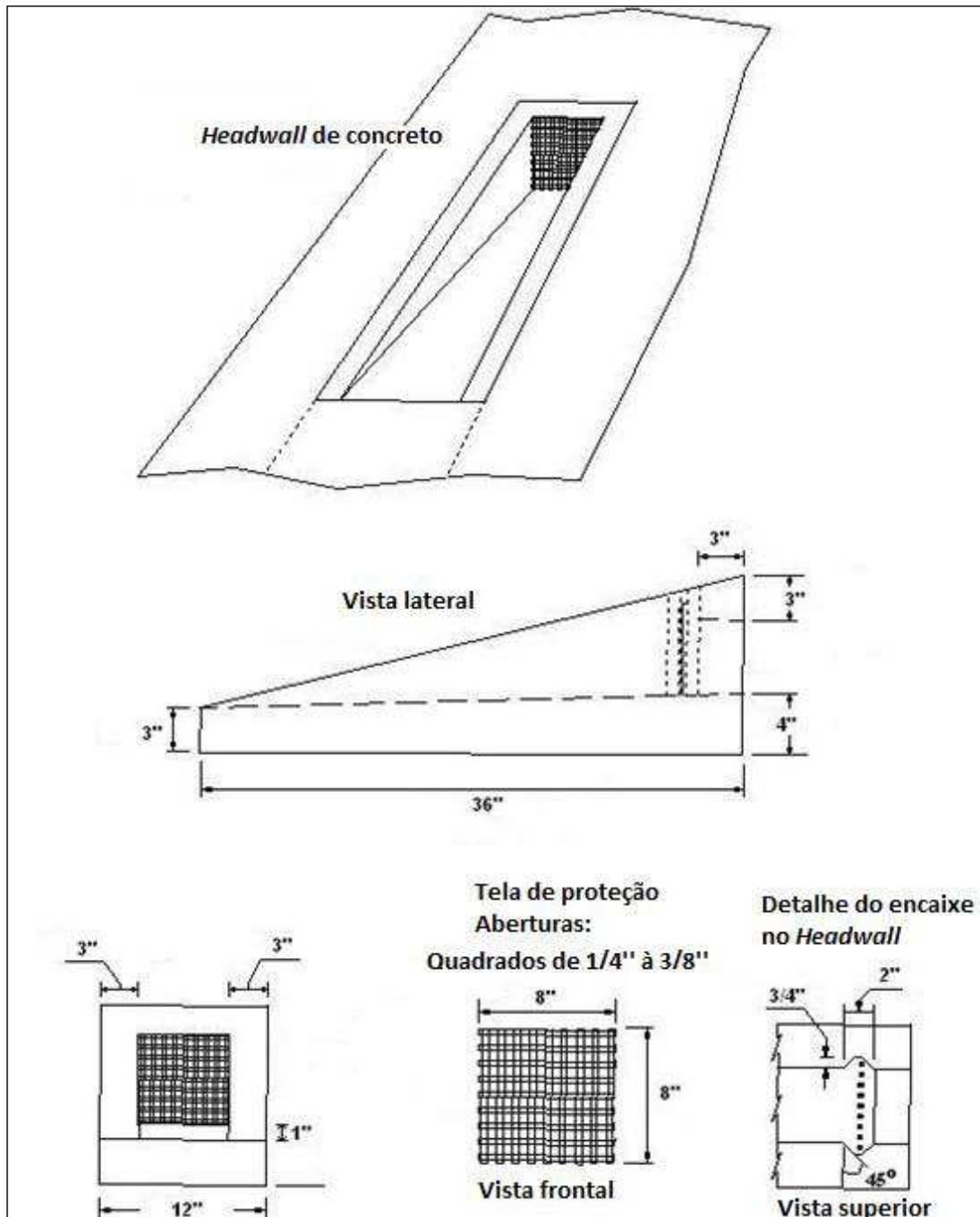


Figura 20 – Exemplo de projeto para um headwall (FAA, 2009, adaptada)

5 ESTUDO DE CASO

Após a descrição do Manual de Drenagem Subsuperficial e Subterrânea, apresentado no item 4, realizou-se um estudo de caso, aplicando, a um aeroporto real, os conceitos vistos anteriormente. Para tal, optou-se por estudar e dimensionar a drenagem subsuperficial do Aeroporto Internacional Salgado Filho, situado em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. A escolha se baseou no histórico existente no aeroporto relacionado a problemas de drenagem e na base de dados existentes sobre o sítio aeroportuário – dados de chuva, de solo, curvas de nível da região, entre outros.

O Aeroporto Internacional Salgado Filho, situado na cidade de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, é o principal aeroporto da região sul do país, com uma frequência de cerca de 200 voos diários. Ele se localiza próximo à Baía de Guaíba e à Lagoa dos Patos, região que apresenta lençol freático relativamente elevado. A pista tem comprimento de 2 280 m e largura de 42 m. De acordo com Torres (2010), ambas as cabeceiras, 11 e 29, possuem uma elevação de 3 m em relação ao nível do mar, o pavimento da pista de rolamento é flexível e a resistência do subleito é baixa, indicando um CBR entre 4 e 8. De acordo com a INFRAERO, o complexo aeroportuário possui 25 posições de paradas de aeronaves de grande porte, além de outras 17 posições de parada para aeronaves de pequeno porte, num total de 142 750 m² de área de pátio. A Figura 21, mostra uma fotografia aérea do complexo aeroportuário.



Figura 21 – Aeroporto Internacional Salgado Filho (Borges, 2012)

No presente estudo de caso será dimensionada apenas a camada drenante para o pavimento da pista principal do aeroporto, mesmo havendo a preocupação com a profundidade do lençol freático. Um estudo realizado por Vertamatti e Aranha (1984) verificou que os drenos profundos já existentes na estrutura do pavimento praticamente não são utilizados para interceptação do lençol freático. Mesmo em regimes de chuvas intensas, em torno de 11 mm/h de intensidade, num total de 31 mm de precipitação, os drenos permaneciam praticamente secos. Isso ocorria devido ao greide da pista apresentar uma elevação suficiente para que as águas de infiltração não fossem capazes de elevar o lençol freático a ponto de atingir e prejudicar a estrutura do pavimento.

Para o dimensionamento da camada drenante, situada abaixo do pavimento na pista principal do aeroporto, é necessária uma série de informações e de dados acerca da pista e da região, tais como precipitação, infiltração, geometria da pista, características do solo, etc. A seguir serão descritos os processos de obtenção de cada uma dessas informações, bem como o dimensionamento propriamente dito da camada drenante.

5.1 Precipitação

A primeira informação necessária no dimensionamento da camada drenante é a precipitação na região do aeroporto. Para isso, é necessário que se encontre a equação idf da cidade de Porto Alegre. Silveira et al (2000) estudaram dois postos pluviográficos para a cidade e encontrou equações idf's para cada um desses postos. Baseado no tamanho das séries de registros pluviográficos disponíveis para cada posto em estudo, Silveira et al (2000) utilizaram técnicas considerando séries anuais, que consiste em, para cada duração de interesse, obter a maior intensidade de chuva para cada ano de registro, independentemente do seu valor. Foram coletados, para cada um dos postos estudados, séries de máximos anuais. Cada uma dessas séries foi ajustada para uma distribuição estatística de Gumbel, com parâmetro determinado pelo método dos momentos. Os postos analisados situam-se no aeroporto e no 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME). Como a camada drenante será dimensionada para a pista do aeroporto, a equação idf de interesse é a originada deste posto. Assim, Silveira et al (2000) encontrou a equação idf para o posto pluviográfico situado no aeroporto, descrita pela equação 56.

$$i_{\max} = \frac{826,806 \cdot Tr^{0,143}}{(td + 13,326)^{0,793}}, \quad (56)$$

em que:

i_{\max} é a intensidade máxima de precipitação (mm/h);

Tr é o período de retorno (anos);

td a duração da chuva (minutos).

Para o dimensionamento da camada drenante, as recomendações do manual, descritas em 4.2.2.1 e em 4.2.3.2, são de que a duração do evento de chuva seja de 1 hora e o período de retorno seja de 2 anos. Essas considerações se baseiam no fato de que, após a camada drenante estar saturada, toda a precipitação será drenada pelo sistema de drenagem superficial. Portanto, um período de retorno de 2 anos e um tempo de duração de 1 hora, já se considerando a equação idf baseada em máximos anuais, é o suficiente para saturar a camada drenante, fazendo com que, a partir de então, toda a precipitação escoe superficialmente pelo pavimento.

De posse da equação e dos dados de período de retorno e de duração da chuva, tem-se que a intensidade de chuva a se considerar no dimensionamento da camada drenante para o Aeroporto Internacional Salgado Filho é de:

$$i_{\max} = 30,30 \text{ mm/h.}$$

5.2 Infiltração

Depois de calculada a precipitação de projeto, o próximo passo é encontrar quanto desse valor efetivamente se infiltra na estrutura do pavimento. Sabe-se que para um pavimento recém-construído ou recém-restaurado, a taxa de infiltração é praticamente nula. Moreira (1989) efetuou experimentos em pavimentos flexíveis novos e verificou que a quantidade de água que se infiltra em um pavimento é extremamente pequena quando comparada à parte que escoar superficialmente.

Em pavimentos flexíveis recém-construídos ou recém-restaurados praticamente não há trincas na superfície e, conseqüentemente, não há locais pelos quais a água possa se infiltrar. Mesmo que haja trincas, o CBUQ do pavimento flexível, quando pouco oxidado, apresenta o efeito da auto selagem através da passagem da carga de tráfego. Devido à fluência do material, em temperaturas elevadas, trincas são seladas pelo próprio material quando submetido às cargas de utilização, desde que este esteja pouco oxidado.

Já em pavimentos rígidos, mesmo havendo trincas devido à retração do CCP, no início da vida útil da estrutura essas trincas devem ser devidamente seladas, impossibilitando a infiltração de água na estrutura do pavimento.

Todavia, a necessidade do sistema de drenagem subsuperficial é mais sentida após algum tempo de uso do pavimento. Ao aparecerem trincas, havendo um sistema de drenagem subsuperficial atuante na estrutura do pavimento, os problemas decorridos da infiltração de água serão minimizados, fazendo com que o pavimento possa continuar em operação, mesmo com essas trincas e, caso haja a necessidade de uma restauração, essa seja simplificada e condicionada à superfície da estrutura, não tendo sido afetada as camadas inferiores.

Sendo assim, deve se considerar como situação para a determinação da quantidade de água infiltrada não o pavimento recém-construído ou recém-restaurado, mas sim pavimentos desgastados, já com vários anos de utilização.

Como descrito em 4.2.3.2, a determinação de um valor preciso para o coeficiente de infiltração de um pavimento em particular é extremamente difícil devido à série de variáveis envolvidas (tipo de pavimento, tipo de drenagem superficial, manutenção do pavimento, estado estrutural, etc). Assim, considera-se, de forma conservadora, que 50% da precipitação de projeto se infiltra na estrutura do pavimento. Logo, tem-se que, a precipitação de infiltração é de:

$$i_{\text{infiltração}} = 15,15 \text{ mm/h.}$$

5.3 Grandezas Geométricas

Para que se possa calcular a espessura da camada drenante, é necessário conhecer uma série de grandezas geométricas da pista de pouso do aeroporto em questão. Conhecidas essas grandezas torna-se possível encontrar o comprimento do caminho de drenagem, necessário aos cálculos seguintes. Diversas grandezas geométricas da pista podem ser obtidas através da Carta do Aeródromo (Aerodrome chart), conhecida como Carta ADC, disponível no “Serviço de Informação Aeronáutica” (<http://www.aisweb.aer.mil.br>). A carta ADC do Aeroporto Internacional Salgado Filho está mostrada nas Figuras 22 e 23.

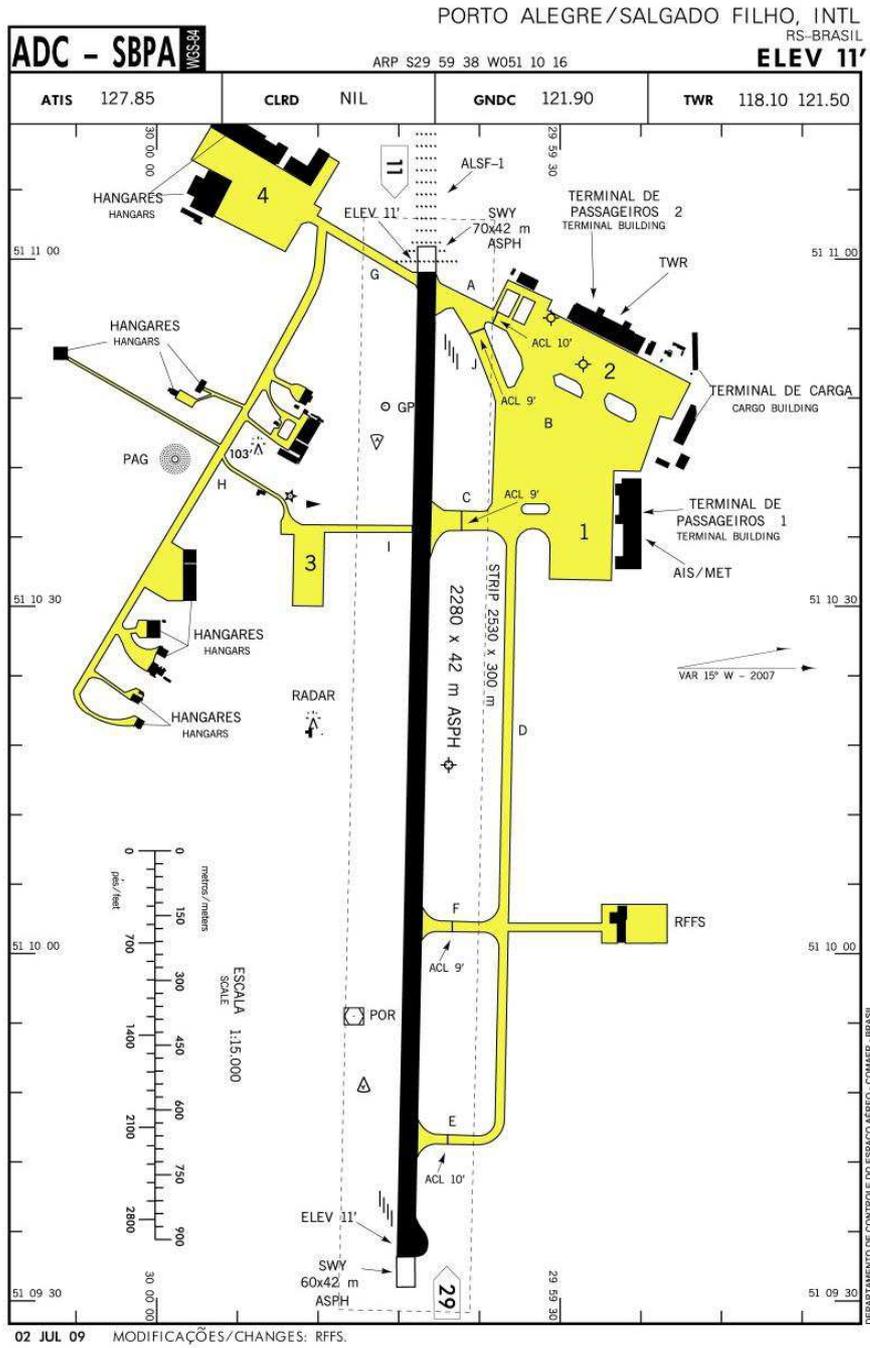
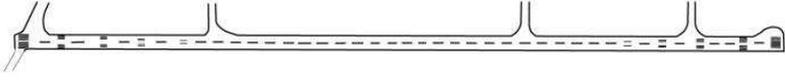
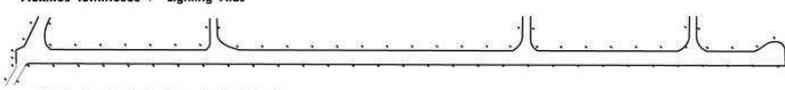


Figura 22 – Folha 1 da carta ADC do Aeroporto Internacional Salgado Filho
Fonte: <http://www.aisweb.aer.mil.br>

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / PHYSICAL CHARACTERISTICS												
PISTA RUNWAY				DIMENSÕES(m) DIMENSIONS(m)					PCN		TIPO DE SUPERFÍCIE SURFACE KIND	
RWY	BRG MAG	Tipo Type	RCD	RWY	SWY	CWY	RESA	STRIP	RWY	RWY	SWY	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	i	k	l	
11	106	PA 1	4		60x42	—	—	2530			ASPH	
29	286	NPA	4	2280x42	70x42	—	—	X 300	62/F/C/X/T	ASPH	ASPH	
DISTÂNCIAS DECLARADAS, AUXÍLIOS VISUAIS E COORDENADAS DAS CABECEIRAS DECLARED DISTANCES, VISUAL AIDS AND THRESHOLD COORDINATES												
RWY	TORA(m)	ASDA(m)	TODA(m)	LDA(m)	AUXÍLIOS / AIDS		ALTURA GEODAL(m) GEOD HEIGHT(m)		COORDENADAS COORDINATES			
11	2280	2340	2280	2280	ALSF - 1		4,57		S29 59 40 W051 10 59			
29	2280	2350	2280	2280	PAPI		4,53		S29 59 41 W051 09 34			
SERVIÇO DE SALVAMENTO E CONTRA-INCÊNDIO / RESCUE AND FIRE FIGHTING SERVICE : RFFS CAT-9												
RWY 11 / 29												
Sinalização horizontal / Marking Aids												
												
Auxílios luminosos / Lighting Aids												
												
Perfil longitudinal / Longitudinal Profile												
												
RMK: (1) RWY 29 MEHT PAPI: 45' (2) RWY 11 MEHT PAPI: 68' (3) GROOVED : RWY 11/29												

02 JUL 09

Figura 23 – Folha 2 da carta ADC do Aeroporto Internacional Salgado Filho
Fonte: <http://www.aisweb.aer.mil.br>

De acordo com as concepções de projetos de camadas drenantes, essas se situam abaixo da superfície do pavimento e com espessura constante. Sendo assim, os comprimentos, larguras e declividades irão seguir os mesmos valores da superfície. Como detalhado nas Figuras 22 e 23, a pista apresenta comprimento total de 2 280 m e largura total de 42 m. Além disso, não há declividade longitudinal ao longo do greide da pista. A carta não fornece a declividade transversal da pista, grandeza necessária para se

encontrar o comprimento do caminho de drenagem. Sendo assim, adota-se, conservadoramente, o valor de 1%. Como a superfície da pista apresenta a forma convexa, tipo “chapéu”, para o cálculo do comprimento do caminho de drenagem, considera-se somente metade da largura da pista, ou seja, 21 m.

Por não haver inclinação longitudinal na pista, o comprimento do caminho de drenagem, calculado através da equação 42, é simplesmente o comprimento de metade da largura da pista, ou seja, 21 m, e o gradiente hidráulico é a própria inclinação transversal da pista, considerado aqui como sendo de 1%. Sendo assim, obtêm-se as grandezas:

$$L = 21 \text{ m e}$$

$$i = 0,01 \text{ m/m.}$$

5.4 Espessura da camada drenante e material utilizado

A espessura da camada drenante é baseada na capacidade dessa camada de armazenar água e na propriedade de escoamento horizontal dela. Utilizando-se a equação 48 é possível calcular a espessura da camada drenante para o aeroporto em questão. Entretanto, o Manual de Drenagem Subsuperficial e Subterrânea, descrito em 4, diz que caso o caminho de drenagem ultrapasse o valor de 6 m, o termo (k.i.t) pode ser suprimido da equação 48, e a espessura da camada drenante passa a ser calculada pela equação 49. Isso se deve ao fato de que, caso o caminho de drenagem seja maior do que 6 m, a capacidade de armazenamento dessa camada é muito maior do que sua capacidade de escoamento, podendo, então, ignorar o termo (k.i.t). Para o Aeroporto Internacional Salgado Filho, como o comprimento do caminho de drenagem é de 21 m, a equação utilizada para o cálculo da espessura da camada de drenagem foi a equação 49.

Das grandezas necessárias ao cálculo da espessura da camada drenante através da equação 49, tem-se que:

$$F = \text{coeficiente de infiltração} = 0,5;$$

$$R = \text{índice de chuva de projeto} = 30,30 \text{ mm/h} = 0,0303 \text{ m/h};$$

$$t = \text{duração da chuva de projeto} = 1 \text{ h};$$

$$n_e = \text{porosidade efetiva.}$$

A única grandeza dentre as necessárias ao cálculo da espessura da camada drenante de que não se tem conhecimento previamente é a porosidade efetiva. Ela

depende do tipo de material utilizado na camada e pode representar uma decisão do projetista, através de pesquisas dos solos disponíveis da região, a fim de minimizar custos advindos do transporte de material. Torna-se necessário, então, realizar experimentos de laboratório nos solos da região a fim de se encontrar o valor da porosidade efetiva para tais amostras. Uma pesquisa inicial pode ser realizada através de dados disponíveis em mapas pedológicos da região, dentre esses os disponíveis no RADAM (Folha SH 22 Porto Alegre, volume 33, 1980). Os dados do RADAM fornecem uma orientação inicial de onde deve se iniciar a coleta das amostras. Dentre esses dados, apresentam-se as composições granulométricas, separadas por horizontes e divididas em pedregulho (maior do que 20 mm), cascalho (entre 20 mm e 2 mm), areia grossa (entre 2 mm e 0,2 mm), areia fina (entre 0,2 mm e 0,05 mm), silte (entre 0,05 mm e 0,002 mm) e argila (menor que 0,002 mm), a formação geológica, a localização, o relevo local, a altitude do local, dentre outras características dos solos e da região. Apenas a título de ilustração, a Figura 24 apresenta o Mapa Pedológico da região de Porto Alegre, focalizado num raio de 80 km a partir do Aeroporto Internacional Salgado Filho, com a descrição e algumas características de 5 tipos de solos existentes em torno da região, baseados em dados disponíveis do RADAM (Folha SH 22 Porto Alegre, volume 33, 1980).

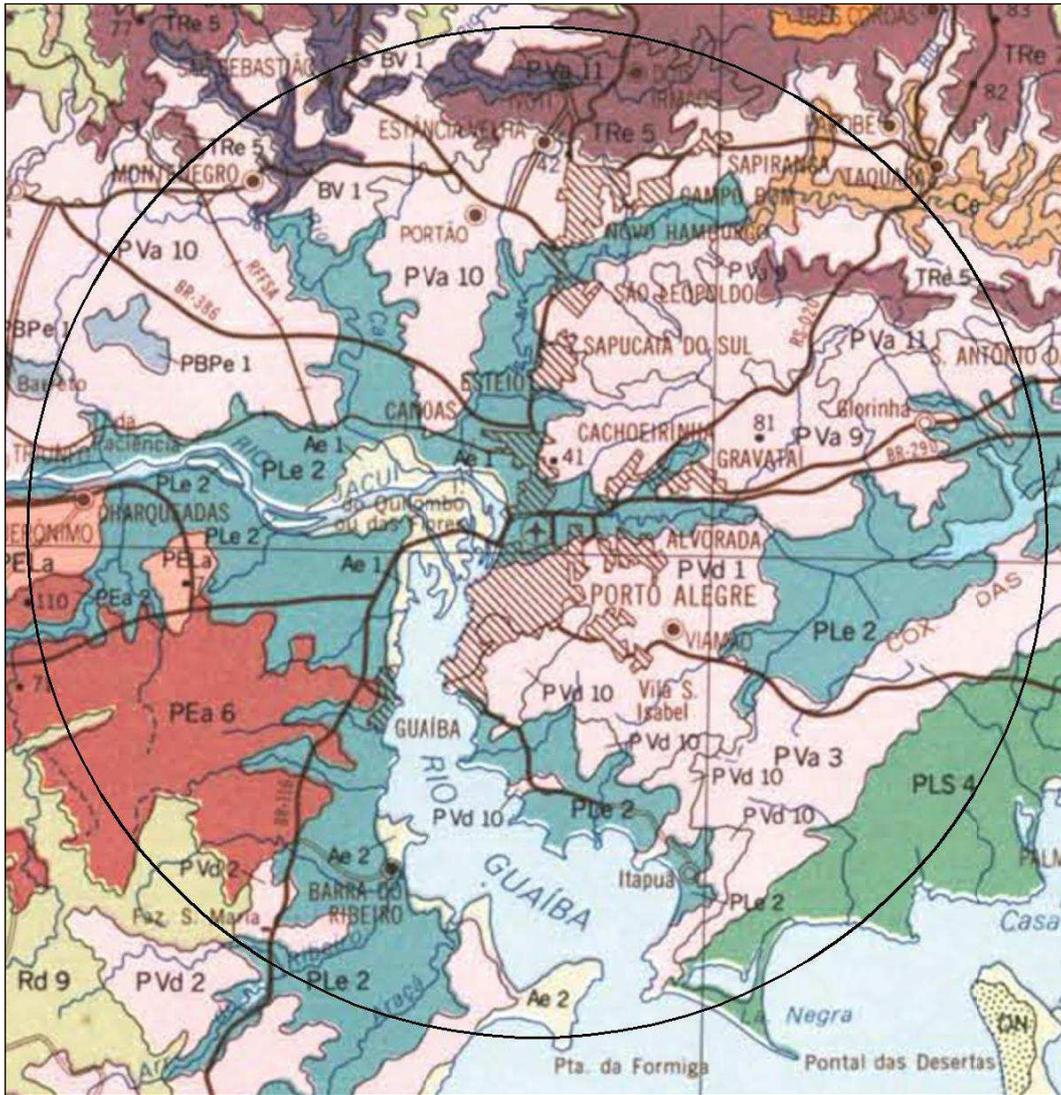


Figura 24 – Mapa pedológico da região de Porto Alegre num raio de 80 km a partir do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Folha SH 22 Porto Alegre, volume 33, 1980)

As classificações de alguns solos descritas na região demarcada do mapa são:

- PVd: podzólico bruno-acinzentado distrófico, argila de atividade alta a proeminente, textura média/argilosa, relevo suave ondulado.
- PEa: podzólico bruno-acinzentado planossólico álico, argila de atividade alta a moderada, textura média/argilosa, relevo suave ondulado.
- PBPe: podzólico bruno-acinzentado, Planossólico eutrófico, argila de atividade alta, textura média, relevo suave ondulado.
- TRe: solo litótico eutrófico a chernozêmico, textura argilosa, relevo ondulado.
- PVa: podzólico vermelho-amarelado álico com argila de atividade baixa, abrúptico a moderado, textura arenosa/argilosa, relevo suave ondulado.

As Tabelas de 10 a 14 apresentam a composição granulométrica para cada um desses solos, divididas em horizontes.

Tabela 10 – Composição granulométrica para o solo PEa

Profundidade do horizonte	Composição Granulométrica (%)					
	Pedregulho	Cascalho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
0 cm – 10 cm	0	0	45	15	21	19
10 cm – 17 cm	0	0	39	14	22	25
17 cm – 55 cm	0	1	25	12	16	47
55 cm – 70 cm	5	7	19	8	23	50
70 cm – 87 cm	0	1	9	4	33	54
87 cm – 120 cm	0	0	3	2	35	60

Tabela 11 – Composição granulométrica para o solo PVd

Profundidade do horizonte	Composição Granulométrica (%)					
	Pedregulho	Cascalho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
0 cm – 20 cm	0	2	57	12	20	11
20 cm – 38 cm	0	3	43	13	24	20
38 cm – 57 cm	0	2	35	8	19	38
57 cm – 92 cm	0	2	30	9	17	44
92 cm – 120 cm	0	2	37	9	14	40

Tabela 12 – Composição granulométrica para o solo PBPe

Profundidade do horizonte	Composição Granulométrica (%)					
	Pedregulho	Cascalho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
0 cm – 20 cm	0	0	24	32	30	14
20 cm – 40 cm	0	0	25	31	28	15
40 cm – 55 cm	0	1	21	23	33	23
55 cm – 75 cm	0	0	2	13	63	22
75 cm – 115 cm	0	0	2	17	72	10

Tabela 13 – Composição granulométrica para o solo PVa

Profundidade do horizonte	Composição Granulométrica (%)					
	Pedregulho	Cascalho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
0 cm – 20 cm	0	0	36	44	12	8
20 cm – 42 cm	0	0	35	42	13	10
42 cm – 65 cm	0	0	33	45	15	7
65 cm – 80 cm	0	0	29	45	15	11
80 cm – 103 cm	0	0	19	30	13	38
103 cm – 125 cm	0	0	18	27	9	46

Tabela 14 – Composição granulométrica para o solo TRe

Profundidade do horizonte	Composição Granulométrica (%)					
	Pedregulho	Cascalho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
0 cm – 30 cm	0	8	25	23	17	35

A partir desses dados torna-se possível iniciar a coleta em campo a fim de ensaiar as amostras. Depois de ensaiadas, determina-se se os solos apresentados anteriormente se enquadram na classificação de Material de Graduação Aberta (OGM) ou Material de Drenagem Rápida (RDM), a partir da porosidade efetiva e da permeabilidade encontradas. Conhecendo o valor da porosidade efetiva do material a ser utilizado na camada drenante, basta apenas substituí-lo na equação 49, juntamente com os valores do índice de chuva de projeto, do coeficiente de infiltração e da duração da chuva de projeto, para se encontrar a espessura da camada drenante a ser utilizada no pavimento.

Outra maneira de se dimensionar a espessura da camada drenante, ainda sem saber qual material utilizar, é adotar medidas construtivas para a camada e, através da equação 49, encontrar qual a porosidade efetiva atende àquela espessura adotada. Camadas com menos de 10 cm de espessura não são recomendadas, devido às dificuldades de construção. Sendo assim, realiza-se uma série de testes, com espessuras de camadas a partir de 10 cm, a fim de obter possíveis valores de porosidade efetiva. Com isso, e tendo conhecimento dos solos disponíveis na região, torna-se possível uma análise mais embasada sobre qual material utilizar na camada drenante. A Tabela 15

apresenta valores possíveis de porosidade efetiva para diferentes espessuras da camada de drenagem.

Tabela 15 – Porosidades efetivas para diferentes valores de espessura da camada drenante

Espessura da camada drenante (cm)	Porosidade efetiva necessária
10	0,178
11	0,162
12	0,149
13	0,137
14	0,127
15	0,119
16	0,111
17	0,105
18	0,099
19	0,094
20	0,089

Com isso, tornou-se possível determinar o material a ser utilizado na camada drenante bem como a espessura dessa camada. Supondo-se a utilização de um RDM, com porosidade efetiva de 0,25, uma espessura mínima de 10 cm já satisfaz os requisitos.

5.5 Verificação para o tempo de drenagem

Definidas a espessura e o material utilizado na camada drenante, é necessário verificar o tempo de drenagem dessa camada. De acordo com o manual, por se tratar de um aeroporto de grande porte, se a camada de drenagem ficar saturada, o sistema deve ser capaz de drenar 85% da água infiltrada em 24 horas. O tempo de drenagem de 85% é dado pela equação 50. Sendo $L = 21$ m, $n_e = 0,25$ (supondo a utilização de um RDM), $i = 0,001$ m/m e $k = 300$ m/dia (considerando o pior caso de um RDM), tem-se:

$$T_{85} = \frac{n_e \cdot L}{i \cdot k} = \frac{0,25 \cdot 21}{0,001 \cdot 300} = 17,5 \text{ horas.}$$

Como o tempo encontrado necessário para drenar 85% da camada foi inferior a 24 horas, tem-se que o material utilizado na camada drenante satisfaz à verificação para o tempo de drenagem. Caso o resultado não satisfizesse ao critério, ou seja, o tempo de drenagem de 85% da camada fosse superior a 24 horas, uma das soluções seria alterar o material utilizado na camada drenante. Feito isso, seria necessário voltar ao passo anterior e recalcular a espessura da camada drenante necessária. Outra solução seria alterar o caminho de drenagem, fazendo com que a camada drenante não se prolongasse até o bordo da pista, ou seja, que os drenos coletores se situassem a uma distância menor do que 21 m do eixo principal.

6 RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho priorizou analisar uma série de problemas advindos de um ineficiente sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea e de propor um método de dimensionamento para esse sistema, baseando-se, para isso, nas diretrizes do Apêndice G do Advisory Circular 150/5320-5C, modificação 1, da Federal Aviation Administration (FAA, 2009). Mesmo tendo sido realizado um estudo de caso, esse não se aprofundou nas características dos materiais utilizados. Sugere-se que trabalhos posteriores, que se baseiem nesse e em outros relativos ao assunto, possam estudar materiais e definir, por exemplo, permeabilidade e porosidade efetiva para uma gama de solos existentes numa determinada região do Brasil. É necessário que se realize também ensaios que relacionem a capacidade de suporte dos solos, compactados em diferentes energias de compactação, com sua permeabilidade e sua porosidade efetiva. Outros casos não abordados no trabalho são as influências de adição de cimento, com o intuito de estabilizar os solos, na permeabilidade e na porosidade efetiva.

Podem-se analisar também os custos envolvidos no projeto e na construção de pavimentos com sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea. Obviamente esses custos devem ser avaliados em longos prazos, devido à importância de o sistema ser economicamente sentida quando for necessária uma restauração da via.

Há, ainda, estudos a serem realizados relacionando as variações climáticas em determinadas regiões com possíveis variações do nível do lençol freático. Esses estudos

poderiam prever as necessidades futuras de instalações de sistemas de drenagem subterrânea, ou mesmo da falta de necessidade de tal sistema.

7 CONCLUSÃO

Muitos problemas existentes na estrutura de pavimentos flexíveis e de pavimento rígidos são intensificados devido à presença de água nas camadas granulares. O comportamento das camadas de base, sub-base e subleito, no que diz respeito à capacidade de suporte, é muito sensível às variações de umidade. A presença de água livre nos poros dessas camadas maximizam eventuais defeitos na estrutura e fazem com que, muitas vezes, ela reduza seu nível de serviço, chegando até mesmo a perder sua serventia. Além disso, a conservação dos pavimentos torna-se muito mais onerosa quando se verifica danos nas camadas inferiores, como deformações plásticas excessivas, devido a presença indesejada de água.

Torna-se necessário, então, evitar que uma quantidade demasiada de água atinja as camadas que compõe a estrutura do pavimento. Uma das saídas para evitar esse problema é realizar a selagem da via. Entretanto, essa solução adotada iria depender de uma conservação rotineira e de intervenções frequentes. A solução abordada e explicitada no presente trabalho foi projetar uma camada drenante, localizada normalmente imediatamente abaixo da superfície, e que tem a função de escoar rapidamente as águas de infiltração, impedindo que essas alcancem as camadas inferiores da estrutura.

Mesmo que nos primeiros anos da existência da via a presença da camada drenante não seja sentida, pois o pavimento recém-construído ou recém-restaurado encontra-se devidamente selado e a quantidade de água de infiltração nesses casos é extremamente baixa, sua funcionalidade será sentida ao longo do tempo. Devido à degradação natural do pavimento, irão aparecer trincas e, conseqüentemente, a quantidade de água infiltrada irá aumentar consideravelmente. Com a camada drenante atuando, as águas infiltradas não irão atingir as camadas granulares e, conseqüentemente, as camadas de base, sub-base e subleito não irão perder capacidade de suporte. Com isso, as trincas existentes não irão gerar deformações plásticas e a restauração do pavimento será simples e barata, tornando a instalação da camada drenante economicamente viável.

8 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10319: Geossintéticos – Ensaio de Tração à Faixa Larga.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12236: Geossintéticos – Ensaio de Puncionameto Estático (punção CBR).** Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 7 p.

AZEVEDO, A. M. **Considerações sobre a drenagem subsuperficial na vida útil de pavimentos rodoviários.** São Paulo, 2007. 156 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BORGES, E. S. **Proposta do Projeto Geométrico do Lado-Ar para o Novo Aeroporto Internacional de Porto Alegre – RS.** 2012. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações – Fundamentos 1.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1988. 234p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações – Volume 2.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1973. 456p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações – Volume 3**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1975. 219p.

CEDERGREEN, H. R. **Drenagem dos pavimentos de rodovias e aeródromos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1980. 177p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 561 p.

DNIT, Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Drenagem de Rodovias**. – 2. Ed. – Rio de Janeiro, 2006. 333 p.

International Civil Aviation Organization. Airport Service Manual: Pavement Surface Conditions (DOC 9137, Part 2.) 4. Ed. Montreal: ICAO, 2002.

JANSSEN, D. J. **Moistura in Portland Cement Concrete. Effects of Temperature and water on pavement performance**. Transportation Research Record 1121, p.40-44. Transportation Research Board, 1987.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley, 1979

MOREIRA, L. A. **Estudo da Drenagem Subterrânea em Aeroportos**. 1989 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

MOULTON, L. K. **Highway Subdrainage Design**. Report n° FHWA-TS-80-224 – Federal Highway Administration, 1980.

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

RADAMBRASIL, Levantamento de Recursos Naturais, Folha SH 22 Porto Alegre e Parte das Folhas SH. Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim. 1980. 794 f. Secretaria de Planejamento da Presidência da República, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

RODRIGUES, R. M. Engenharia de Pavimentos, Parte II – Gerência de Pavimentos. São Paulo, 2012. 209 p. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Civil-Aeronáutica.

Serviço de Informação Aeronáutica, disponível em <<http://www.aisweb.aer.mil.br>>. Acesso em 14 out 2013.

SILVEIRA, A. L. L; GOLDENFUM, J. A. & BEMFICA, D. C. Análise da Aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. 2000. 12 f. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TORRES, F. L. Aeroporto Internacional Salgado Filho: análise técnica do projeto de ampliação da pista de pouso e decolagem. 2010. 62 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo, Editora Mc-Grow Hill do Brasil. 1978

VERTAMATTI, E. & ARANHA, C. H. Estudo da Drenagem Subterrânea em Aeroportos. São José dos Campos, II Encontro Nacional de Engenharia da Aeronáutica, 1984. 28 p.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 13 de novembro de 2013	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-026/2013	4. N° DE PÁGINAS 92
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo da drenagem subsuperficial e subterrânea de sítios aeroportuários.			
6. AUTOR(ES): Edmir José dos Santos Júnior			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Drenagem subsuperficial, Drenagem subterrânea, Camada drenante, permeabilidade, porosidade efetiva.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Drenagem; Aeroportos; Rodovias; Subsuperfícies; Permeabilidade; Porosidade; Planejamento de aeroportos; Engenharia civil..			
10. APRESENTAÇÃO: <p align="center">X Nacional Internacional</p> ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Prof. Dr. Íria Fernandes Vendrame; coorientador: Ten. Cel. Steven Meier. Publicado em 2013.			
11. RESUMO: Os sistemas de drenagem são uma importante etapa no dimensionamento da estrutura de um pavimento, seja ele rodoviário ou aeroportuário. Em particular, os sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea reduzem as quantidades de água que atingem a estrutura da via. Vários problemas, decorrentes da umidade excessiva das camadas granulares, fazem com que a via de tráfego reduza seu nível de serviço e muitas vezes perca sua serventia. O benefício de tais sistemas muitas vezes não é percebido em pavimentos recém-construídos. Entretanto, quando há a necessidade de uma intervenção na estrutura, esta muitas vezes se torna economicamente inviável simplesmente pela falta de um sistema de drenagem subsuperficial e subterrânea. Baseando-se nesses argumentos, o presente trabalho realiza um estudo dos sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea. Inicialmente faz-se uma revisão bibliográfica, diretamente voltada ao movimento de fluidos em solos, pois, no dimensionamento da camada drenante, características como porosidade efetiva e permeabilidade são cruciais nas definições de que material utilizar e qual espessura adotar. São descritos ensaios de laboratório e de campo, a fim de se determinar essas grandezas utilizando não apenas equações empíricas. Definidas as grandezas necessárias, realiza-se o passo a passo para o dimensionamento dos sistemas de drenagem subsuperficial e subterrânea, baseando-se nas diretrizes do Apêndice G do Advisory Circular 150/5320-5C, modificação 1, da Federal Aviation Administration (FAA, 2009). Por fim, aplicam-se os critérios definidos anteriormente num estudo de caso, utilizando para isso alguns dos parâmetros do Aeroporto Internacional Salgado Filho, situado em Porto Alegre, Rio Grande do Sul.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			