

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DA ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE AGREGADO SIDERÚRGICO EM CAMADAS
DRENANTES PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

TAOWAMI BARBOSA DA GAMA
TIAGO HENRIQUE DE OLIVEIRA ROSA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)

LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(COORIENTADOR)

CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc (UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)

SILVANA FAVA MARCHEZINI, MSc Eng^a (IFB)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 de JULHO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

GAMA, TAOWAMI BARBOSA DA; ROSA, TIAGO HENRIQUE DE OLIVEIRA

Estudo da Aplicação de Agregado Siderúrgico em Camadas Drenantes para Pavimentos Rodoviários. [Distrito Federal], 2016.

xiii, 67p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016).

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------------------------|----------------------------|
| 1. Agregado Siderúrgico | 2. Camadas Drenantes |
| 3. Critérios de dimensionamento | 4. Drenagem Subsuperficial |
| I. ENC/UnB/FT | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GAMA, T. B.; ROSA, T. H. O. **ESTUDO DA APLICAÇÃO DE AGREGADO SIDERÚRGICO EM CAMADAS DRENANTES PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. 2016. 81 p. Monografia de Projeto Final - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Taowami Barbosa da Gama, Tiago Henrique de Oliveira Rosa.

TÍTULO DO PROJETO: Estudo da aplicação de agregado siderúrgico em camadas drenantes para pavimentos rodoviários

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Taowami Barbosa da Gama

Colônia Agrícola Samambaia R.3 Ch. 69 Lt 9

72110-600 Brasília/DF- Brasil

taow.gama@gmail.com

Tiago Henrique de Oliveira Rosa

Cond. São Francisco 2 Lote G2 Santa Maria

72596-070 Brasília/DF- Brasil

tiago.henri86@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus o autor da vida e criador de todas as coisas que nos ajudou a chegar até aqui. Sem ele sabemos que não conseguiríamos vencer todos os desafios e dificuldade que nos deparamos. Assim como o Salmista, reconhecemos que: “O Senhor é a nossa força, nossa rocha, nossa fortaleza e nosso libertador... Deus é fiel” (Salmo 18: 1-2, 25).

Aos nossos pais por todo o apoio que nos deram, por não desistir de nós em nenhum momento e por nos encorajar a perseguir os nossos sonhos.

Aos nossos amigos Rafael Lopes, Vinícius Qasen e Ricardo Jayme que durante toda a graduação permaneceram ao nosso lado nos incentivando e apoiando a vencer todos os desafios vivenciados.

Ao nosso orientador André Luís Brasil Cavalcante pelos ensinamentos compartilhados e pela paciência e incentivo que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Ao nosso coorientador Luís Fernando Martins Ribeiro que nos proporcionou a oportunidade de desenvolver este trabalho. A doutoranda Silvana Fava Marchezini que nos auxiliou de forma muito especial na realização dos ensaios de laboratório. E por fim, a todos os professores do departamento de engenharia civil e ambiental que contribuíram com a nossa formação acadêmica.

Eu, Taowami Barbosa, agradeço especialmente à minha futura esposa Paula Rocha, minha inspiração e razão de viver, por acreditar incondicionalmente em mim.

RESUMO

A indústria siderúrgica é responsável por gerar significativo volume de efluentes gasosos e líquidos, bem como de resíduos sólidos, principalmente, nas etapas da coqueria, sinterização e produção de gusa. Com o intuito de reduzir os índices de acúmulo de resíduos no meio ambiente, utilizam como soluções as operações de reciclagem e reutilização, desde que sejam economicamente e tecnicamente viáveis. Diante disso, este trabalho apresenta um estudo da viabilidade da aplicação da escória de aciaria em substituição aos agregados permeáveis normalmente utilizados. Para tanto, estudou-se os critérios relevantes para o dimensionamento de camadas drenantes e efetuou ensaios de caracterização desse material, cujos resultados foram comparados com os critérios estudados.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Reutilização. Escória. Critérios relevantes.

ABSTRACT

The steel industry is responsible for generating significant volume of gaseous and liquid effluents and solid waste, mainly on the steps of coking, sintering and pig iron production in the blast furnace. In order to reduce waste accumulation rates in the environment, using solutions such as recycling and reuse, provided they are economically and technically viable. Therefore, this work presents a study of the feasibility of implementation of the blast furnace slag to replace the porous aggregates normally used. To this end, we studied the relevant criteria for the design of such structures and made of this material characterization tests, whose results were compared with the criteria studied.

Palavras-chave: Solid waste. Reuse. Slag. Relevant criteria.

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVAS	1
1.2 OBJETIVOS	1
2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 DISCUSSÃO SOBRE O MATERIAL	2
2.2 GRANULOMETRIA E FORMA DOS AGREGADOS	5
2.2.1 Análise Granulométrica	5
2.2.1.1 Coeficientes de Uniformidade e Curvatura	6
2.2.2 Forma dos Grãos	7
2.3 PERMEABILIDADE EM SOLOS SATURADOS	8
2.3.1 Equação de Bernoulli	8
2.3.2 Lei de Darcy	10
2.3.3 A Condutividade Hidráulica	11
2.4 DRENAGEM DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	16
2.4.1 Propósito	16
2.4.2 Água e Pavimento	16
2.4.2.1 Origem das Águas Subterrâneas	16
2.4.2.2 Impacto das Águas Subterrâneas nos Projetos Rodoviários	18
2.4.3 Identificação de Águas Subsuperficiais	19
2.4.4 Investigação de Campo	20
2.5 SISTEMA DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL	21
2.5.1 Introdução	21
2.5.2 Controle da Água e Elementos do Sistema	22
2.5.2.1 Critérios de Controle da Água nos Pavimentos	22
2.5.2.2 Drenagem Subsuperficial	23
2.5.2.3 Necessidade de Drenagem Subsuperficial	24
2.5.3 Concepção do Sistema de Drenagem Subsuperficial – Elementos Constituintes	25
2.5.3.1 Introdução	25
2.5.3.2 Camada Drenante	26
2.5.3.3 Drenos Longitudinais	27
2.5.3.4 Drenos Transversais	29
2.5.3.5 Camada de Separação	29
2.5.3.6 Resumo	31
2.5.4 Elementos de Projeto	32
2.5.5 Critérios para o Uso do Sistema	33

2.6 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	34
2.6.1 Drenos Longitudinais	35
2.6.2 Tubos Coletores	38
2.6.3 Camada Drenante	39
2.6.4 Camada de Separação	41
2.6.4.1 Critério para Seleção do Material Granular	41
2.6.4.2 Critérios para Seleção da Manta Geotêxtil	42
2.6.5 Tubos de Saída Lateral	44
3 - MATERIAL E METODOLOGIA	45
3.1 MATERIAL	45
3.2 METODOLOGIA	46
3.2.1 ENSAIOS	47
3.2.1.1 Análise Granulométrica	47
3.2.1.2 Análise do Formato dos Grãos	48
3.2.1.3 Determinação da Massa Específica	48
3.2.1.4 Determinação do Índice de Vazios	48
3.2.1.5 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade	49
4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1 GRANULOMETRIA	51
4.2 FORMATO DOS GRÃOS	55
4.3 MASSA ESPECÍFICA	57
4.4 ÍNDICE DE VAZIOS	58
4.5 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	59
5 – CONCLUSÕES	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Escória de aciaria tipo EAF e LD	3
Figura 2.2: Tipos de distribuição granulométrica.....	6
Figura 2.3: Forma das partículas	8
Figura 2.4: Relação entre velocidade de escoamento e gradiente hidráulico	10
Figura 2.5: Influência dos vazios no fluxo de água.....	13
Figura 2.6: Origem da água nos pavimentos	17
Figura 2.7: Posicionamento dos elementos constituintes do sistema de drenagem subsuperficial com drenos profundos longitudinais	23
Figura 2.8: Posicionamento dos elementos constituintes do sistema de drenagem subsuperficial com drenos rasos longitudinais	24
Figura 2.9: Detalhe de um sistema de drenagem subsuperficial	25
Figura 2.10: Tipos de drenos longitudinais	28
Figura 2.11: Tipos de camada separadora	30
Figura 2.12: Sistema de drenagem subsuperficial em um trecho em curva	32
Figura 2.13: Graduações recomendadas para camada drenante	40
Figura 3.1: Amostra da escória de aciaria LD	45
Figura 3.2: Estrutura da metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa	47
Figura 4.1: Curva granulométrica do material original	51
Figura 4.2: Peneirador mecânico com jogo de peneiras.....	52
Figura 4.3: Comparação entre a curva estudada e a de Iowa	53
Figura 4.4: Comparação entre a curva estudada e a de Minnesota.....	53
Figura 4.5: Comparação entre a curva estudada e a de Nova Jersey.....	53
Figura 4.6: Comparação entre a curva estudada e a de Pensilvânia	54
Figura 4.7: Grãos e suas circunferências inscrita	55
Figura 4.8: Distribuição normal dos resultados da angulosidade.....	57
Figura 4.9: Molde cilíndrico com material utilizado no ensaio de índice de vazios	59
Figura 4.10: Permeâmetro utilizado no ensaio	61
Figura 5.1: Curva granulométrica e o intervalo proposto pelo departamento	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Dimensões limites e classificação dos grãos	5
Tabela 2.2: Coeficientes de permeabilidade.....	12
Tabela 2.3: Permeabilidade em solos compactados	14
Tabela 2.4: Qualidade da drenagem em função do tempo de drenagem.....	27
Tabela 2.5: Principais elementos constituintes e suas funções no sistema de drenagem subsuperficial.....	31
Tabela 2.6: Faixas granulométricas típicas de camadas drenantes.....	40
Tabela 2.7: Faixas granulométricas de agregados para camadas separadoras	42
Tabela 2.8: Valores da constante A	43
Tabela 2.9: Valores dos coeficientes C1, C2, C3 e C4.....	44
Tabela 4.1: Massa de material retida em cada peneira nas amostras A1, A2, A3, e a média.....	51
Tabela 4.2: Resumo dos coeficientes de cada curva	54
Tabela 4.3: Distâncias entre as extramidades dos grãos, o diâmetro da circunferência inscrita e a angulosidade.....	56
Tabela 4.4: Dados e resultados obtidos no ensaio de massa específica	58
Tabela 4.5: Massa utilizada no ensaio de índice de vazios	58
Tabela 4.6: Valores de índice de vazios máximo e mínimo.....	58
Tabela 4.7: Índice de vazios e porosidade do material trabalhado	59
Tabela 4.8: Dados utilizados no ensaio de permeabilidade.....	60
Tabela 4.9: Valores obtidos no ensaio de permeabilidade	60
Tabela 4.10: Umidade do material	61
Tabela 4.11: Permeabilidade obtida por Hazen.....	62
Tabela 4.12: Permeabilidade obtida por Kamal	63
Tabela 4.13: Permeabilidade obtida por Mouton	63
Tabela 5.1: Granulometria proposta	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Índice de absorção;
A	Área da seção transversal bruta;
A	Constante conforme tabela 2.8;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials;
A_v	Área dos vazios;
C	Coefficiente de Forma;
C	Produto dos fatores C_1 , C_2 , C_3 e C_4 ;
CA	Concreto Asfáltico;
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> ;
CCP	Concreto de Cimento Portland;
C_C	Coefficiente de Curvatura;
C.D	Camada Drenante;
CDOT	<i>Colorado Department of Transportation</i> ;
CFGG	Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas;
cm	Centímetro;
C.S	Camada de separação;
CU	Coefficiente de uniformidade;
D	Diâmetro;
D_{10}	Diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas;
D_{15}	Diâmetro abaixo do qual se situam 15% em peso das partículas;
D_{50}	Diâmetro abaixo do qual se situam 50% em peso das partículas;
D_{60}	Diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas;
D_{85}	Diâmetro abaixo do qual se situam 85% em peso das partículas;
D_a	Diâmetro dos furos nos tubos coletores;
D_{ef}	Diâmetro efetivo;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
e	Índice de vazios do solo;
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i> ;

ft	.....	Pés;
g	.....	Gravidade;
g	.....	Gramas;
h	.....	Horas;
h	.....	Carga total;
i	.....	Gradiente hidráulico;
in	.....	Polegadas;
k	.....	Coefficiente de permeabilidade;
k	.....	Coefficiente de permeabilidade para uma dada temperatura;
$K_{0,85}$	.....	Coefficiente de permeabilidade, quando $e = 0,85$;
k_{20}	.....	Coefficiente de permeabilidade para a temperatura de 20°C ;
Kg	.....	Quilograma;
k_h	.....	Condutividade hidráulica na horizontal;
k_n	.....	Coefficiente de permeabilidade normal do geotêxtil;
k_s	.....	Coefficiente de permeabilidade do solo base;
k_v	.....	Condutividade hidráulica na vertical;
L	.....	Comprimento pelo qual o fluxo se dá;
L_f	.....	Largura da fenda;
m	.....	Metro;
m_i	.....	Massa imersa em água;
m_s	.....	Massa seca;
m_{sss}	.....	Massa saturada superfície seca;
m.d	.....	Material drenante;
ME	.....	Método de Ensaio;
m^3	.....	Metro cúbico;
$m\text{H}_2\text{O}$	.....	Metro de coluna d'água;
mm	.....	Milímetro;
N	.....	Newton;
N°	Número;
O_f	.....	Abertura de filtração do geotêxtil;
Pa	.....	Pascal;

PRO	Procedimento;
Q	Vazão;
S	Área da seção transversal interna;
s	Segundo;
s ²	Segundo quadrado;
t _g	Espessura nominal do geotêxtil;
USBR	<i>United States Army Corps Engineers</i> ;
Z	Carga altimétrica;
yd ³	Jardas cúbicas;
u	Pressão;
ρ _s	Massa específica seca;
ρ _{sss}	Massa específica saturada superfície seca;
γ _w	Peso específico da água;
v	Velocidade;
v _f	Velocidade de percolação;
Δh	Perda de carga;
v'	Velocidade real de percolação ou de fluxo;
v	Velocidade de percolação;
n	Porosidade;
γ _w	Peso específico do líquido;
μ	Viscosidade do líquido;
μ ₂₀	Viscosidade do líquido para a temperatura de 20°C;
μ	Viscosidade do líquido para uma dada temperatura;
%	Porcentagem;
°c	Grau Celsius;
±	Mais ou menos;
\$	Dólar;
φ _f	Diâmetro do furo;
''	Polegada;

1- INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica brasileira é responsável pela geração de elevada quantidade de resíduo sólido, como o agregado siderúrgico, que embora haja reaproveitamento do material, por exemplo, em cimentos CPIII, não é suficiente para consumir a grande quantidade de rejeito produzido. Dessa forma, grande parte do rejeito não possui destinação final. Diante da crescente preocupação ambiental gerada pelo ideal de sustentabilidade, este projeto busca verificar a possibilidade do agregado siderúrgico ser aplicado como camadas drenantes para pavimentos rodoviários.

1.1 JUSTIFICATIVAS

O agregado siderúrgico é um rejeito, a sua aplicação em camadas drenantes possibilita a reutilização desse material contribuindo com o meio ambiente, pois, devido ser resíduo da produção de aço, material que no Brasil é de grande relevância, resultaria em grandes volumes de reutilização. Além disso, nos manuais existentes na literatura nacional, pouco se orienta acerca dos projetos de camadas drenantes e sua execução que utilizam o agregado siderúrgico como material drenante, assim, as recomendações propostas são de grande relevância para os projetos de drenagem de pavimentos rodoviários.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar a possibilidade da aplicação da escória de aciaria em camadas drenantes segundo critérios de dimensionamento específicos para tal estrutura por meio de ensaios normatizados.

Para se alcançar o objetivo principal, faz-se necessária a definição dos critérios específicos para o dimensionamento dessas estruturas drenantes, sendo esse o objetivo secundário deste trabalho.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DISCUSSÃO SOBRE O MATERIAL

A indústria siderúrgica, no Brasil, é considerada uma das maiores consumidoras de energia e maiores geradoras de poluição. O recente crescimento do setor siderúrgico no país vem provocando intensos impactos ambientais negativos, embora proporcione ganhos econômicos. A estratégia de inserir esse setor da indústria na economia global tem como base a exploração de recursos naturais e tecnologias (Cavalcanti, 2012).

Além de ser uma grande consumidora de recursos não renováveis e de energia, a indústria siderúrgica é responsável por gerar significativo volume de efluentes gasosos e líquidos, bem como de resíduos sólidos. As etapas principais na geração desses resíduos é a da coqueria, sinterização e produção de gusa. Essa indústria está sendo induzida a desenvolver processos mais eficientes e menos poluentes e a reciclar e reutilizar produtos e subprodutos nas suas etapas de produção (Cavalcanti, 2012).

De acordo com Moreira (2006), a composição química das escórias e suas propriedades físicas, mecânicas e geoquímicas, de interesse para a construção civil, seja para a indústria cimenteira, ou para a produção de agregados artificiais empregados na construção civil, ou para composições granulares de pavimentos, dependem de vários fatores como:

- Os insumos - composição do minério e outros minerais metálicos utilizados;
- Os aditivos minerais especialmente os fundentes - calcário calcítico ou calcário dolomítico;
- A eficiência de operação dos altos fornos;
- O sistema de resfriamento;

De acordo com o forno empregado, a escória pode ser classificada em três tipos. O forno Siemens-Martin utiliza o processo OH – Open Hearth, o forno conversor a oxigênio utiliza o processo LD – Linz Donawitz ou BOF – Blast Oxygen Furnace e o forno de arco elétrico utiliza o processo EAF – Electric Arc Furnace. As tecnologias que usam o processo de produção do tipo OH se encontram em desuso enquanto que os processos do tipo LD e EAF estão mais difundidos. O processo utilizado na produção,

ou refino, do aço influencia a composição química e as demais propriedades físico-químicas das escórias de aciaria (Oliveira, 2006).

No processo EAF ocorre a fusão da sucata de aço através da energia gerada por um arco elétrico no interior do forno elétrico. Com o objetivo de eliminar elementos como carbono e fósforo através de reações de oxidação é injetado oxigênio através de uma lança durante a etapa denominada "afinação oxidante". As reações de refino para redução da quantidade de oxigênio e enxofre ocorrem a partir da adição de CaO e MgO na etapa chamada de afinação redutora. Para a formação da escória de aciaria elétrica com a sua devida composição química é realizado adições finais (Silva, 2010).

No refino e produção do aço pelo processo tipo LD ou BFO, a sucata e o ferro gusa líquido são colocados no conversor onde uma lança injeta oxigênio gasoso à alta pressão para que ocorra a redução e eliminação, a partir de uma reação de oxidação, dos elementos indesejáveis no aço, como o carbono, o silício e o fósforo. No final do processo, o conversor é basculado para que a escória de aciaria e o aço líquido sejam separados por diferença de densidades (Silva, 2010). A Figura 2.1 mostra a escória de aciaria tipo EAF e LD.



Figura 2.1: Escória de aciaria tipo EAF e LD (TAVAREZ;ODHA;MOTTA, 2010).

A indústria nacional, de acordo com dados do Instituto Aço Brasil (2013), produziu em 2012, aproximadamente, 27 milhões de toneladas de ferro gusa e 34 milhões de toneladas de aço. O estado brasileiro que mais produz aço é Minas Gerais que no mês de janeiro de 2013 contribuiu com 32,7% da produção nacional no mesmo período, 921

mil toneladas. Uma das maiores produtoras de ferro gusa é a região de Sete Lagoas, contribuindo com 29% da produção do estado (Caldeira, 2012).

O processo siderúrgico em si e a eficiência do sistema de controle são os fatores que determinam a quantidade de resíduo gerado. No estado de Minas Gerais, os produtores independentes geram de 28 a 45 kg de resíduo por tonelada de gusa. Aproximadamente, 75% do resíduo total fica disposto nos pátios das empresas a céu aberto após sua coleta, o que provoca a poluição do meio ambiente contaminando o ar, a água e o solo (Milanez; Porto, 2008). Apesar dos investimentos realizados pelo setor siderúrgico em novas tecnologias, ainda existem materiais que são descartados o que representa oportunidades econômicas a serem exploradas.

Com o objetivo de reduzir os índices de acúmulo de resíduos no meio ambiente, se utilizam como soluções as operações de reciclagem e reutilização, sendo consideradas operações prioritárias no gerenciamento de resíduos sólidos, pois na maioria das indústrias, a diminuição na geração de resíduos é economicamente ou tecnicamente inviável (Benquerer, 2000).

Os índices de reciclagem de resíduos industriais estão cada vez maiores, no entanto, necessita-se de mais pesquisas em novas aplicações dos rejeitos para que se alcance o equilíbrio entre a geração e o reaproveitamento de forma que os rejeitos excedentes não fiquem acumulados nos pátios provocando a contaminação do meio ambiente (Fellenberg, 1980).

Movimentos ecológicos existentes pelo mundo e tarifas ambientais que substituem as convencionais juntamente com leis impostas principalmente nas duas últimas décadas, como as leis ambientais NBR 10.004 e NBR 10.007 (ABNT, 2004), estão tornando necessário atender as exigências de manejo e do gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados. Este desafio atinge os diversos sistemas produtivos que envolve importação e exportação de produtos, seja ele de pequeno ou de grande porte (Draggan, 1985).

De toda a geração de escória de aciaria, 44% são estabilizadas nos pátios de disposição das siderúrgicas e utilizadas como agregados nas obras de infra-estrutura rodoviária como estabilização granulométrica de bases e sub-bases e como lastro em vias de transporte ferroviário. Os outros 56% da geração são estocadas, o que gera passivo ambiental de 1,8 milhões de toneladas por ano (Baltazar, 2001).

2.2 GRANULOMETRIA E FORMA DOS AGREGADOS

2.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica, segundo Caputo (1988), consiste na determinação dos diâmetros das partículas que compõe o solo e das suas proporções relativas, expressas em porcentagens do peso seco total. A determinação da distribuição das dimensões das partículas pode ser efetuada por dois métodos:

- Ensaio de peneiramento – para partículas com diâmetros maiores que 0,075mm;
- Ensaio de sedimentação, desenvolvido por Casagrande – para partículas com diâmetros menores que 0,075mm.

O resultado final dos métodos citados é a curva granulométrica. Essa curva é desenhada em um diagrama semi-logarítmico, onde os logaritmos dos diâmetros são marcados na abscissa e as porcentagens em massa do material que passa em cada peneira na ordenada. O eixo das abscissas é dividido em várias faixas de diâmetros segundo o limite e a classificação dos tipos de grãos (Caputo, 1988).

A Tabela 2.1 descreve os limites de dimensões dos grãos e sua respectiva classificação, conforme a NBR NM 248.

Tabela 2.1: Dimensões limites e classificação dos grãos (Pinto, 2006).

Classificação	Limites (mm)
Matacão	250 a 1000
Pedra	76 a 250
Pedregulho	4,80 a 76
Areia Grossa	2,0 a 4,80
Areia Média	0,42 a 2,0
Areia Fina	0,05 a 0,42
Silte	0,005 a 0,05
Argila	Inferior a 0,005

Das (2007) ensina que a partir da curva granulométrica pode-se definir de que maneira as partículas do solo estão distribuídas segundo a seguinte classificação:

- Mal-graduadas ou uniformes – maioria dos grãos do solo com o mesmo tamanho;
- Bem-graduado ou desuniforme – os tamanhos das partículas são distribuídos em uma ampla faixa;
- Granulometria descontínua ou de granulometria aberta – existe uma descontinuidade na curva, ou seja, existe uma faixa de diâmetros não presentes no solo.

A Figura 2.2 mostra os tipos de distribuições granulométricas.

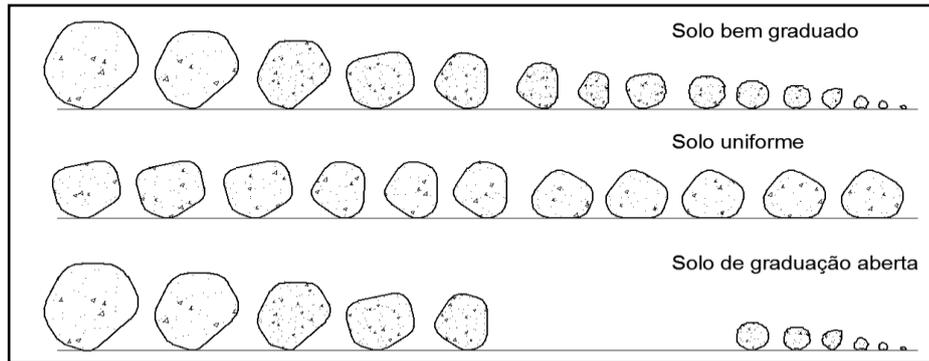


Figura 2.2: Tipos de distribuição granulométrica (Caputo, 1988).

2.2.1.1 Coeficientes de Uniformidade e Curvatura

Ainda com relação à curva granulométrica, faz-se possível a determinação de três parâmetros de grande relevância: diâmetro efetivo, coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura.

Segundo Caputo (1988), define-se o diâmetro efetivo como o diâmetro associado a 10% do peso total, de todas as partículas com diâmetros menores.

O coeficiente de uniformidade é definido, conforme Das (2007), como:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

onde,

D_{60} = Diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas;

D_{10} = Diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas.

Esse coeficiente expressa, embora chamado de coeficiente de uniformidade, a não uniformidade do material, isto é, quanto maior o coeficiente menos uniforme é o

material. Dessa forma, o C_U mede o quão bem graduado as partículas do material estão distribuídas (Caputo, 1988).

Já o coeficiente de curvatura permite estudar o formato da curva granulométrica e permite constatar discontinuidades e concentrações de grãos maiores no conjunto (Pinto, 2006).

Pinto (2006) ensina, com base no sistema unificado de classificação dos solos, que um pedregulho é bem graduado quando C_U é maior que 4 e areias bem graduadas quando C_U é maior que 6. Além da condição do C_U , para que o material seja bem graduado, é necessário que o C_C esteja entre 1 e 3.

No entanto, Caputo (1988) considera os seguintes limites:

- Solos uniformes possuem C_U menor que 5;
- Solos com uniformidade média possuem C_U entre 5 e 15;
- Solos desuniformes possuem C_U maior que 15.

2.2.2 Forma dos Grãos

Pinto (2006) explica que o conhecimento da forma dos grãos é importante, pois determina como as partículas irão se encaixar e como se dará seu entrosamento. A forma dos grãos também influi na estrutura do solo e no índice de vazios, parâmetros que influem na permeabilidade dos solos. Embora de grande importância, sua caracterização é de difícil definição e, por isso, pouca atenção tem sido dada a este parâmetro (Das, 2007).

Das (2007) classifica três possíveis formas de grão:

- Volumoso;
- Lamelar;
- Fibrilar.

Dentre as três, destacam-se as partículas volumosas que se formam devido a ação do intemperismo mecânico de rochas e minerais. A elas são empregadas subclassificações: angular, subangular, subarredondado e arredondado, para descrever de forma mais específica as partículas volumosas. Na Figura 2.3 as partículas são demonstradas qualitativamente.

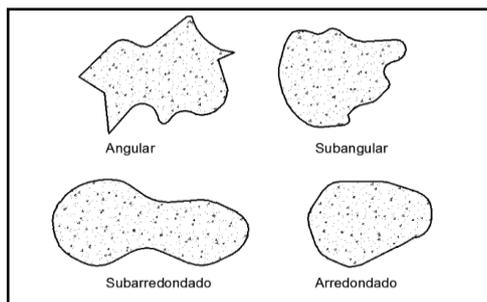


Figura 2.3: Forma das partículas (Das, 2007).

2.3 PERMEABILIDADE EM SOLOS SATURADOS

2.3.1 Equação de Bernoulli

Sabe-se, da mecânica dos fluidos, que para que haja fluxo de água é necessária que essa esteja submetida a uma diferença de potencial (Pinto, 2006). Dessa forma, os solos são permeáveis devido à existência de vazios interconectados que oferecem a água um meio onde possa fluir de regiões de maior para regiões de menor energia (Das, 2007).

A equação de Bernoulli mostra que a carga total de qualquer ponto na água em movimento resulta do somatório de três cargas: piezométrica, cinética, altimétricas, isto é:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (2.2)$$

onde,

h = Carga total [m];

u = Pressão [Pa];

γ_w = Peso específico da água [N/m³];

g = Gravidade [m/s²];

v = Velocidade [m/s];

Z = Cargas altimétricas [m].

O fluxo de água em solos porosos, em especial, a carga cinética, que se relaciona a velocidade de escoamento, pode ser desprezada, pois a velocidade de percolação é muito baixa (Das, 2007). Dessa forma, a carga cinética, que se refere à velocidade do

escoamento, pode ser desprezada, o que resulta na seguinte simplificação da equação de Bernoulli:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + Z \quad (2.3)$$

Em todo escoamento existem uma perda de carga associada ao movimento, Δh , denominada de gradiente hidráulico, que pode ser expresso, em sua forma adimensional, por:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.4)$$

em que, L = comprimento entre dois pontos quaisquer, ou seja, é o comprimento pelo qual o fluxo se dá.

O escoamento da água, em função de sua velocidade e de seu gradiente hidráulico, pode comportar-se de três maneiras distintas o que resultou em três classificações para os escoamentos: laminar, de transição e turbulento (Das, 2007). O escoamento laminar caracteriza-se pela não intercessão das linhas de fluxo, enquanto que, no turbulento, ocorre a intercessão das linhas de fluxo (Caputo, 1988).

Das (2007) afirma que, em regra, o fluxo de percolação nos solos pode ser considerado como laminar, sendo que, nessa condição, existe proporcionalidade entre a velocidade do escoamento e o gradiente hidráulico, ou seja, observa-se a relação linear entre esses parâmetros. Tal relação não pode ser suposta para areias bem grossas, pedras e rochas fraturadas, pois há grandes chances que o escoamento se manifeste turbulento, resultando em uma relação não linear entre a velocidade e o gradiente hidráulico. A Figura 2.4 representa, ilustrativamente, a variação entre os parâmetros discutidos acima.

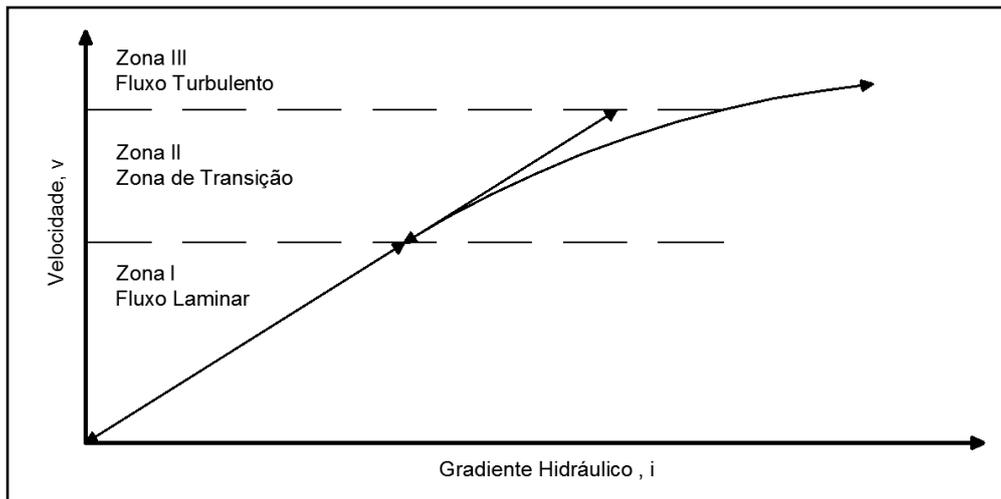


Figura 2.4: Relação entre velocidade de escoamento e gradiente hidráulico (Das, 2007).

2.3.2 Lei de Darcy

Darcy, em 1856, determinou experimentalmente a relação entre os parâmetros geométricos de um permeâmetro com a vazão de descarga tendo como resultado a seguinte expressão:

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \quad (2.5)$$

onde,

Q = Vazão [m^3/s];

k = Coeficiente de permeabilidade [m/s];

Δh = Perda de carga [mH_2O];

L = Comprimento do fluxo [m];

A = Área da seção transversal bruta [m^2].

Essa expressão é válida para solos saturados e, como a relação h por L é, por definição, o gradiente hidráulico, a equação pode ser simplificada para:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.6)$$

em que, i = o gradiente hidráulico.

A expressão apresentada, conhecida como lei de Darcy, foi obtida, principalmente, através de observações sobre fluxo de água em areias puras. Dessa forma, sua validade

limita-se a condições laminares de fluxo, isto é, onde exista proporcionalidade entre k e v .

O Colorado Department Of Transportation, CDOT (2004), orienta que a lei de Darcy pode ser utilizada na maioria dos depósitos naturais e filtros construídos, porém, no caso de materiais granulares de alta permeabilidade, deve ser usada com cautela. Recomenda, com base na experiência, que a lei de Darcy deve ser aplicada para solos mais finos que areias grossas e pedregulhos com coeficiente de permeabilidade de, no máximo, 915m/dia ou $1,05 \times 10^{-2}$ m/s.

A lei de Darcy como foi apresentada assumi que a vazão passa por toda a área bruta da seção do solo. Sabe-se que, na realidade, a água escoia pelos vazios do solo, dessa forma a velocidade de descarga obtida pela lei de Darcy resulta em um valor menor que o real. A velocidade real, denominada de velocidade de percolação, é obtida considerando-se a relação entre a área de vazios e a área bruta da seção, que, nada mais é que a porosidade. Dessa forma, a velocidade de percolação é expressa por:

$$v' = v \cdot \frac{A}{A_v} \quad (2.7)$$

$$v' = \frac{v}{n} \quad (2.8)$$

onde,

v' = Velocidade real de percolação ou de fluxo [m/s];

v = Velocidade de percolação [m/s];

A = Área da seção bruta [m²];

A_v = Área dos vazios [m²];

n = Porosidade.

2.3.3 A Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica, ou coeficiente de permeabilidade, k , na lei de Darcy, indica o quão permeável o material é, isto é, a capacidade de percolação que o material oferece. Esse coeficiente possui grande variabilidade assumindo distintos valores para os diferentes tipos de solo e, até mesmo, para um mesmo tipo de solo (Caputo,1988). A

razão de tal grande variabilidade resulta dos vários fatores que o influenciam: rugosidade das partículas minerais, viscosidade e densidade do fluido, grau de saturação do solo, distribuição granulométrica, distribuição e tamanho dos poros, índices de vazios (Das, 2007). A Tabela 2.2 apresenta o intervalo de variação para os diferentes tipos de solo.

Tabela 2.2: Coeficientes de permeabilidade (Caputo, 1988).

Material	Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)
Pedregulho	$10^2 - 1,0$
Areias médias e grossas	$1,0 - 10^{-3}$
Areia fina e Silte	$10^{-3} - 10^{-5}$
Argila	$< 10^{-5}$

Pinto (2006) apresenta em sua obra um estudo dos fatores que afetam a condutividade hidráulica de um solo baseando se na equação proposta por Taylor (1948), que foi determinada assumindo a percolação no solo por um conjunto de tubos capilares. A equação de Taylor é dada por:

$$k = D^2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot C \quad (2.9)$$

onde,

D = Diâmetro de uma esfera equivalente ao tamanho dos grãos do solo [L];

γ_w = peso específico do líquido;

μ = Viscosidade do líquido;

C = Coeficiente de Forma.

A seguir são apresentadas as considerações de Pinto (2006) com relação aos fatores que influem na condutividade hidráulica:

a) Influência do Índice de Vazios

Observa-se na equação que a permeabilidade é maior quanto maior for o índice de vazios do solo, portanto, quanto mais fofo o material, mais permeável ele é.

Tal relação também pode ser observada, conforme ensinado por Caputo (1988), pela equação de Casagrande, que expressa, para areias puras e graduadas, a relação direta entre índice de vazios e permeabilidade da seguinte forma:

$$k = 1,40 \cdot k_{0,85} \cdot e^2 \quad (2.10)$$

onde,

K = Coeficiente de permeabilidade;

$K_{0,85}$ = Coeficiente de permeabilidade, quando $e = 0,85$;

e = Índice de vazios do solo.

A Figura 2.5 ilustra a influência dos vazios no fluxo de água. Nota-se que, em função da complexidade da estrutura do solo, vários caminhos podem ser percorridos sendo que, são mais permeáveis aqueles que apresentam os vazios interconectados não obstruindo o fluxo.

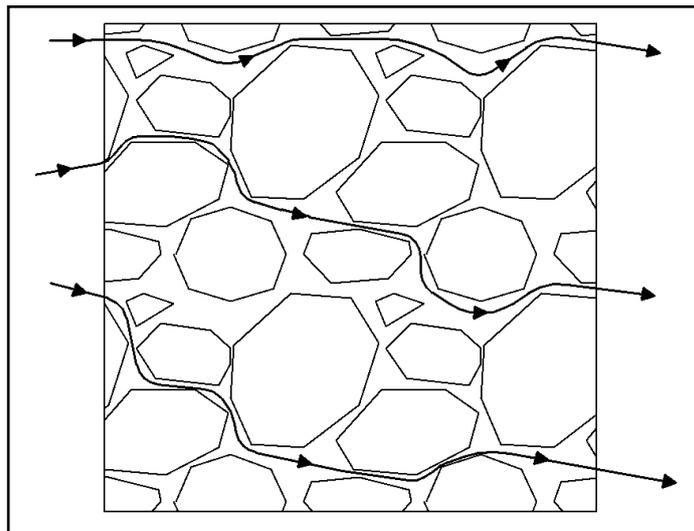


Figura 2.5: Influência dos vazios no fluxo de água (Das, 2008).

Através da equação de Taylor pode-se determinar a permeabilidade de um solo conhecendo-se o índice de vazios desse e o coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios de outro solo através da seguinte expressão:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\frac{e_1^3}{1+e_1}}{\frac{e_2^3}{1+e_2}} \quad (2.11)$$

Os resultados obtidos por essa equação são bem adequados quando essa é aplicada para areias. Para argilas, melhores resultados são obtidos utilizando-se o logaritmo do coeficiente de permeabilidade.

b) Influência da Estrutura e da Anisotropia

Além do índice de vazios, a permeabilidade depende da disposição relativa dos grãos, da estrutura formada pelos grãos. Em solos residuais ocorre a formação de macroporos em sua estrutura resultando, assim, mais permeáveis. Esse fenômeno também é observado em solos compactados com diferentes umidades. Quando compactados mais secos, a disposição das partículas se dá de tal forma que permite maior passagem de água do que quando compactados mais úmidos. A Tabela 2.3 apresenta resultados de ensaios de permeabilidade para solos compactados com diferentes umidades.

Tabela 2.3: Permeabilidade em solos compactados (Pinto, 2006).

Umidade de Compactação	Índice de vazios	Coefficiente de Permeabilidade (m/s)
17%	0,71	$2 \cdot 10^{-8}$
19%	0,71	$9 \cdot 10^{-9}$
21%	0,71	$5 \cdot 10^{-9}$

Ainda com relação à estrutura do solo, em regra, apresenta-se como anisotrópico, ou seja, apresentam características distintas nas três direções. Dessa forma, a magnitude de k varia em função da direção do fluxo, sendo que, no geral, a condutividade hidráulica na horizontal, k_h , é maior que na vertical, k_v , (Das, 2007).

c) Influência do Grau de Saturação

Antes da percolação, os vazios do solo podem estar preenchidos apenas com ar. Nessa situação, com o início da percolação parte do ar é removido e preenchido com água, no entanto, bolhas de ar contidas pela tensão superficial da água promovem resistência ao fluxo de água atuando como obstáculos até que todo o ar seja removido e condição saturada seja atingida. Do exposto conclui-se que a permeabilidade de solos não saturados é menor do que de um solo saturado. Das (2007) afirma que a condutividade hidráulica de solos não saturados aumenta rapidamente com o grau de saturação.

d) Influência da Temperatura

A equação de Taylor evidencia a relação entre as propriedades do fluido, viscosidade e peso específico com a condutividade hidráulica do material. Essas duas propriedades do fluido variam com a temperatura da água, sendo que, entre elas, a viscosidade é mais sensível às variações de temperatura.

Dessa forma, faz-se necessária uma convenção para que haja uniformidade nos coeficientes estabelecidos. Tal convenção é a adoção do coeficiente de permeabilidade referente à temperatura de 20°C. A equação abaixo possibilita a conversão do coeficiente obtido para uma determinada temperatura para o coeficiente referente à 20°C.

$$k_{20} = k \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (2.12)$$

onde,

k_{20} = Coeficiente de permeabilidade para a temperatura de 20°C;

k = Coeficiente de permeabilidade para uma dada temperatura;

μ_{20} = Viscosidade do líquido para a temperatura de 20°C;

μ = Viscosidade do líquido para uma dada temperatura.

e) Tamanho das Partículas

Por fim, conclui-se com base na equação de Taylor que existe uma relação direta com o tamanho dos grãos, pois a permeabilidade é função do quadrado do diâmetro das partículas.

Esse resultado teórico reforça a equação empírica de Hazen obtida por correlação estatística para areias com C_U menor que 5 sendo expressa por:

$$k = 100. D_{ef}^2 \quad (2.13)$$

onde,

k = Coeficiente de permeabilidade [cm/s];

D_{ef} = Diâmetro efetivo [cm].

Nessa expressão, o diâmetro efetivo é expresso em cm e k em cm/s.

2.4 DRENAGEM DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.4.1 Propósito

De acordo com o Colorado Department Of Transportation (CDOT, 2004), em todo projeto de pavimentos rodoviários, os efeitos das águas subterrâneas devem ser considerados na construção, manutenção e, também, no desempenho a longo prazo da estrutura. O excesso da água subsuperficial, ou a falta de controle dessa, tem sido a causa de uma quantidade expressiva de deterioração em pavimentos, colapsos em taludes e pelo desempenho insatisfatório de muitos projetos executados. A drenagem subsuperficial é essencial tanto do ponto de vista econômico como de desempenho a longo prazo das rodovias.

Segundo o DNIT (2006) o objetivo da drenagem é evitar que ocorram mudanças graves no teor de umidade, e conseqüentemente, de volume e capacidade de suporte dos materiais constituintes do pavimento e do subleito durante o período de serviço.

2.4.2 Água e Pavimento

2.4.2.1 Origem das Águas Subterrâneas

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) afirma que o subleito e as camadas da estrutura do pavimento podem ser submetidas à umidade excessiva proveniente de fontes variadas como a infiltração, a percolação, a capilaridade e os movimentos em forma de vapor de água. No pavimento, a infiltração subsuperficial pode ser decorrente das trincas, das juntas, dos bordos do acostamento e outros tipos de problemas superficiais que facilitam a entrada de água. A subida de água do nível freático elevado pode ocorrer por percolação ou pela entrada lateral nos bordos do pavimento e nas valetas dos acostamentos. O acúmulo de umidade abaixo da estrutura do pavimento pode ocorrer também devido aos efeitos de capilaridade e ao movimento de vapor de água que está associado às variações de temperatura e de outras condições climáticas. O excesso no teor de umidade na estrutura do pavimento proveniente da ação de uma única fonte de infiltração ou de várias recebe o nome de água livre. Uma das principais causas de

deterioração precoce do pavimento é essa movimentação de água. A Figura 2.6 ilustra a origem da água nos pavimentos.

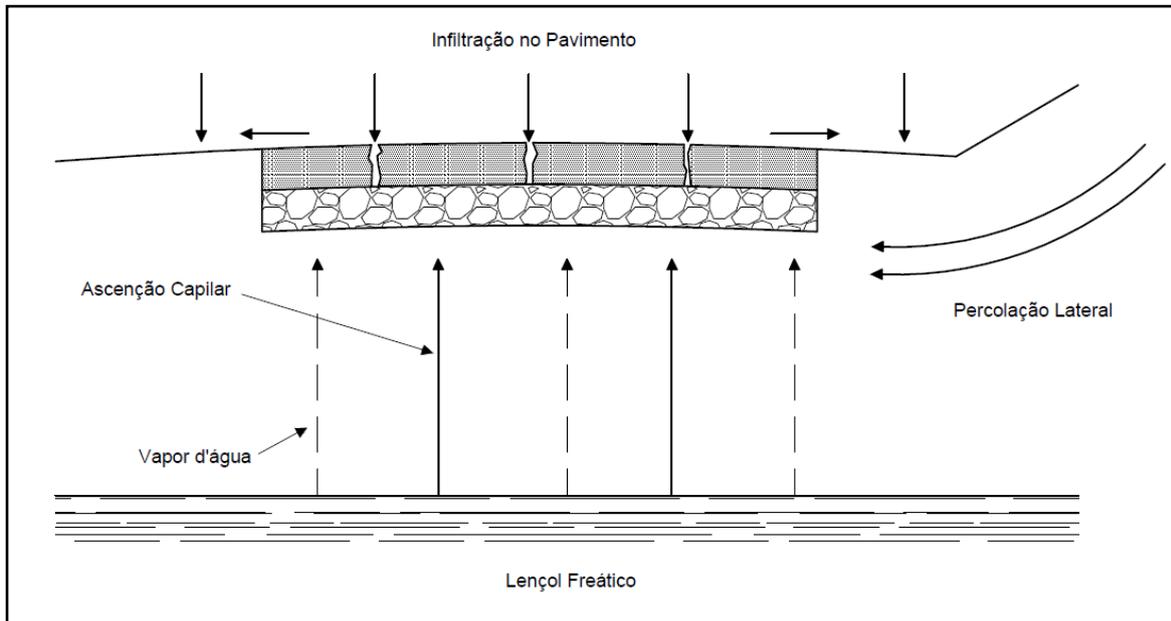


Figura 2.6: Origem da água nos pavimentos (CDOT, 2004).

O CDOT (2004) em seu manual apresenta as seguintes origens da água nos pavimentos:

- Infiltração da água superficial através dos poros, ou fissuras nos pavimentos, ou nas juntas não seladas, particularmente através das juntas longitudinais entre o pavimento de concreto e o acostamento de pavimento flexível de asfalto;
- Ascensão capilar do lençol freático;
- Vapor de água acumulado devido às variações de temperatura e outras condições atmosféricas;
- Bueiros de irrigação e sifões mal selados;
- Conexão de bueiros;
- Lençol freático próximo à superfície;

Os sistemas de drenagem subsuperficial são eficientes na remoção e controle das águas subterrâneas com as origens citadas acima. Dessa forma podem ser projetados objetivando-se tais finalidades e, além dessas, o de minimizar os impactos da presença de água na estrutura do pavimento (CDOT, 2004).

2.4.2.2 Impacto das Águas Subterrâneas nos Projetos Rodoviários

O CDOT (2004) ensina que as águas subterrâneas contribuem de forma muito relevante para o sucesso de um projeto de construção de uma rodovia. Caso não haja a realização de estudos a respeito das águas subterrâneas e da infiltração para que essas sejam adequadamente direcionadas, elas podem, de forma significativa, prejudicar o que se segue:

- A construção do pavimento;
- O desempenho à longo prazo;
- A estabilidade dos taludes.

As águas subterrâneas sempre devem ser consideradas no projeto e na construção de estruturas de drenagem, fundações e estruturas de retenção (CDOT, 2004).

Em resumo, segundo Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) e DNIT (2006), os efeitos danosos nos pavimentos rodoviários em função da água livre, ou seja, da falta de drenagem adequada são os seguintes:

- Perda de resistência, em função da lubrificação, dos materiais granulares e do subleito;
- Bombeamento de finos do solo do subleito e materiais granulares das demais camadas do pavimento com consequente formação de vazios, de degraus, trincamento e deterioração dos acostamentos.
- Arrasamento de partículas dos solos e materiais granulares superficiais, em virtude da velocidade do fluxo das águas;
- Em função da presença de solos expansivos, perda de eficiência do sistema;
- Trincamento dos revestimentos (CA e CCP) em função do contato direto com a água.

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013), em sua obra, apresenta os principais mecanismos de danos ao pavimento relacionados à deficiência da drenagem subsuperficial e, conseqüentemente, ao excesso de água livre. São eles:

- O empenamento das placas de CCP: o CCP se contrai quando perde umidade e, havendo restrições de movimento impostas às placas, tensões de tração são induzidas resultando em fissuras no concreto. As barras de transferência reduzem a intensidade desse fenômeno;

- As poropressões: as pressões da água podem surgir sob o impacto das rodas resultando em erosão e bombeamento de material, além desses efeitos, podem causar o enfraquecimento de bases granulares, desintegração de bases estabilizadas com cimento, a sobrecarga de subleitos e desprendimento da película asfáltica;
- A perda de suporte das camadas: Se dá fundamentalmente pelo aumento de volume dos finos e da lubrificação no contato dos grãos que provoca a redução do atrito interno; e
- A oxidação do ligante asfáltico.

A American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO, 1993) em seu guia apresenta alguns efeitos adversos observados em função da presença de água livre na estrutura interna dos pavimentos, sendo esses efeitos os seguintes:

- A água livre nos revestimentos asfálticos implica na redução de mais de 30% em relação a condição seca do módulo de resiliência e perda de resistência à tração.
- A umidade excessiva pode resultar na perda de rigidez em mais de 50% nas bases e sub-bases essencialmente granulares;
- A água livre é responsável pelo incremento de suscetibilidade a erosão das bases estabilizadas com aglomerantes hidráulicos;
- Subleito saturados de solo fino granular podem ter seus módulos de resiliência reduzidos em mais de 50%.

2.4.3 Identificação de Águas Subsuperficiais

De acordo com CDOT (2004), são grandes as incertezas nas condições subsuperficiais devido a sua variabilidade, mas, em regra, grande parte dos problemas subsuperficiais podem ser identificados antes da execução da obra.

Para se definir os problemas que possam surgir devido às águas subterrâneas, em primeiro lugar, é preciso identificar que essas existem. As observações de campo são fundamentais para a identificação precoce de potenciais problemas que podem vir a ocorrer. Caso algum dos casos apresentados a seguir sejam observados durante a investigação de campo, a recomendação de drenagem subsuperficial poderá ser necessária, como está sugerido no CDOT (2004).

- Fissuras ou falhas no pavimento existente;

- Pontos de acúmulo de água no pavimento ou material da sub-base sujeito ao efeito de “*piping*” através das rachaduras ou juntas;
- Superfície ondulada dos pavimentos;
- Vegetações inundáveis crescendo próximas às valas ou taludes;
- Infiltração nos taludes de corte ou taludes naturais;
- Evidência de possível instabilidade do talude tais como o acúmulo de água nas irregularidades do talude, ocorrência no passado de deslizamento de terra e árvores em ângulos desfavoráveis.

CDOT (2004) afirma que se alguma situação acima citada for observada, uma avaliação de especialista em geotecnia ou hidráulica torna-se necessária, sendo que esses determinarão a necessidade de estudos complementares.

2.4.4 Investigação de Campo

Segundo o CDOT (2004), a validade de qualquer projeto está sujeita a confiabilidade, precisão dos dados levantados e computados no modelo assumido. Na especificação e caracterização dos drenos subsuperficiais é fundamental uma descrição minuciosa e precisa das características do solo e da evolução geológica do maciço. Na maioria dos casos, o levantamento das informações referentes às características e especificidades dos solos e das águas no subsolo de uma determinada área, requer laboriosa investigação de campo e um bom programa de exploração do subsolo.

Através da perfuração é possível determinar o nível da água subterrânea de forma imediata, sendo necessário o monitoramento do furo. Recomenda-se que as investigações de campo ocorram nas estações úmidas, em que se caracterizam as piores condições. Se o problema de drenagem é relativo a infiltração oriunda das valas de irrigação, recomenda-se que a execução do monitoramento se efetue nas estações de irrigação, como verifica em CDOT (2004).

Ainda de acordo com o CDOT (2004), caso o conhecimento relativo à sazonalidade e a flutuação anual dos níveis do lençol sejam considerados como indispensáveis, estações de monitoramento podem ser instaladas e o acompanhamento, monitoramento deve ser processado até que se tenham dados suficientes para a realização do estudo. Nos

projetos de mitigação de inundações em regiões inundáveis, o monitoramento pode tornar-se tão relevante a ponto de sua execução ser necessária.

Baseando em CDOT (2004), tanto os ensaios de campo como os de laboratório objetivam a determinação nas propriedades físicas/químicas do solo e da água subterrânea. Para o projeto dos sistemas de drenagem, com relação às propriedades físicas do solo, os ensaios mais relevantes são os que determinam a distribuição granulométrica, o coeficiente de permeabilidade e a suscetibilidade ao congelamento. Quanto à composição química da água e do solo os ensaios tornam-se interessantes quando se pretende conhecer a qualidade da água subterrânea ou definir o risco de ocorrência dos problemas de corrosão e deposição de solutos nos sistemas de drenagem.

2.5 SISTEMA DE DRENAGEM SUBSUPERFICIAL

2.5.1 Introdução

O principal agente causador de fissuras prematuras nos pavimentos, deterioração e ruptura, certamente, é a presença de água no subleito dos pavimentos. A experiência tem mostrado que, quando presente em base ou subleito composto de agregados grosseiros, a água é o agente patológico mais ofensivo nos pavimentos asfáltico e de concreto armado (CDOT, 2004).

Para se mitigar a deterioração pela ação da água nos subleitos dos pavimentos são sugeridas as seguintes medidas.

- Reduzir, tanto quanto possível, a quantidade de água que alcança a estrutura do pavimento;
- Promover rápida drenagem da água que conseguir penetrar.

A prioridade na mitigação dos efeitos de deterioração da água no subleito é prevenir que essa penetre na estrutura. É essencial que todas as juntas e trincas nos pavimentos sejam seladas para que se previna a infiltração proveniente da superfície da rodovia. Todas as valas de drenagem superficial devem ser graduadas, garantir drenagem positiva e prevenir que a infiltração, oriunda do acúmulo de água, alcance o subleito. Drenos profundos, são comumente utilizados para interceptar a infiltração nas bordas do

pavimento antes que essa penetre no subleito e para rebaixar o nível no lençol freático, que poderia reduzir a vida útil do pavimento.

A outra maneira de se mitigar os danos causados pela água na estrutura é promovendo seu rápido escoamento para fora do seu interior. Esse é um dos objetivos assumidos no desenvolvimento dos sistemas de drenagem dos pavimentos. Pois, além de promover a drenagem da água proveniente do subsolo, os drenos subsuperficiais tem a capacidade de coletar a água infiltrada pelo próprio pavimento e redirecioná-la para fora da estrutura.

Foi observado que com o uso de camadas drenantes, consegue-se estender a vida útil dos pavimentos asfáltico em valores acima de 33%, nos pavimentos rígidos observa-se valores superiores a 50%. Esses resultados fundamentam a assertiva de que os sistemas de pavimento com camada drenante são meios efetivos de remoção da água do subleito, isto é, de proteção do pavimento, o que acaba por prolongar a vida dos pavimentos.

2.5.2 Controle da Água e Elementos do Sistema

2.5.2.1 Critérios de Controle da Água nos Pavimentos

A importância da consideração da água livre no subleito e nas camadas de base e sub-base do pavimento é explicada pela perda de resistência do material proporcionada, segundo Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013), pela:

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

Segundo Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013), o objetivo fundamental dos sistemas de drenagem é impedir que os materiais constituintes das diferentes camadas do pavimento fiquem saturados, ou expostos a elevados níveis de umidade por longos períodos de tempo. O controle da água, com o intuito de minimizar os problemas resultantes da saturação, é resumido em três medidas:

- Minimizar a infiltração de água na estrutura interna do pavimento selando adequadamente o revestimento;
- Prover drenagem interna para remover adequadamente toda água que possa se infiltrar no pavimento.
- Empregar, em todas as camadas, materiais pouco suscetíveis à umidade e resistentes ao trincamento por causa da água;

2.5.2.2 Drenagem Subsuperficial

No manual de pavimentação do DNIT (2006) define-se sistema de drenagem do pavimento de uma rodovia como o conjunto de todos os dispositivos, sejam de natureza superficial, subsuperficial ou profunda, executados objetivando-se o desvio da água de sua plataforma.

O sistema de drenagem subsuperficial é constituído pela camada drenante, pelo dreno longitudinal raso ou profundo e por drenos transversais, quando necessários. O sistema é eficiente quando concebidos e dimensionados de forma assegurar seu bom desempenho hidráulico ao longo de toda vida útil do sistema (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013). As Figuras 2.7 e 2.8 apresentam o correto posicionamento das componentes do sistema de drenagem subsuperficial.

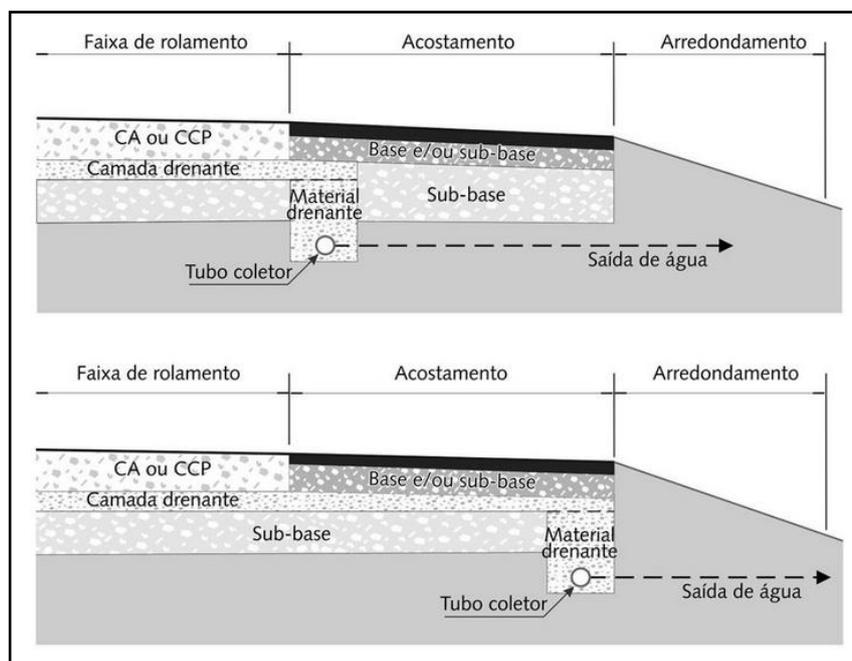


Figura 2.7: Posicionamento dos elementos constituintes do sistema de drenagem subsuperficial com drenos profundos longitudinais (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

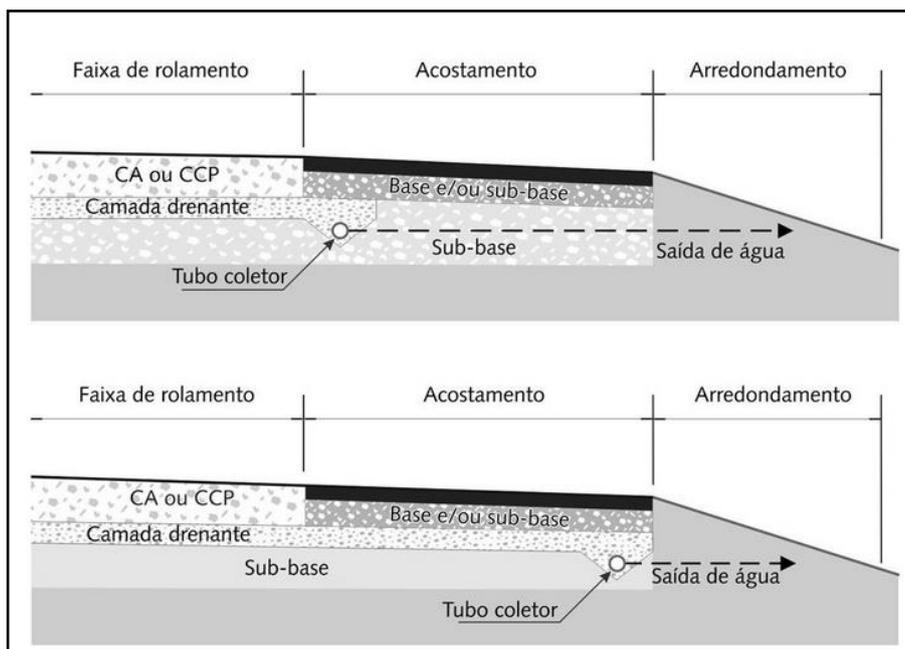


Figura 2.8: Posicionamento dos elementos constituintes do sistema de drenagem subsuperficial com drenos rasos longitudinais (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

2.5.2.3 Necessidade de Drenagem Subssuperficial

Quanto à necessidade de sistemas de drenagem subsuperficial, Cedergren (*apud* Suzuki, 2013) recomendou a implantação nos seguintes casos:

- Altura de precipitação média anual superior a 254mm;
- Número de repetições aproximadamente igual a 10^6 , considerando um período de 10 anos.

O manual de drenagem de rodovias do DNIT (2006) recomenda a instalação de dispositivos de drenagem do pavimento nos seguintes casos:

- Em rodovias localizadas em regiões em que a altura de precipitação média anual é superior a 1500 mm;
- Em rodovias com volume diário médio de veículos comerciais nos dois sentidos maior que 500.

2.5.3 Concepção do Sistema de Drenagem Subsuperficial – Elementos Constituintes

2.5.3.1 Introdução

Os principais componentes dos sistemas de drenagem subsuperficial, de acordo com Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) e DNIT (2006), são:

- Camada drenante: constituída com material granular, colocada imediatamente abaixo do revestimento e cuja finalidade é drenar as águas infiltradas no revestimento para fora da pista de rolamento ou até o topo dos drenos longitudinais;
- Dreno longitudinal: dreno cego ou tubular, raso ou profundo que recebe as águas oriundas da camada drenante e tem por finalidade coletar a água e direcioná-las aos tubos de saída lateral que efetuam o lançamento final em local apropriado.
- Dreno lateral de base: possuem função similar aos drenos longitudinais, porém se utilizam dos materiais granulares do acostamento na drenagem. São uma alternativa aos drenos longitudinais.
- Dreno transversal: posicionado transversalmente a pista de rolamento, em toda a largura da plataforma;
- Camada separadora: constituída de agregado com graduação densa e colocada na estrutura com o intuito de evitar a intrusão de finos na camada drenante.

Na Figura 2.9 é apresentado um detalhe de uma estrutura usual de drenagem subsuperficial.

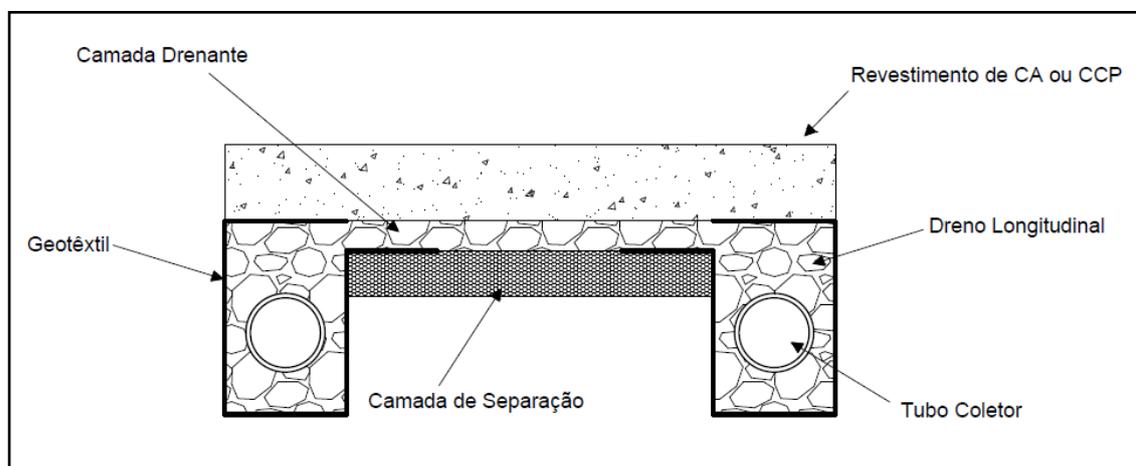


Figura 2.9: Detalhe de um sistema de drenagem subsuperficial (CDOT, 2004).

2.5.3.2 Camada Drenante

A camada drenante é constituída de material com elevada permeabilidade, podendo ser simples ou tratado, isto é, estabilizado com aglomerante asfáltico ou hidráulico. O agregado utilizado, obrigatoriamente, deve ter maior transmissividade hidráulica que o material que o envolve. A camada drenante encontra-se imediatamente abaixo do revestimento e acima do subleito, e possui conexão direta com os drenos longitudinais (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

É conveniente que o projetista determine a aceitação da origem dos agregados especificados para a camada drenante, da mesma forma com a especificação da permeabilidade, nas notas do projeto. Essa informação resguarda o engenheiro na determinação da capacidade do dreno, na especificação da área de seção transversal, na declividade e na avaliação da necessidade de se utilizar um tubo coletor (CDOT, 2004).

Além da contribuição ao suporte da estrutura de pavimento, ao se projetar a camada drenante deve-se ter em mente que sua finalidade principal é conduzir, o mais rápido possível, a água interceptada para os drenos longitudinais e esses para os tubos de saída lateral. Sua espessura é função das condições pluviométricas locais e fixada em função da necessidade de drenagem da rodovia. A capacidade da camada drenante é determinada pela lei de Darcy (CDOT, 2004 e Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

A base permeável, segundo Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013), deve ser concebida segundo os seguintes princípios fundamentais:

- A graduação da camada, principalmente nos aterros, deve assegurar o escoamento da água de tal forma que o fluxo observado seja relativamente lento, prevenindo-se a erosão interna;
- A camada deve possuir capacidade de suporte, sem apresentar deformações permanentes nas trilhas de roda;

O método de dimensionamento da espessura da camada drenante recomendado pela Federal Highway Administration (FHWA) e AASHTO é o método de tempo de drenagem, que determina o tempo necessário para que ocorram 50% da drenagem da camada saturada.

Um dos padrões de qualidade utilizados pela AASHTO (1993) relaciona-se com o tempo de drenagem de 50% e são expressos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Qualidade da drenagem em função do tempo de drenagem (AASHTO, 1993 – apêndice DD).

Qualidade da Drenagem	Tempo de Drenagem
Excelente	2 horas
Boa	1 dia
Regular	7 dias
Pobre	1 mês
Muito Pobre	Sem drenagem

2.5.3.3 Drenos Longitudinais

Os drenos longitudinais são também conhecidos como drenos subsuperficiais de borda ou drenos de pavimentos. A sua principal função é coletar as águas que a camada drenante capta e conduzi-las até as saídas que desaguam em locais que não oferecem riscos estruturais ao pavimento. Deve-se destacar que esse dispositivo possui profundidade pequena e não tem a função de rebaixar lençóis freáticos elevados e nem de capturar águas de fontes subterrâneas, nessas situações se utiliza drenos profundos longitudinais. Normalmente, os drenos de borda são formados por trincheira revestida ou não por geotêxtil e preenchidos por agregados granulares com ou sem tubulação, sendo esta última utilizada para elevar a capacidade de vazão do dispositivo (Suzuki; Azevedo; Kabbach,2013).

Os drenos longitudinais podem ser de diferentes tipos:

- Drenos cegos: formados basicamente de material granular, tipo brita ou areia, possuem capacidade hidráulica em função da seção transversal, da declividade longitudinal e do coeficiente de permeabilidade do material utilizado. Sua capacidade hidráulica é relativamente reduzida e, de acordo com o volume a ser drenado, o espaçamento das saídas de água é bastante pequeno;
- Drenos tubulares: possuem elevada capacidade hidráulica, dependendo do diâmetro variável entre 5 e 10 cm e dimensionados como conduto livre.
- Dreno com geocomposto: Tais drenos começaram a ser difundidos em projetos de restauração por sua facilidade de instalação.

De acordo com Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013), para evitar comaltação, normalmente se utiliza geotêxteis envolvendo a vala drenante independentemente do

tipo de dreno empregado, a permeabilidade do geotêxtil deve ser de quatro a dez vezes superior a do solo. Vale a pena ressaltar que a manta apenas evita a entrada de finos, ela não impede os movimentos e nem a erosão de finos nas camadas adjacentes. O dreno longitudinal deve possuir uma ligação adequada com as camadas permeáveis adjacentes, ter capacidade hidráulica capaz de drenar todo o volume de água que chega nele sem que ocorra entupimento devido ao carreamento de finos dentro da tubulação ao longo do tempo. A Figura 2.10 ilustra os diferentes tipos de drenos.

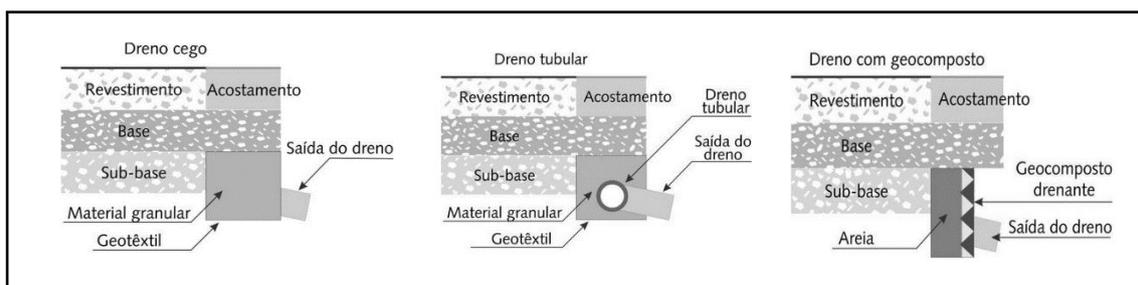


Figura 2.10: Tipos de drenos longitudinais (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Em projetos de instalação posterior e de restauração é necessário que se faça um projeto mais detalhado devido às condicionantes adversas existentes de provável heterogeneidade e nível de saturação dos vários materiais envolvidos, aos diferentes níveis de deterioração e trincamento da estrutura, às dificuldades construtivas, às condições de confinamento e às declividades transversais desfavoráveis das camadas, Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013).

Drenos profundos podem, segundo CDOT (2004), ser utilizados de forma eficiente nas situações seguintes:

- Em terrenos íngremes, onde o problema de estabilidade não seja relevante, a vala pode ser escavada ao longo do leito da rodovia próximo ao pé do talude do aterro de corte;
- Drenos profundos longitudinais também podem ser locados ao longo de pé dos taludes de aterro com a finalidade de interceptar lençol freáticos rasos;

Para o DNIT (2006), os drenos profundos são formados por vala, materiais drenantes e filtrantes, sendo possível a existência de tubo-dreno, juntas, caixas de inspeção e estruturas de deságue. Para o rebaixamento do lençol freático, a profundidade de 1,5 m é suficiente para drenos profundos. Já para drenos subsuperficiais, recomenda-se a adoção de uma profundidade de 40 cm abaixo do fundo da camada drenante. As valas,

abertas manual ou mecanicamente, devem ter no fundo a largura mínima de 50 cm e de boca a largura do fundo mais 10 cm. Sua altura vai depender da profundidade do lençol freático sendo a profundidade máxima igual a 2,00 m. Os tubos deverão ser instalados com os furos voltados para cima, em casos especiais de terrenos altamente porosos ou rochas com fendas amplas. A posição dos furos voltados para cima exige que se encha a base da vala do dreno com material impermeável até a altura dos furos iniciais. Já na condição oposta, deve-se colocar filtro como material de proteção no fundo da vala.

2.5.3.4 Drenos Transversais

Os drenos transversais destinam-se a receber o fluxo longitudinal da água, em relação a via, no interior das camadas do pavimento ou, ainda coletar a água proveniente de camadas permeáveis de reparos profundos localizados, efetuando o cruzamento da pista e respectivo final até o local de deságue (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

O mesmo autor indica sua utilização nos seguintes casos:

- Pontos baixos das curvas verticais côncavas;
- Pontos de transição da superelevação com declividade transversal quase nula;
- Trechos de via com greides suaves e declividade longitudinais inferiores a 0,35%;
- Pontos de transição de corte-aterro;
- Próximos aos encontros das obras de arte especiais e emboques de túneis;
- Onde se deseja retirar as águas acumuladas nas bases permeáveis, não drenadas por outros dispositivos, no caso de restaurações.

2.5.3.5 Camada de Separação

A camada separadora ou de bloqueio encontra-se entre a base permeável e o subleito ou sub-base e pode ser executada com material granular ou com manta geotêxtil. Tem por função impedir que os finos presentes nas camadas subjacentes sejam transportados para o interior da base permeável, de graduação mais aberta, isto é, a colmatagem. Dessa forma, o material empregado na camada de bloqueio deve possuir granulometria adequada para proteger a camada drenante dos finos oriundos do subleito e, ao mesmo tempo, não colmatar a base permeável (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Adicionalmente à função de proteção da camada de separação, Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) apresenta outras três funções:

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

Em seu manual de drenagem de rodovias, o DNIT (2006) recomenda que os materiais granulares da camada drenante sejam protegidos dos materiais finos para que a capacidade de operação não seja prejudicada. Na Figura 2.11 são apresentados exemplos dos tipos de camada de separação e seu correto posicionamento.

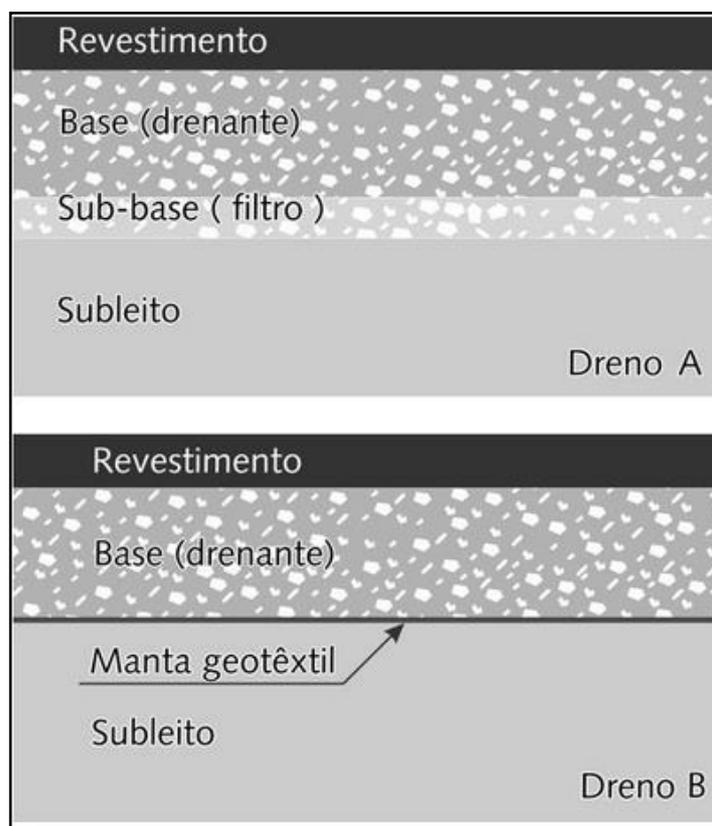


Figura 2.11: Tipos de camada separadora (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Recomenda-se, caso a camada drenante seja aplicada acima de outra camada densa, a previsão de camada separadora na interface entre as duas camadas para que o carreamento de finos para o interior da camada drenante seja prevenido (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

2.5.3.6 Resumo

A Tabela 2.5 resume os principais elementos constituintes e suas respectivas funções dentro do sistema de drenagem subsuperficial.

Tabela 2.5: Principais elementos constituintes e suas funções no sistema de drenagem subsuperficial (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Elemento		Função Hidráulica/Estrutural
Camada drenante		<ul style="list-style-type: none"> • Coletar a água infiltrada, conduzi-la até os drenos longitudinais, prover adequado suporte ao pavimento • Pode ser estabilizada ou tratada com ligante hidráulico ou asfáltico • Pode ser empregada isoladamente ou com outra camada
Dreno raso longitudinal	Tubo Coletor	<ul style="list-style-type: none"> • Tubo perfurado ou fendilhado • Receber a água da camada drenante e transportá-la até os tubos de saída lateral
	Cego	<ul style="list-style-type: none"> • Constituído essencialmente de brita • Receber a água da camada drenante e transportá-la até a saída lateral
	Tubo de saída lateral	<ul style="list-style-type: none"> • Coletar a água do dreno longitudinal e efetuar o lançamento final em local e cota adequados
Camada separadora		<ul style="list-style-type: none"> • Constituída de agregados de graduação densa, estabilizada ou não, ou substituída por geotêxtil • Evitar o agulhamento e manter separados os materiais da camada drenante e do subleito • Reduzir a migração de finos e, conseqüentemente, a comaltação da camada drenante
Dreno raso Transversal		<ul style="list-style-type: none"> • Constituído preferencialmente de agregado drenante • Coletar a água que percola longitudinalmente no pavimento nas regiões de baixa declividade
Drenos Laterais de Base		<ul style="list-style-type: none"> • Constituído de material granular, estabilizado ou não • Coletar a água da camada drenante da pista e efetuar o lançamento lateral e final em substituição aos drenos rasos longitudinais

A Figura 2.12 ilustra um exemplo de sistema de drenagem subsuperficial aplicado em um trecho em curva com seção superelevada.

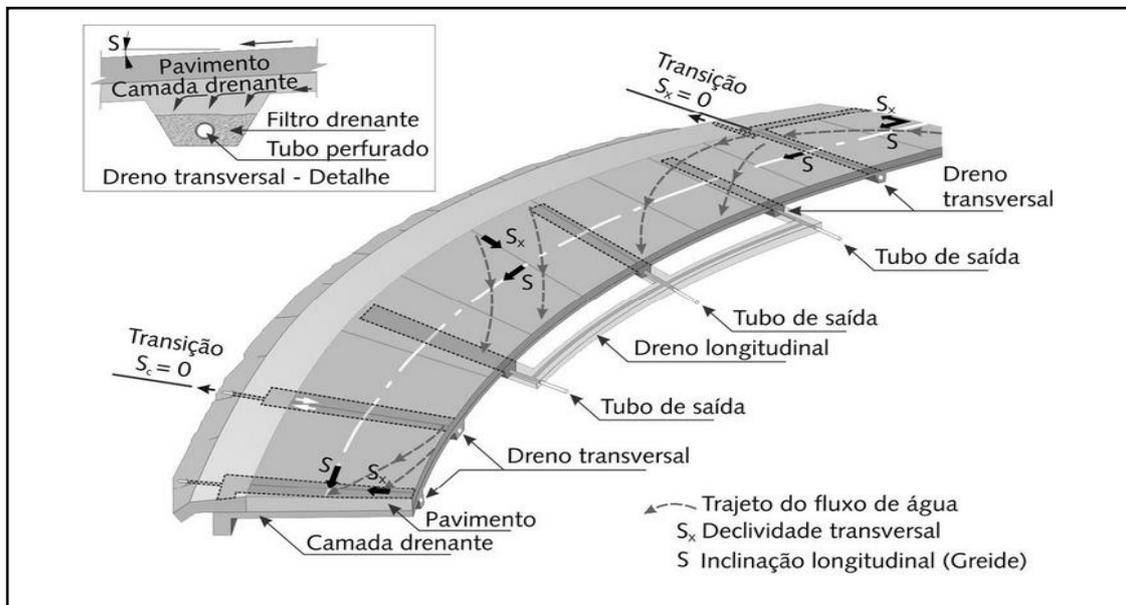


Figura 2.12: Sistema de drenagem subsuperficial em um trecho em curva (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

2.5.4 Elementos de Projeto

Os objetivos básicos do sistema de drenagem subsuperficial são: coletar toda a água infiltrada no pavimento e drenar essa água, no menor intervalo de tempo possível, para fora do pavimento. Para que tais objetivos sejam alcançados o CDOT (2004) lista os seguintes parâmetros necessários:

- A taxa de infiltração no pavimento para a chuva.
- A taxa de descarga da base permeável para os sistemas dos drenos longitudinais;
- A taxa de fluxo nos tubos dos drenos longitudinais.

O DNIT (2006), em seu manual de drenagem, afirma, ainda, que são necessárias para a solução dos problemas de drenagem:

- Conhecimento da topografia da área;

- Observações geológicas e pedológicas necessárias, com obtenção de amostras dos solos por meio de sondagens;

Tendo os parâmetros citados acima e efetuando os cálculos hidráulicos adicionais necessários, pode-se determinar os requisitos de cada componente do sistema, a seguir apresentados.

- Extensão longitudinal e lateral da base permeável de agregado graúdo;
- Permeabilidade da base permeável de agregado graúdo;
- Espessura da camada drenante;
- Inclinação transversal da camada drenante;
- Requisitos da camada de separação;
- Diâmetro da tubulação perfurada dos drenos longitudinais;
- Declividade dos drenos longitudinais;
- Espaçamento dos tubos de saída lateral;
- Locação dos tubos de saída lateral.

É relevante lembrar que, embora as componentes sejam dimensionadas isoladamente, o sistema como um todo deve ser adequado para que toda a água infiltrada durante a chuva de projeto seja removida. O sistema deve ser projetado de tal forma que, seja assegurado que no mínimo 50% da água dentro do sistema, na condição de saturação completa, após 1 hora do término da chuva, seja removida.

2.5.5 Critérios para o Uso do Sistema

Os sistemas de drenagem de pavimentos têm apresentado bons resultados com respeito à manutenção dos pavimentos, resultando em maior vida útil tanto em novos como em pavimentos já existentes. Embora efetivos, agregam custos iniciais, acarretando uma necessidade de verificação, por meio de estudo, da evolução dos custos efetivos. Nesse estudo de viabilidade econômica é indispensável que sejam considerados os ganhos provenientes da redução de manutenção e da extensão do tempo de serviço do pavimento com drenagem (CDOT, 2004).

Segundo CDOT (2004) e DNIT (2006), as seguintes condições devem ser usadas como critérios na determinação da possibilidade de ocorrência de subleito saturado e necessidade da implantação de um sistema de drenagem por camada drenante.

- Fissuras ou falhas em pavimentos já existentes devido à presença de água subsuperficial;
- Nível do lençol freático próximo ao greide de terraplanagem;
- Solos do subleito com permeabilidade menor que 1ft/dia ($3,53 \times 10^{-6}$ m/s), tipicamente, siltes e argilas;
- Solos do subleito suscetíveis ao congelamento (tipicamente siltes)
- Presença de solos expansivos no subleito;
- Pavimentos localizados em curvas verticais côncavas ou abaixo de estruturas de pontes;
- Pavimento que terá seção considerada tipicamente larga em terrenos planos em níveis baixos;
- Nos trechos em corte;
- Na base de aterros onde houver água livre próximo ao terreno natural;
- Nas áreas eventualmente saturadas próximas aos pés dos taludes.

Além dessas, recomenda-se para todos os pavimentos, sejam de CA ou CCP, com espessura maior que 0,20 m, a avaliação da necessidade de implantação de um sistema drenante do tipo camada drenante (CDOT, 2004).

2.6 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Cada componente integrante do sistema de drenagem subsuperficial detém certa função específica, sendo importante ressaltar que a união das componentes deve resultar em um mecanismo de funcionamento de acordo com o concebido, isto é, o funcionamento do conjunto como sistema deve corresponder ao planejado. Além disso, o projeto de qualquer dreno subsuperficial deve assegurar um sistema executável, compatível com o solo que o circunda, além de propiciar uma boa relação custo-benefício. A seguir é apresentado as partes integrantes de um sistema de drenagem subsuperficial.

- Filtro/ camada de separação;
- Camada drenante de condução;
- Tubo coletor – drenos longitudinais;
- Tubos de saída lateral;

O entendimento do funcionamento do mecanismo de interação entre as partes que compõe os drenos subsuperficiais é essencial. As peculiaridades e singularidades do campo resultam em condições particulares que devem ser apreciadas e, por meio do projeto adequado das componentes do sistema de drenagem, certificar que o sistema funcionará como o previsto (CDOT, 2004).

2.6.1 Drenos Longitudinais

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) ensina que os materiais empregados com a função de filtro ou envelopamento devem ser escolhidos segundo os seguintes aspectos:

- Prevenção da colmatação do material drenante;
- Ser mais permeável que o solo adjacente;
- Camada de assentamento e apoio ao dreno;
- Garantia de estabilização do solo que está sendo drenado.

Existem inúmeros critérios usados no dimensionamento de filtros granulares. O CDOT (2004) em seu manual adotou o desenvolvido pela *United States Army Corps Engineers* USBR.

Para o critério de filtração, recomenda-se:

$$D_{15}(\text{filtro}) \leq 5D_{85}(\text{solo}) \quad (2.14)$$

onde,

D_{15} e D_{85} = tamanho do grão correspondente a 15% e 85% de material passando.

Para o critério de uniformidade, recomenda-se:

$$D_{50}(\text{filtro}) \leq 25D_{50}(\text{solo}) \quad (2.15)$$

onde,

D_{50} = tamanho do grão correspondente a 50% de material passando.

Para o critério de graduação e estabilidade em que o filtro granular deverá ser bem graduado e estável, o coeficiente de uniformidade (C_u) deve estar dentro do seguinte limite:

$$20 \leq C_u \leq 40 \quad (2.16)$$

O C_u da equação acima deve ser calculado para o filtro.

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) recomenda os seguintes critérios.

Para o critério relacionado ao entupimento, recomenda-se:

$$D_{15}(\text{filtro}) \leq 5 \cdot D_{85}(\text{solo}) \quad (2.17)$$

onde,

D_{15} e D_{85} = tamanho do grão correspondente a 15% e 85% de material passando.

Para o critério relativo à permeabilidade, recomenda-se:

$$D_{15}(\text{filtro}) \leq 5 \cdot D_{15}(\text{solo}) \quad (2.18)$$

Para os critérios adicionais, recomenda-se:

a) Para garantir que as curvas granulométricas do filtro e do material sejam aproximadamente paralelas:

$$D_{50}(\text{filtro}) \leq 25 \cdot D_{50}(\text{solo}) \quad (2.19)$$

b) Para mitigar a segregação:

$$C_u(\text{filtro}) \leq 25 \quad (2.20)$$

Para garantir o não entupimento do tubo coletor, adotou-se para tubos com fendas ou furos circulares os seguintes critérios:

$$D_{85}(\text{filtro}) \geq 1,2 \cdot \phi_f \quad (2.21)$$

$$D_{85}(\text{filtro}) \geq 1,0 \cdot L_f \quad (2.22)$$

onde,

ϕ_f = diâmetro do furo [mm];

L_f = largura da fenda [mm];

No manual de pavimentação e drenagem do DNIT (2006) encontram-se as seguintes recomendações:

Para a condição de permeabilidade, recomenda-se:

$$D_{15}(filtro) \geq 5 \cdot D_{15}(solo) \quad (2.23)$$

$$D_{15}(m.d) \geq 5 \cdot D_{85}(filtro) \quad (2.24)$$

Para a condição de não entupimento do material filtrante, recomenda-se:

$$D_{15}(filtro) \leq 5 \cdot D_{85}(solo) \quad (2.25)$$

$$D_{15}(filtro) \leq 40 \cdot D_{15}(solo) \quad (2.26)$$

$$D_{50}(filtro) \leq 25 \cdot D_{50}(solo) \quad (2.27)$$

Para a condição de não entupimento do material drenante, recomenda-se:

$$D_{15}(m.d) \leq 40 \cdot D_{85}(solo) \quad (2.28)$$

$$D_{15}(m.d) \leq 5 \cdot D_{85}(solo) \quad (2.29)$$

Para a condição de não entupimento do tubo, recomenda-se:

$$D_{85}(m.d) \geq 2 \cdot D_a \quad (2.30)$$

onde,

D_a é o diâmetro dos furos nos tubos coletores e $m.d$ é o material drenante.

Os filtros granulares não devem ter mais de 5% de material passando na peneira N°200 (DNIT, 2006). Caso uma única camada de material granular não seja suficiente para satisfazer o critério de filtro, uma ou mais camadas devem ser adicionadas (CDOT, 2004).

Adicionalmente aos critérios de “piping” e de permeabilidade, a curva granulométrica do subleito e das camadas que compõem a estrutura devem ser aproximadamente

paralelas. O filtro granular deve, também, ser estável tanto quimicamente quanto estruturalmente (CDOT, 2004).

De forma similar, a interface filtro/dreno deve atender aos mesmos requisitos expostos acima para que se garanta que o material do filtro não penetre no material drenante e prejudique o fluxo (CDOT, 2004).

2.6.2 Tubos Coletores

As informações apresentadas neste tópico foram baseadas no manual de drenagem publicado pelo CDOT (2004).

Os tubos coletores são geralmente perfurados ou ranhurados para que possam coletar a água da camada drenante e conduzi-la aos extravasores. Os materiais comumente utilizados incluem tubos de plástico, concreto e aço corrugado. A escolha do material do tubo deve basear-se na resistência requerida à corrosão, custo e disponibilidade.

Não é necessária a previsão de tubos em todos os drenos profundos. Frequentemente, a camada drenante será permeável o bastante para prover suficiente condução da água e o tubo coletor não irá prover nenhuma vantagem significativa a longo prazo. Embora o custo de materiais adicional na especificação não seja significativo, o trabalho associado na locação dos tubos, particularmente sob condições saturadas, pode de forma significativa acrescentar os custos de instalação do sistema. Tubos coletores não devem ser previstos em drenos profundos instalados sobre ou próximo de áreas com taludes instáveis.

Os critérios de dimensionamento recomendados para o projeto de tubo-dreno e sua execução são as seguintes:

- A declividade mínima recomendada é 0,5% e nunca menor que 0,2%;
- O diâmetro mínimo do tubo coletor é de 6 in (0,150 m); para comprimentos maiores que 500 ft (150 m), o mínimo passa a ser de 8 in (0,200 m); e
- As ranhuras e a perfuração devem ser pequenas o bastante para garantir que o material da camada drenante não irá entrar no tubo-dreno. A abertura máxima na tubulação deve ser superior a D_{85} do material da camada drenante.

2.6.3 Camada Drenante

O CDOT (2004) recomenda os seguintes critérios relativos ao dimensionamento da camada drenante:

- Permeabilidade mínima de 1000ft/dia ($3,47 \times 10^{-1}$ cm/s) é recomendada para a base permeável. A base permeável deve ser composta de agregados britados angulosos com 100% passando na peneira de abertura 1 1/2" e menos de 2% passando na peneira N°.16;
- A base permeável deve ter espessura mínima de 4 polegadas (0,10m);
- Se for prevista atividade de construção em cima da base permeável antes da pavimentação, a base deve ser estabilizada;
- O índice de curvatura deve estar entre o intervalo $0,63 \leq C_c \leq 1,64$ e o índice de uniformidade estar entre $2 \leq C_u \leq 20$.

Se for previsto algum tipo de tráfego, na etapa de construção, sob a camada permeável não pavimentada, isto é, antes da aplicação do asfalto, é conveniente, segundo CDOT (2004), que essa seja estabilizada. Do exposto entende-se, então, que o principal objetivo da estabilização da base permeável é proporcionar uma plataforma estável e segura na etapa de construção. As bases permeáveis estabilizadas não podem ter sua capacidade de drenar, significativamente afetadas, por isso, é recomendado que possuam permeabilidade maior que 1000ft/dia ($3,47 \times 10^{-1}$ cm/s).

Segundo CDOT (2004) a estabilização das bases permeáveis pode ser executada tanto com cimento como com asfalto. Caso se opte por estabilização com asfalto o teor recomendado é de 2 a 3%. Já na estabilização com cimento é recomendada uma taxa de 2 a 3 sacos por jarda cúbica ($1\text{yd}^3 = 0,78\text{m}^3$).

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) recomenda que as faixas granulométricas dos materiais empregados em camadas drenantes não pode resultar em uma diferença grande entre os diâmetros máximos e mínimos. Por exemplo: 1 1/4" a 3/4", 3/8" a 1/8". Tal recomendação objetiva a manutenção da permeabilidade do sistema. A Figura 2.13 apresenta algumas curvas típicas utilizadas em colchões drenantes e filtros recomendados pela experiência.

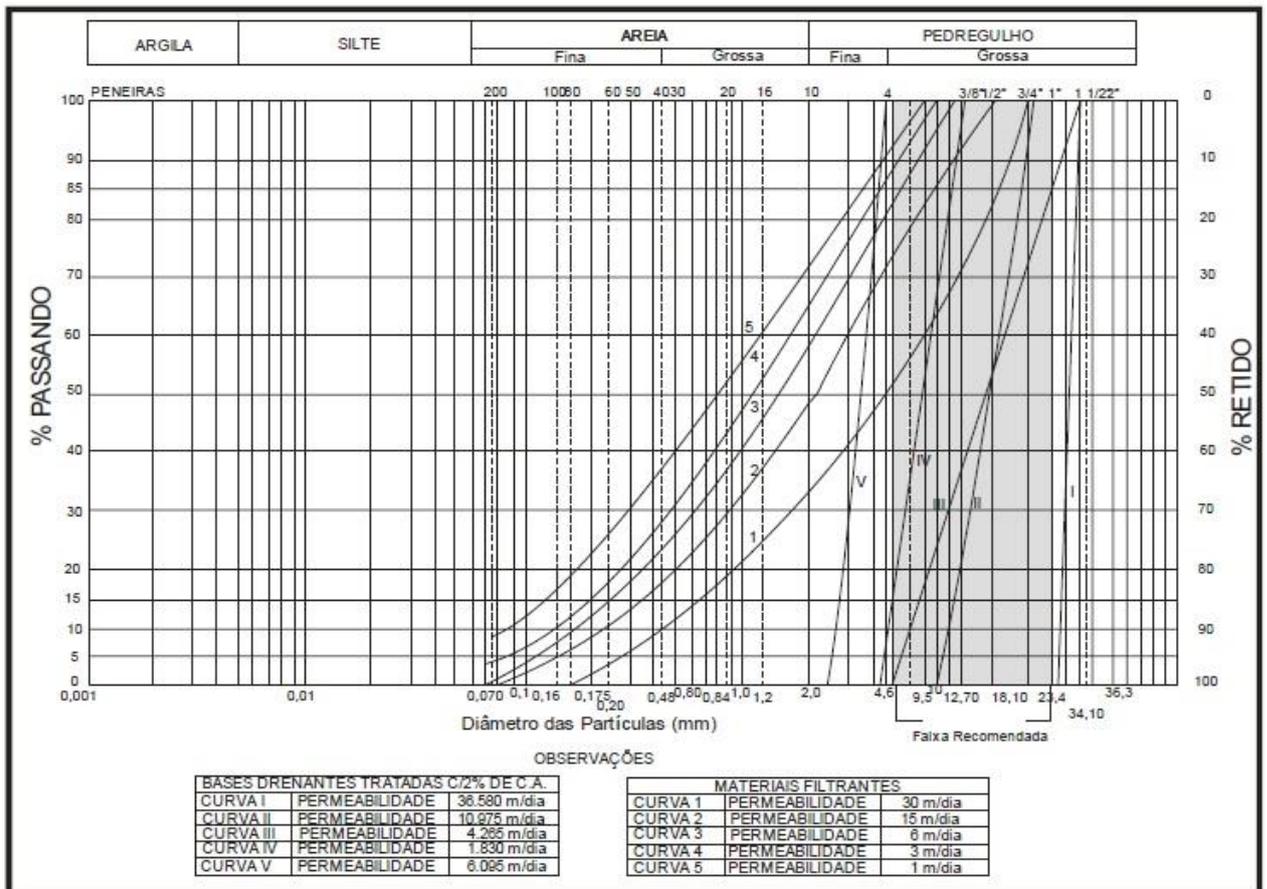


Figura 2.13: Graduações recomendadas para camada drenante (DNIT,2006).

Na Tabela 2.6 apresentam-se curvas granulométricas de camadas drenantes adotadas por diferentes departamentos rodoviários americanos.

Tabela 2.6: Faixas granulométricas típicas de camadas drenantes (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Peneira		Iowa	Minnesota	Nova Jersey	Pensilvânia
Nº	Abertura (mm)				
2"	50,80	-	-	-	100
1 1/2"	38,10	-	-	100	-
1"	25,40	100	100	95 – 100	-
3/4"	19,05	-	65 – 100	-	52 – 100
1/2"	12,70	-	-	60 – 80	-
3/8"	9,525	-	35 – 70	-	33 – 65
Nº 4	4,80	-	20 – 45	40 – 55	8 – 40
Nº 8	2,40	10 – 30	-	5 – 25	-
Nº 10	2,00	-	8 – 25	-	-
Nº 16	1,20	-	-	0 – 8	0 – 12
Nº 40	0,42	-	2 – 10	-	-
Nº 50	0,30	0 – 15	-	0 – 5	-
Nº 200	0,075	0 – 6	0 – 3	-	0 – 5

2.6.4 Camada de Separação

Conforme orientação de Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013), no dimensionamento da camada de separação devem ser avaliados os seguintes critérios:

Para o não entupimento, recomenda-se:

$$D_{15}(C.S) \leq 5 \cdot D_{15}(solo) \quad (2.31)$$

$$D_{15}(C.D) \leq 5 \cdot D_{15}(C.S) \quad (2.32)$$

Para garantir a uniformidade, recomenda-se:

$$D_{50}(C.S) \leq 25 \cdot D_{50}(solo) \quad (2.33)$$

$$D_{50}(C.D) \leq 25 \cdot D_{50}(C.S) \quad (2.34)$$

onde,

D_{15} e D_{50} = tamanho do grão correspondente a 15% e 50% de material passando;

C.S = camada de separação;

C.D = camada drenante.

Recomenda-se ainda que:

- Porcentagem de finos passando na peneira de 0,075 mm inferior a 12%;
- Coeficiente de uniformidade maior que 2, para minimizar problemas de segregação;
- Espessura mínima de 10 cm. Porém, caso o CBR do subleito seja inferior a 6% e o atender a tráfego pesado, deve-se adotar valores maiores ou efetuar a estabilização do material.

2.6.4.1 Critério para Seleção do Material Granular

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) orienta que os materiais utilizados na camada de bloqueio devem, além de serem densamente graduados e possuírem baixa permeabilidade, atender os seguintes requisitos:

- Devem ser constituídos de pedras britadas, com grãos duráveis, limpos e de formato angular para permitir bom travamento mecânico;
- O desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles deve ser inferior a 50%;
- As perdas nos resultados de ensaios de durabilidade ao sulfato de sódio e de magnésio deverão ser inferiores a 12% e 18%, respectivamente;
- A mistura deve apresentar CBR maior ou igual a 50%, correspondente à energia Proctor Modificado.

Faixas granulométricas típicas utilizadas em camadas de separação em rodovias de vários estados americanos são apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Faixas granulométricas de agregados para camadas separadoras (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Estado (EUA)	Porcentagem passando em cada peneira (mm)											
	50,8	38,1	25,4	19,05	12,07	9,525	4,75	2,36	1,16	0,60	0,425	0,075
Flórida	-	-	100	90 – 100	-	65 – 85	-	-	30 – 50	-	-	4 – 8
Havaí	100	-	-	-	-	-	20 – 60	-	-	-	-	0 – 15
Illinois	-	100	90 – 100	-	60 – 90	-	30 – 55	-	10 – 40	-	-	4 – 12
Kansas	100	95 – 100	-	70 – 95	-	-	40 – 65	30 – 55	-	-	-	8 – 20
Maryland	100	95 – 100	-	70 – 92	-	50 – 70	35 – 55	-	-	12 – 25	-	0 – 8
Minnesota	-	-	100	95 – 100	-	70 – 92	-	50 – 70	35 – 55	-	-	10 – 35
Nevada	-	-	100	90 – 100	-	50 – 90	35 – 80	20 – 65	-	-	10 – 35	3 – 10
Tennessee	-	100	85 – 100	65 – 95	-	50 – 80	40 – 65	-	20 – 40	-	-	-

2.6.4.2 Critérios para Seleção da Manta Geotêxtil

Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) em sua obra lista os aspectos que um geossintético deve possuir para ser aplicado em camadas de bloqueio.

- Permitir a passagem livre de água;
- Reter os finos provenientes do solo de fundação;
- Resistir esforços a que será submetido ao longo da vida útil da obra.

O mesmo autor recomenda os seguintes critérios de avaliação para o dimensionamento de camadas separadoras de geocomposto:

Para o critério de permeabilidade, de acordo com o procedimento do comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (*apud* Suzuki, 2013), deve ser observada a seguinte inequação:

$$k_n \geq A \cdot t_g \cdot k_s \quad (2.35)$$

onde,

k_n = Coeficiente de permeabilidade normal do geotêxtil;

t_g = Espessura nominal do geotêxtil [m];

k_s = Coeficiente de permeabilidade do solo base [m/s];

A = Constante conforme Tabela 2.8;

Tabela 2.8: Valores da constante A (Suzuki; Azevedo; Kabbach, 2013).

Situação de aplicação	Coefficiente adimensional
	A
Com baixos gradientes hidráulicos e solos limpos tipicamente arenosos	10^3
Com baixos gradientes hidráulicos e solos de baixa permeabilidade (siltes e argilas)	10^4
Com gradiente elevado em obras de grande responsabilidade	10^5

Para a capacidade de retenção, de acordo com o método do CFGG (*apud* DNIT, 2006), o critério de retenção é verificado analisando-se a seguinte inequação:

$$O_f \leq C \cdot D_{85} \quad (2.36)$$

onde,

O_f = Abertura de filtração do geotêxtil [mm];

C = Produto dos fatores C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , indicados na Tabela 2.9;

D_{85} = Diâmetro das partículas correspondendo a 85% passando [mm]

Tabela 2.9: Valores dos coeficientes C_1 , C_2 , C_3 e C_4 (DNIT, 2006).

Fatores do Coeficiente C	Valor	Situação de utilização
C_1 - Granulométrico	1,00	Granulometria contínua e bem graduada
	0,80	Granulometria uniforme
C_2 - Adensamento	1,25	Solos densos e confinados
	0,80	Solos fofos e não confinados
C_3 - Hidráulico	1,00	Gradiente menor que 5%
	0,80	Gradiente entre 5% e 20%
	0,60	Fluxo reverso
C_4 - Função	1,00	Apenas função de filtro
	0,30	Função filtro drenante

2.6.5 Tubos de Saída Lateral

Os tubos de saída lateral para os drenos longitudinais devem ser previstos para conduzir a água coletada para o sistema de drenagem superficial. A tubulação utilizada para este propósito não é perfurada e envolta com solo de baixa permeabilidade. A locação dos tubos de saída lateral é definida em função da topografia e da configuração das características de drenagem superficial. Os tubos de saída lateral devem sofrer manutenções regularmente, anualmente e após precipitações incomuns, para que se garanta seu desempenho durante a vida útil do sistema. A seguir, são apresentados os critérios recomendados no dimensionamento das saídas laterais para os drenos longitudinais de acordo com o CDOT (2004) e DNIT (2006):

- O diâmetro dos tubos de saída lateral sempre deve ser maior ou igual ao do tubo coletor;
- O comprimento máximo da tubulação é de 1000 ft (305 m);
- No trecho final de lançamento, é recomendável que o tubo de declividade mínima de 3% e, no caso de saída junto a uma valeta de drenagem, esteja posicionado pelo menos a 0,15m da cota prevista de inundação, para uma vazão de projeto considerando período de retorno de 10 anos;
- As saídas laterais devem ser protegidas com grades para prevenir que pequenos animais adentrem o sistema;
- As saídas devem ser livres e protegidas contra eventual tamponamento, principalmente por causa da vegetação;

- Os dispositivos aparentes de proteção da saída deverão ser constituídos de muro de testa de concreto, adequadamente assentados, para evitar danos à tubulação, erosão nos taludes, e para que possam ser facilmente visualizados para posterior execução de manutenção;
- Caixas de inspeção devem ser previstos nos extravasores dos drenos subsuperficiais para auxiliar na inspeção e manutenção;
- Caixas de inspeção devem ser previstos a cada 300 ft (91,5 m), nas mudanças de graduação e nas mudanças de alinhamento e protegidos das mesmas ameaças aos extravasores;
- Os tubos de saída lateral devem estar com uma declividade acima de 3%, se possível;
- Como regra geral, o espaçamento das saídas não deve ser superior a 100 m, com os tubos lisos colocados entre 45° e 90°, com a direção do dreno longitudinal.

3 - MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 MATERIAL

O material utilizado para estudo foi fornecido pelo Instituto Aço Brasil proveniente do processo LD, gerado pela siderúrgica Usiminas, com diâmetros entre 19 x 32 mm, entretanto o material possui parcela significativa de diâmetro inferior a 19 mm. A Figura 3.1 apresenta a imagem da amostra de escória de aciaria tipo LD.



Figura 3.1: Amostra da escória de aciaria LD.

3.2 METODOLOGIA

Este projeto foi desenvolvido através de uma pesquisa exploratória com método experimental. A verificação da possibilidade de utilização do agregado siderúrgico, escória de alto-forno, em camadas drenantes foi realizada por meio da adequação de uma curva granulométrica que atenda aos critérios de uniformidade e de curvatura propostos por Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) e especificar os tipos de solo que o sistema drenante atenda aos critérios de Terzaghi. O projeto foi desenvolvido em três etapas de acordo com os tópicos a seguir:

Etapa I: Revisão bibliográfica – o objetivo da revisão bibliográfica foi adquirir bases teóricas que fundamentaram o desenvolvimento da pesquisa. Nessa etapa foi realizada a revisão sobre: o material agregado siderúrgico (aço brita), granulometria, massa específica, índice de vazios máximo e mínimo, forma dos agregados, permeabilidade de agregados, drenagem em pavimentos, critérios de dimensionamento.

Etapa II: Ensaios de laboratório – após análise dos fundamentos teóricos obtidos pela revisão bibliográfica, foi necessária a realização de ensaios de laboratório com o material em pesquisa. Foram feitos os ensaios de granulometria, de massa específica, de índice de vazios e de permeabilidade.

Etapa III: Análise dos resultados – o objetivo dessa etapa foi realizar uma avaliação dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório e verificar se os mesmos estavam de acordo com os critérios para a utilização do material estudado como formador de camadas drenantes.

A Figura 3.2 mostra a estrutura da metodologia adotada no desenvolvimento desse projeto de pesquisa.

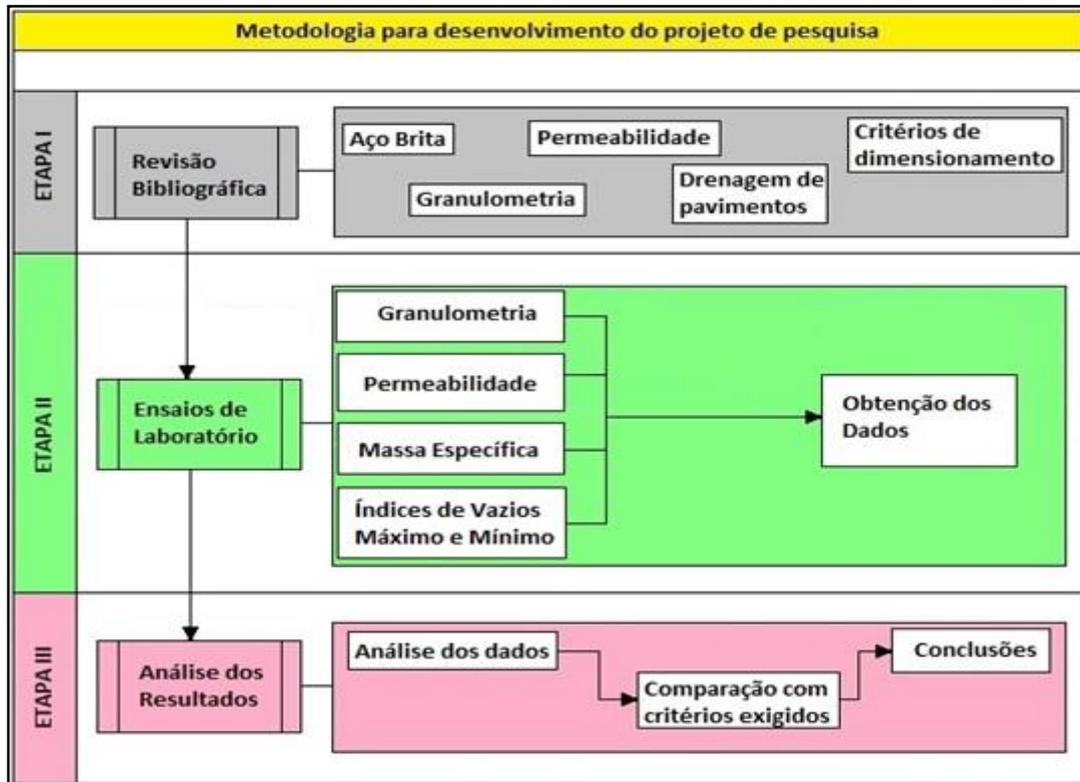


Figura 3.2: Estrutura da metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa.

3.2.1 ENSAIOS

3.2.1.1 Análise Granulométrica

A granulometria do material enviado pela siderúrgica foi estudada pelo ensaio de peneiramento segundo as recomendações da norma DNER ME 083/98 realizado com peneirador mecânico. Com o resultado do ensaio obter-se-á a curva granulométrica do material em estudo. Com a curva gerada foram avaliados os seguintes itens:

- Porcentagem de material passante N°16;
- Porcentagem de material passante na peneira de abertura 1 ½”;
- Comparação das curvas obtidas com as recomendadas por departamentos de estrada americanos para camadas drenantes mostrados na Tabelas 2.6.

3.2.1.2 Análise do Formato dos Grãos

O formato dos grãos foi avaliado a partir de imagens fotográficas do material. Essa análise foi feita com o auxílio do programa Autocad em que sobre a imagem foram desenhadas circunferências inscritas em cada grão da amostra e foram medidos, em escala, para cada grão três distâncias entre as extremidades e o diâmetro da circunferência inscrita de modo que consigam expressar as dimensões do grão no plano fotografado. Cada grão teve angulosidade calculada e o resultado final foi uma média dos resultados obtidos, sendo que, quanto mais próximo de um, mais anguloso será o material (Das, 2007). A angulosidade foi determinada pela expressão 3.1 e o material será classificado como anguloso se o valor da equação resultar maior que 0,50, conforme padrão utilizado pelo DNER.

$$A = \frac{\text{raio médio de cantos e bordas [mm]}}{\text{Raio da esfera máxima inscrita [mm]}} \quad (3.1)$$

3.2.1.3 Determinação da Massa Específica

A determinação da massa específica do agregado siderúrgico estudado foi realizada de acordo com as recomendações da norma DNER ME 195/97. Após a realização do ensaio foi obtido o valor da massa específica seca (ρ_s), da massa específica saturada superfície seca (ρ_{sss}) e do índice de absorção (a). Esses valores foram utilizados em estimativas da massa necessária no ensaio de permeabilidade. Além disso, o valor da massa específica foi necessário no cálculo dos índices de vazios.

3.2.1.4 Determinação do Índice de Vazios

Os índices de vazios máximo e mínimo foram obtidos de acordo com as recomendações da norma NBR NM 45/06. Com a realização desse ensaio foi possível determinar a massa unitária do agregado e os índices de vazios máximo e mínimo. Assim como a massa específica, os valores dos índices de vazios máximo e mínimo foram usados para estimar a massa necessária no ensaio de permeabilidade. A massa unitária foi determinada pela expressão 3.2 e o índice de vazios pela 3.3.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (3.2)$$

onde,

ρ_{ap} = massa unitária do agregado[g/cm³];

m_{ar} = massa do recipiente mais agregado[g];

m_r = massa do recipiente vazio[g];

V = volume do recipiente[cm³].

$$e = \frac{100 [(\rho_s \cdot \rho_w) - \rho_{ap}]}{\rho_s \cdot \rho_w} \quad (3.3)$$

onde,

e = índice de vazios;

ρ_s = massa específica seca do agregado[g/cm³];

ρ_w = massa específica da água[g/cm³];

ρ_{ap} = massa unitária do agregado[g/cm³].

3.2.1.5 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade foi efetuada com permeâmetro a carga constante, segundo a norma NBR 13292/95. Antes, porém, fez-se necessária a realização dos ensaios de massa específica e de determinação do índice de vazios máximos e mínimos, que foram efetuadas segundo a DNER ME 195/97 e NBR NM 45/06, respectivamente. A massa de agregado fofo e compactado a ser utilizada no ensaio de permeabilidade foi estimada pela equação 3.4.

$$m_a = \rho_s \cdot [h_p \cdot d_p - (\eta \cdot h_p \cdot d_p)] \quad (3.4)$$

onde,

m_a = massa de agregado[g];

ρ_s = massa específica dos grãos[g/cm³];

h_p = altura útil do permeâmetro [cm];

d_p = diâmetro do permeâmetro [cm];

η = porosidade.

Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade para o agregado fofo e compactado será utilizada a equação 3.5.

$$k = \frac{V \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (3.5)$$

onde,

k = coeficiente de permeabilidade[cm/s];

V = volume[cm³];

L = altura do corpo de prova[cm];

h = diferença de nível da água[cm];

A = área do corpo de prova[cm²];

t = tempo[s].

Após a obtenção do coeficiente de permeabilidade para o material estudado foi realizada a comparação do valor obtido com o mínimo requerido no critério adotado pelo CDOT, isto é, 300 m/dia.

Através dos dados encontrados no ensaio de permeabilidade foi possível determinar a massa específica aparente seca através da expressão 3.6.

$$\rho_{ap} = \frac{(M1 - M2) \cdot 100}{S (A1 - A2)} \quad (3.6)$$

onde,

ρ_{ap} = massa específica aparente seca[g/cm³];

$(M1 - M2)$ = massa do corpo de prova[g];

S = área da seção transversal do corpo de prova[cm²];

$(A1 - A2)$ = altura do corpo de prova[cm];

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 GRANULOMETRIA

Com o material da forma fornecida pela siderúrgica, após a realização do peneiramento de três amostras (A1, A2, A3), a massa de material retida em cada peneira utilizada no ensaio apresenta-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Massa de material retida em cada peneira nas amostras A1, A2, A3, e a média.

	A1	A2	A3	Média
Peneira (mm)	Massa (g )	Massa ( g )	Massa ( g )	Massa ( g )
25	000	000	000	000
19	18426	19652	16228	18102
12,5	3025	3154	2836	3005
9,5	1556	1621	1329	1502
4,75	1586	1643	1259	1496
2,0	1642	1684	1225	1517
0,075	3414	3561	2958	3311

A partir dos dados no ensaio representados na Tabela 4.1 foi elaborada a curva granulométrica de cada amostra e a curva média das quatro que estão apresentadas na Figura 4.1.

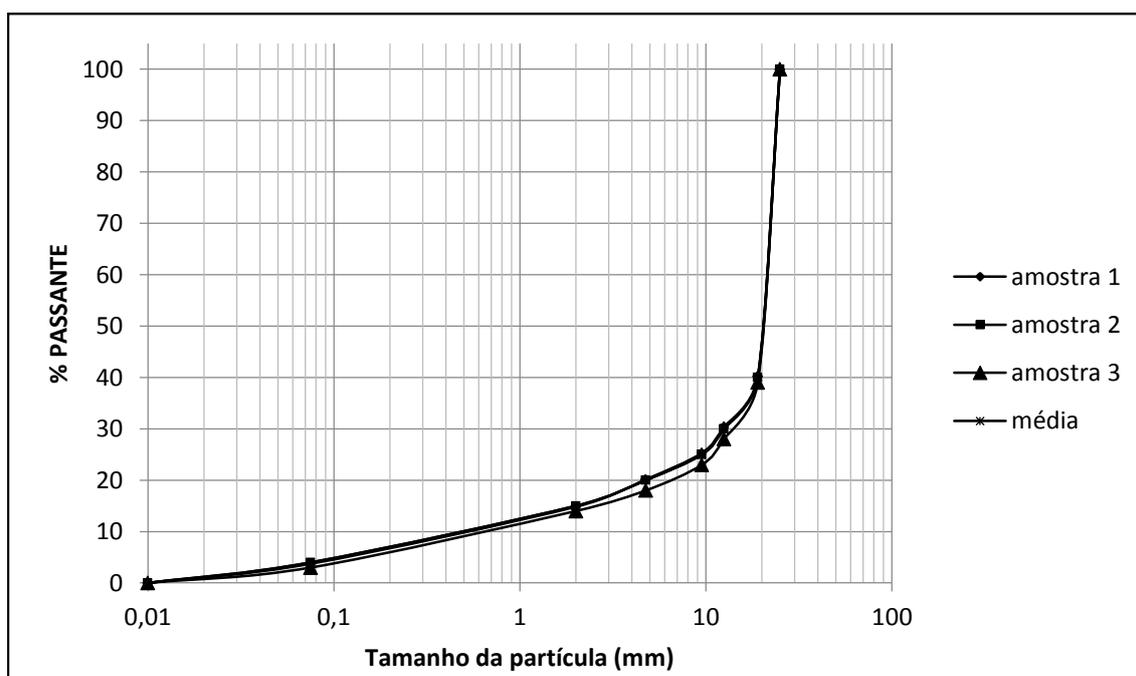


Figura 4.1: Curva granulométrica do material original.

A Figura 4.2 mostra o peneirador mecânico com o jogo de peneiras utilizado no ensaio de granulometria.



Figura 4.2: Peneirador mecânico com jogo de peneiras.

Como descrito no item 3.2.1.1, foi verificada a porcentagem de material passante N°16; a porcentagem de material passante na peneira de abertura 1 ½"; e a comparação das curvas obtidas com as recomendadas para camadas drenantes na Tabela 2.6.

A partir da curva granulométrica da figura 4.1 pode ser observado que 13,3% do material é passante na peneira de N° 16 e 100% na peneira de abertura 1 ½". Portanto, a curva estudada não atendeu ao critério de limite máximo passante na peneira N°16 (13,3 % > 2%), porém, em contramão ao critério proposto pelo CDOT (2004), o DNIT (2006) admite até 5% de passante na peneira N°200. Assim, o material pode ser utilizado em camada drenante em território brasileiro, pois o material estudado obteve 4% passante na peneira N° 200.

Além disso, foi realizada a comparação dessa curva com os limites propostos pelos departamentos de estrada dos estados de Iowa, Minesota, Nova Jersey e Pensilvânia. As Figuras 4.3 a 4.6 ilustram a adequação da curva estudada com esses limites.

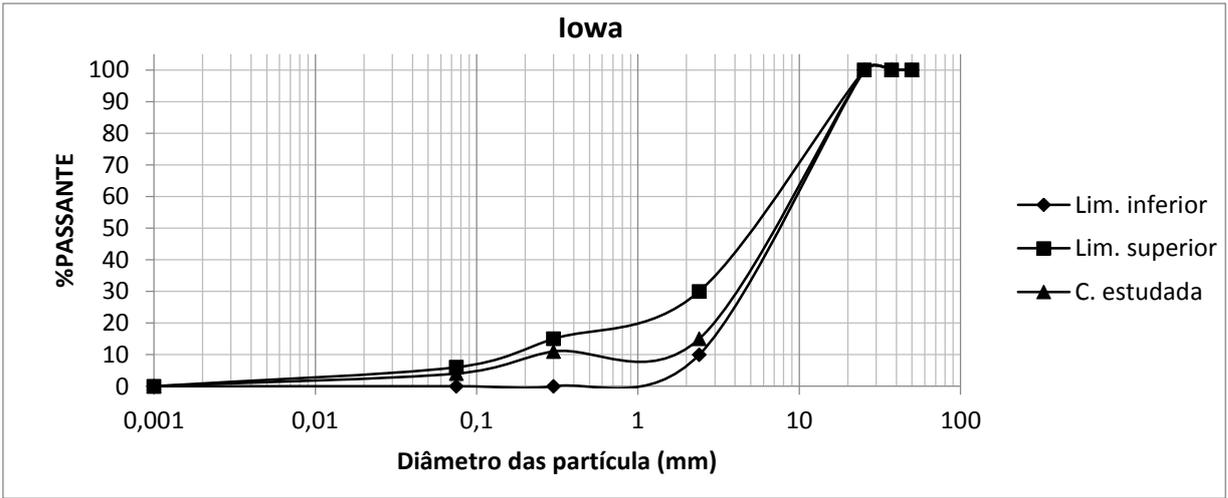


Figura 4.3: Comparação entre a curva estudada e a de Iowa.

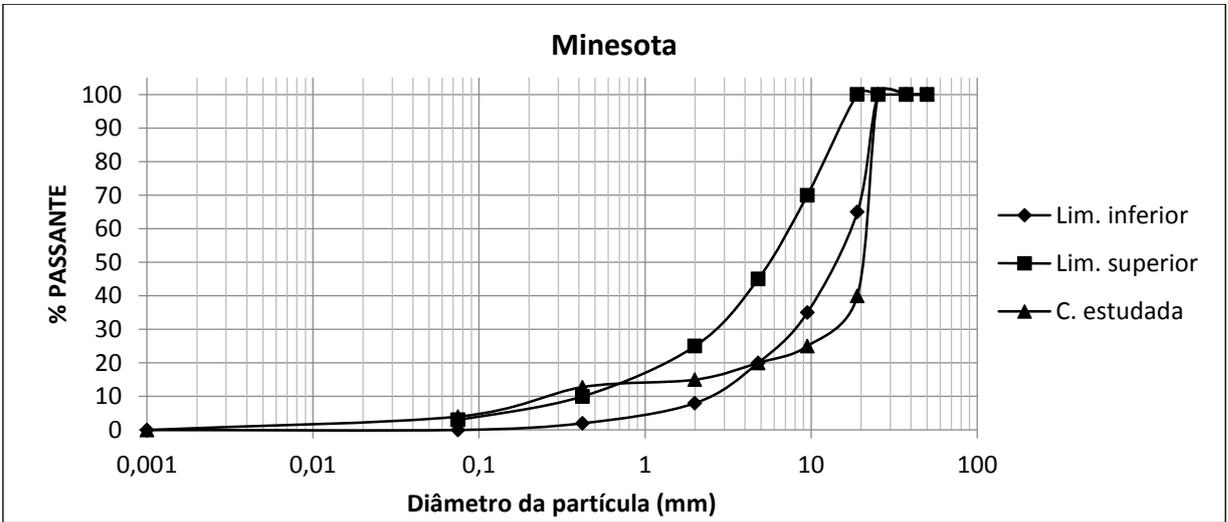


Figura 4.4: Comparação entre a curva estudada e a de Minesota.

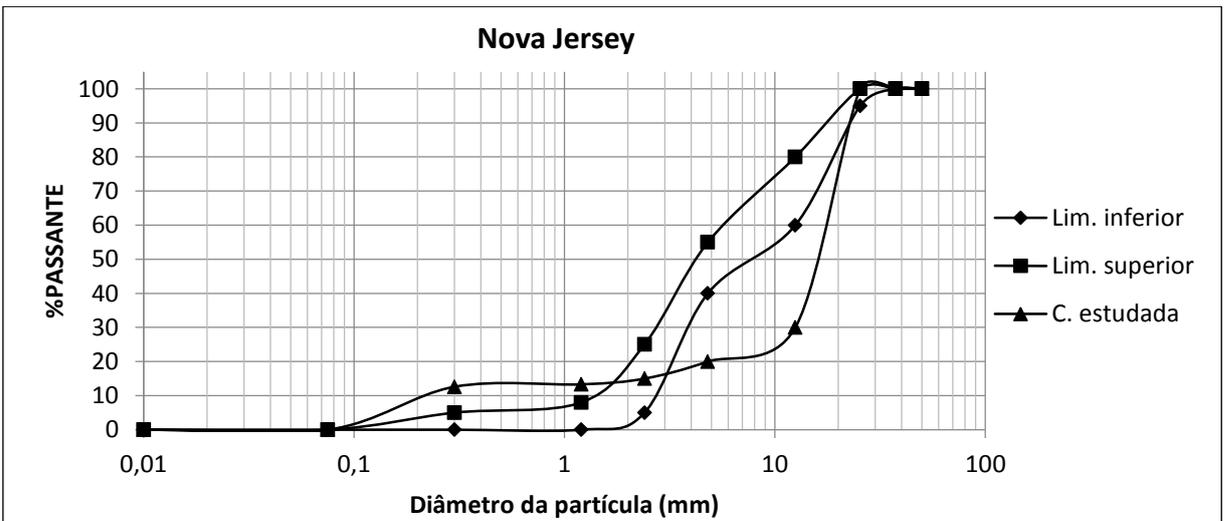


Figura 4.5: Comparação entre a curva estudada e a de Nova Jersey.

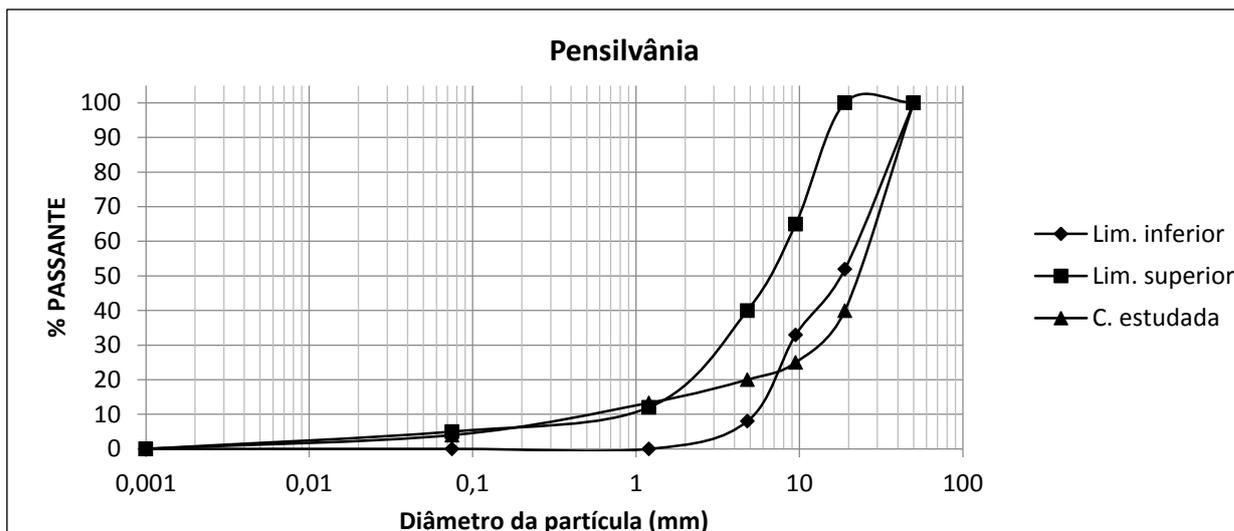


Figura 4.6: Comparação entre a curva estudada e a de Pensilvânia.

Após a análise das curvas propostas pelos departamentos, foram determinados o coeficiente de curvatura e o de uniformidade e a faixa de diâmetros contidas. O coeficiente de permeabilidade dos intervalos propostos, segundo Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013) variam de 300 a 1500 m/dia. O resumo dos resultados é representado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resumo dos coeficientes de cada curva.

Curva	Cu	Cz	K (m/dia)	D (mm)
Iowa	4,46 < Cu < 44,71	0,90 < Cz < 4,46	300 < k < 1500	D < 25,40
Minesota	6,58 < Cu < 17,74	1,47 < Cz < 2,88		D < 25,40
Nova Jersey	4,37 < Cu < 4,58	0,49 < Cz < 1,09		0,075 < D < 38,10
Pensilvânia	4,04 < Cu < 8,98	0,64 < Cz < 1,61		D < 50,80

Observa-se do resumo acima o seguinte:

- Apenas a curva sugerida pelo departamento de Pensilvânia atende na sua totalidade o critério de coeficiente de curvatura;
- Todas as curvas apresentam preocupação quanto ao coeficiente de uniformidade ser maior que 2 e mas não menor que 20, a curva de Iowa apresenta limite superior maior que 44;
- As curvas que estiverem entre esses limites propostos atendem ao critério de permeabilidade, isto é, $k \geq 300$ m/dia.

4.2 FORMATO DOS GRÃOS

A foto utilizada para o estudo dos formatos dos grãos está ilustrada na Figura 4.7, já com as circunferências inscritas desenhadas.

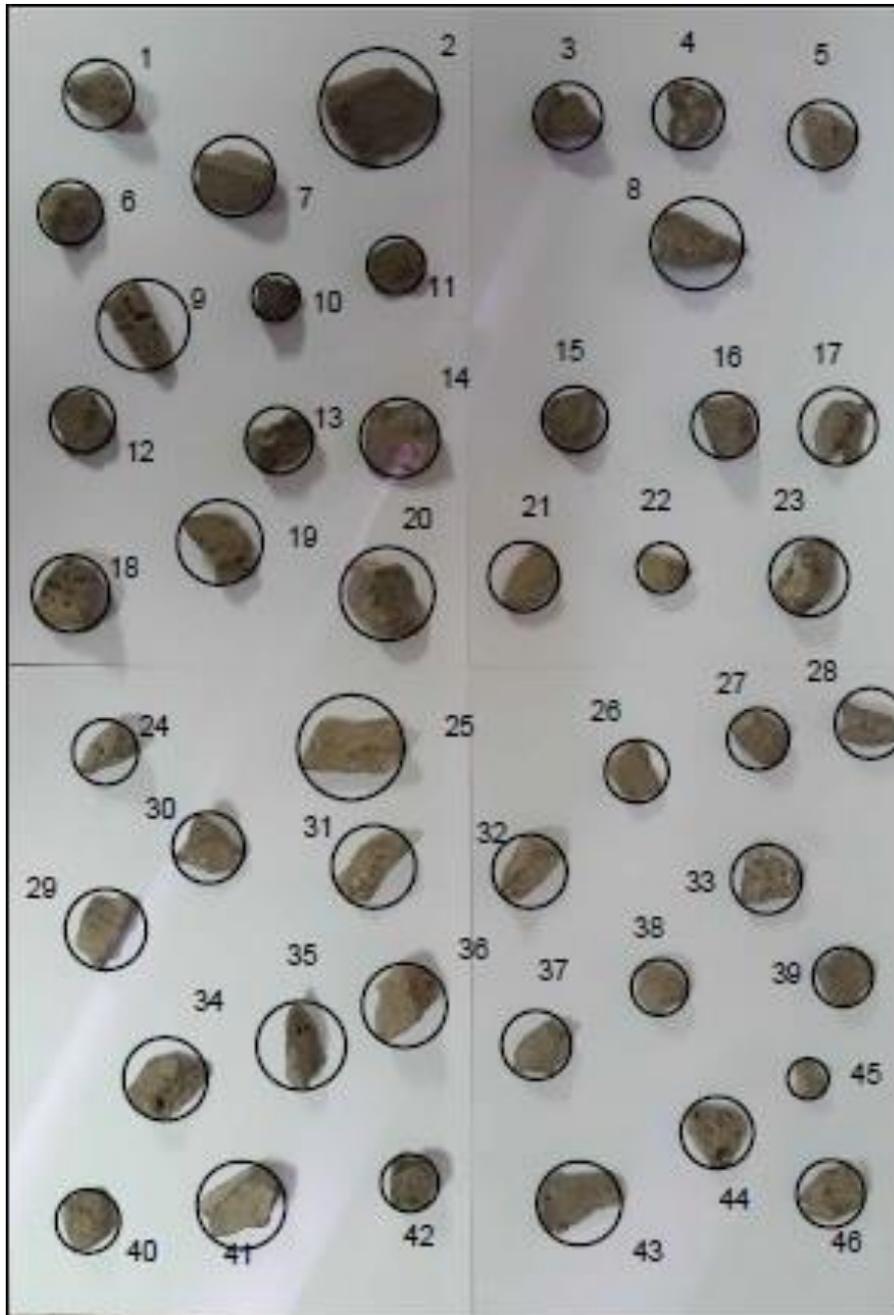


Figura 4.7: Grãos e suas circunferências inscrita.

A angulosidade foi calculada pela equação 3.1 e os resultados das distâncias entre as extremidades dos grãos (D_1 , D_2 , D_3 e $D_{méd}$), o diâmetro da circunferência inscrita ($D_{máx}$) e a angulosidade obtidos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Distâncias entre as extremidades dos grãos, o diâmetro da circunferência inscrita e a angulosidade.

Grão	D1 (mm)	D2(mm)	D3(mm)	Dmed (mm)	Dmáx (mm)	Angulosidade
1	28,63	30,03	30,63	29,8	32,7	0,91
2	53,45	47,94	41,11	47,5	55,88	0,85
3	31,44	23,41	25,38	26,7	32,09	0,83
4	31,72	30,16	28,09	30,0	33,3	0,90
5	30,9	28,15	25,93	28,3	31,94	0,89
6	28,03	28,78	30,03	28,9	30,86	0,94
7	35,09	29,94	37,96	34,3	38,28	0,90
8	43,15	43,5	27,49	38,0	43,63	0,87
9	42,68	40,68	22,15	35,2	43,32	0,81
10	22,11	20,32	20,07	20,8	23,61	0,88
11	26,8	25,67	25,84	26,1	28,56	0,91
12	30,35	30,19	25,82	28,8	30,87	0,93
13	31,29	31,19	24,4	29,0	31,32	0,92
14	36,76	35,66	35,08	35,8	38,75	0,92
15	30,15	28,81	29,1	29,4	30,55	0,96
16	30,03	30,9	22,7	27,9	31,83	0,88
17	35,98	30,93	22,76	29,9	36,86	0,81
18	36,33	34,89	23,92	31,7	38,35	0,83
19	34,32	21,57	39,82	31,9	41,44	0,77
20	44,03	32,87	36,26	37,7	45,76	0,82
21	32,85	32,4	22,75	29,3	32,99	0,89
22	23,69	21,27	19,17	21,4	25,15	0,85
23	36,79	34,34	24,75	32,0	38,76	0,82
24	29,51	30,54	20,69	26,9	30,71	0,88
25	49,64	46,56	25,93	40,7	51,15	0,80
26	29,49	27,14	20,91	25,8	29,74	0,87
27	28,07	27,74	21,61	24,7	28,74	0,86
28	33,11	30,68	16,93	26,9	33,21	0,81
29	37,56	34,42	19,56	30,5	37,96	0,80
30	31,95	33,37	25,15	30,2	33,81	0,89
31	39,05	33,81	18,83	30,6	40,16	0,76
32	31,43	34,67	20,26	28,8	35,44	0,81
33	32,27	29,01	23,2	28,2	32,68	0,86
34	38,63	31,38	25,67	31,9	39,22	0,81
35	41,85	25,94	18,11	28,6	41,95	0,68
36	39,4	25,76	28,97	31,4	40,3	0,78
37	26,06	32,03	22,42	26,8	32,29	0,83
38	26,42	26,3	21,57	24,8	26,47	0,94
39	26,53	26,34	23,9	25,6	28,15	0,91
40	26,13	30,03	22,11	26,1	31,27	0,83
41	40,07	40,03	28,08	36,1	41,37	0,87
42	26,78	25,01	21,09	24,3	27,32	0,89
43	39,43	39,65	25,86	35,0	40,44	0,86
44	32,87	25,46	26,92	28,4	33,87	0,84
45	18,89	16,68	13,56	16,4	19,04	0,86
46	29,66	31,25	22,13	27,7	31,53	0,88
MÉDIA						0,86
DESVIO PADRÃO						0,05

Como a média obtida é bem próxima a unidade, o material pode ser classificado como anguloso, visto que o material é anguloso quando apresenta angulosidade maior que 0,50. Dessa forma, o material atende ao requisito de angulosidade proposto pelo CDOT (2004).

Fez-se ainda uma distribuição normal dos resultados obtidos, com o auxílio do programa Excel, afim de verificar se a angulosidade é uma característica presente na maioria dos grãos. A Figura 4.8 apresenta a curva de distribuição normal obtida calculada para uma média igual a 0,86 e desvio padrão de 0,05.

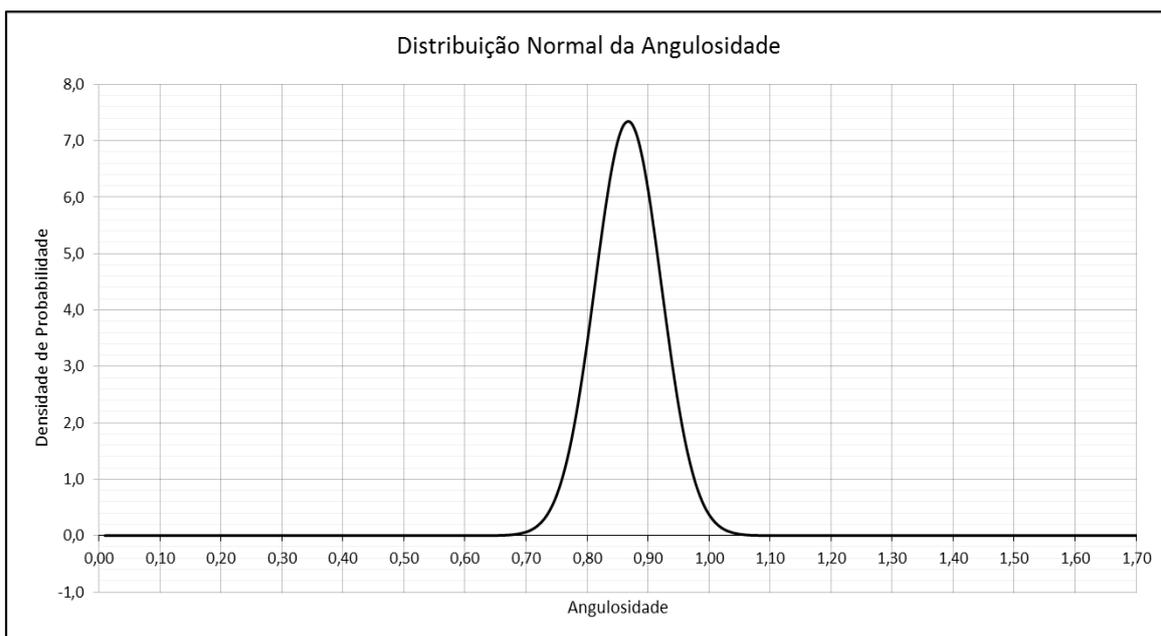


Figura 4.8: Distribuição normal dos resultados da angulosidade.

Observa-se da curva que a probabilidade da angulosidade do material estar abaixo de 0,70 é nula. Tal resultado consolida a afirmação de que o material é anguloso, pois a probabilidade de que algum grão tenha angulosidade menor que 0,5 é igual a zero.

4.3 MASSA ESPECÍFICA

De acordo com a recomendação da norma ME 195/97, para o material estudado foram utilizados 4000g de material em cada amostra, sendo ensaiadas três amostras. Inicialmente se determinou a massa de cada amostra na condição seca (m_s), em seguida a massa saturada superfície seca (m_{sss}) e por fim a massa das amostras imersas em água (m_i). Após a obtenção desses dados realizou-se o cálculo da massa específica seca (γ_s), a

massa específica saturada superfície seca (γ_{sss}) e a absorção do agregado (a). Os dados obtidos nesse ensaio e os resultados estão na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dados e resultados obtidos no ensaio de massa específica.

	m_s (g)	m_{sss} (g)	m_i (g)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{sss} (g/cm ³)	a (%)
Amostra 1	3980,00	4040,00	2885,90	3,45	3,50	1,5
Amostra 2	3980,00	4040,00	2884,80	3,45	3,50	1,5
Amostra 3	3990,00	4050,00	2891,30	3,44	3,50	1,5
Média	3983,33	4043,33	2887,00	3,45	3,50	1,5

4.4 ÍNDICE DE VAZIOS

Após a realização foram obtidos os seguintes dados apresentados na Tabela 4.5 que foram utilizados na determinação do índice de vazios máximo e mínimo.

Tabela 4.5: Massa utilizada no ensaio de índice de vazios.

Material Solto		Material compactado	
D (mm)	Massa (g)	D (mm)	Massa (g)
19	18001	19	19202
12,5	3001	12,5	3199
9,5	1499	9,5	1600
4,75	1501	4,75	1601
2,36	1500	2,36	1600
0,075	3300	0,075	3522
Total	28802	Total	30724

Os valores dos índices de vazios máximo e mínimo estão descritos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Valores de índice de vazios máximo e mínimo.

Índice de Vazios	
Máximo	Mínimo
0,44	0,40

A Figura 4.9 mostra o molde cilíndrico com o material utilizado no ensaio de índice de vazios.



Figura 4.9: Molde cilíndrico com material utilizado no ensaio de índice de vazios.

A partir dos resultados dos índices de vazios, foram determinadas as porosidades máxima e mínima com a finalidade de se estimar a massa a ser utilizada no ensaio de permeabilidade. Além disso, a porosidade foi utilizada para se estimar a permeabilidade pela relação estatística de Moulton. Os resultados se encontram na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Índice de vazios e porosidade do material trabalhado.

	Material fofo	Material compactado
e	0,44	0,40
η	0,306	0,286

4.5 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade foi realizado em um permeâmetro de carga constante e para a determinação do coeficiente de permeabilidade foram determinados o volume percolado (v) em um intervalo de tempo (t), a altura do corpo de prova (L) e o desnível entre a entrada e a saída de água (h). O ensaio foi realizado para uma amostra fofa e uma amostra compactada. O coeficiente de permeabilidade é determinado pela

quantidade de água que percola a amostra para um dado intervalo de tempo. A quantidade de água é medida por uma proveta graduada, determinando-se o volume percolado (v). Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade se utilizou o gradiente hidráulico ($i=8,5$) e a área da seção transversal do permeâmetro ($A = 103 \text{ cm}^2$). Os dados obtidos e o coeficiente de permeabilidade estão nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8: Dados utilizados no ensaio de permeabilidade.

	Material fofo	Material compactado
η	0,306	0,286
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	3,37	3,37
Volume da amostra (cm^3)	1162	1162
Massa recomendada (g)	3596	3700
Massa utilizada (g)	2900	3320

Tabela 4.9: Valores obtidos no ensaio de permeabilidade.

		Amostra Fofa		Amostra Compactada	
Medição	Tempo (s)	Volume (cm^3)	Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)	Volume (cm^3)	Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)
1	30	76	$2,9 \times 10^{-3}$	60	$2,3 \times 10^{-3}$
2	30	76	$2,9 \times 10^{-3}$	60	$2,3 \times 10^{-3}$
3	30	74	$2,8 \times 10^{-3}$	58	$2,2 \times 10^{-3}$
4	30	80	$3,0 \times 10^{-3}$	62	$2,4 \times 10^{-3}$
5	30	72	$2,7 \times 10^{-3}$	60	$2,3 \times 10^{-3}$
6	30	72	$2,7 \times 10^{-3}$	54	$2,0 \times 10^{-3}$
7	30	82	$3,1 \times 10^{-3}$	56	$2,1 \times 10^{-3}$
8	30	76	$2,9 \times 10^{-3}$	60	$2,3 \times 10^{-3}$
9	30	82	$3,1 \times 10^{-3}$	56	$2,1 \times 10^{-3}$
10	30	80	$3,0 \times 10^{-3}$	58	$2,2 \times 10^{-3}$
		Média	$2,9 \times 10^{-3}$	Média	$2,2 \times 10^{-3}$

A permeabilidade é influenciada por vários fatores entre eles a temperatura. Quanto maior for a temperatura, menor a viscosidade da água e, portanto, mais facilmente ela escoar pelos vazios do solo com correspondente aumento do coeficiente de permeabilidade; k é inversamente proporcional à viscosidade da água. Por isso, os

valores de k são referidos à temperatura de 20°C . Sendo assim, como o ensaio foi realizado à 25°C , os valores médios do coeficiente de permeabilidade para o material fofo e compactado a 20°C são, respectivamente, $2,6 \times 10^{-3}$ e $2,0 \times 10^{-3}$ cm/s.

Além do coeficiente de permeabilidade foi possível determinar a massa específica aparente seca (ρ_s). Para isso, se determinou a umidade do material e a massa do corpo de prova. Os dados obtidos para determinar a umidade estão na Tabela 4.10.

- Massa do corpo de prova = 2900 g.

Tabela 4.10 : Umidade do material.

Umidade			
Cápsula	4030	4008	5033
Tara	10,03	10,66	10,29
tara + massa úmida	190,72	135,59	149,96
tara + massa seca	187,41	134,56	148,23
Umidade Inicial	1,87%	0,83%	1,25%
Média			1,32%

Sendo assim, o valor calculado para a massa específica seca foi de $1,88\text{g/cm}^3$. O permeamêtro utilizado no ensaio está ilustrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 : Permeâmetro utilizado no ensaio.

O coeficiente de permeabilidade encontrado para o material estudado fugiu do resultado esperado. Como o material está dentro dos limites propostos pelo departamento de Iowa, esperava-se que seu coeficiente de permeabilidade estivesse entre $3,47 \times 10^{-1} \leq k$

$\leq 1,74$ cm/s. Tal resultado não foi alcançado possivelmente em função das seguintes dificuldades:

- A norma recomendava para a faixa de diâmetros estudada um permeâmetro com diâmetro de 150 mm, no entanto, o laboratório disponibilizou um com diâmetro de 120 mm. Isso influenciou na acomodação dos grãos maiores, não permitindo que a massa recomendada de acordo com os índices de vazios fosse totalmente depositada no volume do permeâmetro;
- O material estudado possui 60 % retido na peneira de 19 mm, material este não utilizado no ensaio, por recomendação da norma, o que resultou em uma elevada proporção de finos na amostra. Tal fato pode ser observado nas massas utilizadas das peneiras de 12,5 mm e de 0,075 mm, na preparação das amostras, iguais a, respectivamente, 3000g e 3300 g. Isso fez com que a grande quantidade de finos colocada nas amostras, dificultasse a percolação de água na amostra, comportamento típico de solos não granulares.

Como os resultados obtidos no ensaio não foram coesos, foi realizado um estudo de estimativa de permeabilidade por meio de funções empíricas: Hazen (Equação 4.1), Moulton (Equação 4.2) e Kamal (Equação 4.3). As Tabelas 4.11 a 4.13 mostram os dados utilizados nos cálculos e os resultados obtidos.

$$k = C_k \cdot d_{10}^2 \quad (4.1)$$

$$k = -69,2 - 22,10 \cdot d_{10} + 24,70 \cdot d_{20} + 228 \cdot e + 6,96 \cdot d_{10}^2 - 1,56 \cdot d_{20}^2 \quad (4.2)$$

$$k = 2,192 \cdot 10^2 \cdot d_{10}^{1,478} \cdot N^{6,654} \cdot P_{200}^{-0,597} \quad (4.3)$$

Tabela 4.11: Permeabilidade obtida por Hazen.

Diâmetros		Cu	Permeabilidade de Hazen		
d_{10} (mm)	d_{60} (mm)		Ck	k (cm/s)	k (m/dia)
0,5	20	20	1	0,25	216

Tabela 4.12: Permeabilidade obtida por Kamal.

Diâmetros		Permeabilidade de Kamal		
d_{10} (mm)	d_{20} (mm)	e	k (cm/s)	k (m/dia)
0,5	4,8	0,4	9,53	8234,58

Tabela 4.13: Permeabilidade obtida por Moulton.

Diâmetro	Permeabilidade de Moulton			
d_{10} (mm)	P_{200}	η	k (cm/s)	k (m/dia)
0,5	4%	0,3	0,178	154,08

Os resultados obtidos e demonstrados nas tabelas diferem do esperado, visto que, o coeficiente de permeabilidade deveria estar entre $3,47 \times 10^{-1}$ e $1,74$ cm/s. Isso pode ter ocorrido em função de:

- A equação proposta por Hazen é indicada para areias uniformes com $C_u < 5$, como o C_u do material é igual a 20, a equação não é recomendada apesar de ter apresentado o resultado mais próximo do esperado;
- A equação de Kamal é válida para índice de vazios variando de 0,26 a 0,28. Como o índice de vazios do material é 0,4, o resultado obtido foi totalmente incoerente;
- A equação de Moulton apresentou resultado bastante conservador.

5 - CONCLUSÕES

Após as análises realizadas, observou-se que o material com a curva granulométrica estudada não pode ser utilizado em camada drenante, pois os seguintes critérios não foram atendidos:

- Coeficiente de curvatura; $C_c=15,63 > 1,63$
- Coeficiente de uniformidade; $C_u=40 > 20$
- Permeabilidade; $k = 2,59 < 300$ m/dia.

Porém, observa-se da tabela 4.2 que os critérios adotados nos diferentes departamentos rodoviários americanos são em grande parte divergentes. Os únicos critérios que são universais são os seguintes:

- $CU \geq 2$;
- $k \geq 300$ m/dia.

Se for levado em conta apenas estes dois critérios, o material pode vir a ser utilizado, desde que a permeabilidade seja ensaiada. Pois, como a curva estudada atende ao padrão de Iowa, espera-se, ou seja, é provável que a permeabilidade esteja entre $3,47 \times 10^{-1}$ e $1,74$ cm/s. Por esse motivo a permeabilidade do material deve ser ensaiada, pois o material difere do solo temperado estudado pelo departamento, não sendo possível afirmar que a permeabilidade será a mesma.

Por fim, achou-se conveniente propor uma curva granulométrica adequada a todos os critérios listados na metodologia, visto que a curva estudada apresentou-se inadequada.

A curva foi desenvolvida com base no intervalo de granulometrias proposto pelo departamento de estradas da Pensilvânia, ou seja, observando os limites de material passante em cada faixa de diâmetro. A escolha do padrão utilizado na Pensilvânia justifica-se por ser o único entre os padrões estudados que qualquer curva obtida atenderá aos limites para os coeficientes de curvatura e de uniformidade. Além disso, se a curva atender os limites, espera-se que a permeabilidade seja maior que $3,47 \times 10^{-1}$ cm/s. A Figura 5.1 mostra a curva granulométrica proposta dentro dos limites estabelecidos pelo departamento.

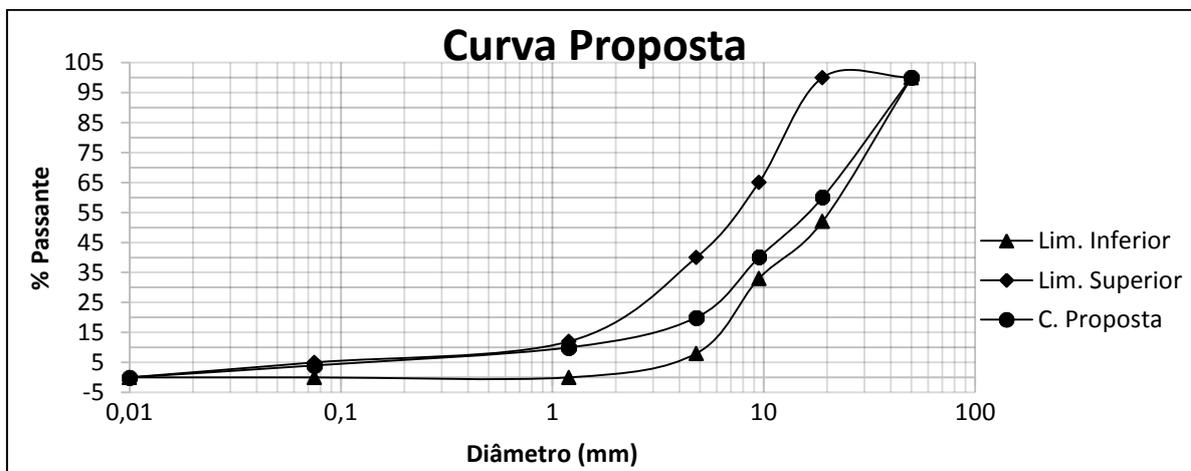


Figura 5.1: Curva granulométrica e o intervalo proposto pelo departamento

A curva proposta possui a seguinte granulometria encontra-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Granulometria proposta.

Peneira	% Passante
2"	100
3/4"	60
3/8"	40
N°4	20
N°16	10
N°200	4
Fundo	0

Observa-se que os requisitos de diâmetro máximo e máximo passante na peneira N° 200 foram atendidos pois:

- $P_{200} = 4\% < 5\%$;
- $D_{\text{máx}} = 19 < 37,5 \text{ mm}$

Estimou-se a permeabilidade pela equação de Moulton (Equação 4.2), a mais conservadora das equações apresentadas, e obteve-se uma permeabilidade de $6,50 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$, que é maior que o critério exigido.

Dessa forma, a curva proposta para estudos futuros provavelmente atenderá aos requisitos exigidos pelo CDOT (2004) e Suzuki; Azevedo; Kabbach (2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway Transportation Officials (1993).

ARRIVABENE, L.F. “**Uma contribuição ao estudo de utilização de escória de alto forno bruta e granulada para a produção de concretos**”. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental- UFES. Vitória, 2000.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13292/95**: Solo-Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248/03**: Agregado-Determinação da composição granulométrica, 2003.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. 2001. 93f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

BENQUERER, R.A. **“Gerenciamento de resíduos sólidos em siderúrgicas integradas a coque”**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas-UFMG. Belo Horizonte, 2000.

CALDEIRA, D. C. D. **Omissão de nutrientes e atividade enzimática em solo de cerrado adicionado de pó de balão e cultivado com milho**. In: FERTBIO, 2012, Maceió. A responsabilidade socioambiental da pesquisa agrícola.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234 p.

CAVALCANTI, Pedro Porto Silva. **Gestão ambiental na indústria siderúrgica- aspectos relacionados às emissões atmosféricas**. 2012. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CDOT - Colorado Department Of Transportation (2004). **Drainage Design Manual**. Colorado.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 561 p. Tradução da 7.ed. americana.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME-083/98**: Agregados – análise granulométrica, 1998.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME-195/97**: Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo, 1997.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER PRO-120/97**: Coleta de amostras de agregados, 1997.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). **Manual de drenagem de rodovias**. 2ed. Rio de Janeiro.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). **Manual de pavimentação**. 3ed. Rio de Janeiro.

DRAGGAN, S.; COHRSSSEN, J.J.; MORRISON, R.E.; “**Enviromntal monitoring assessment and management**”. New York, Praeger Publishers New York,1985.

FELLENBERG, G. “**Introdução aos problemas da poluição ambiental**”. 2ª Edição. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo – USP. 1980. Vol. 1.

MILANEZ, B.; PORTO, M. F. S.; **A ferro e fogo: impactos da siderurgia para o ambiente e a sociedade após a reestruturação dos anos 1990**. In: IV ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 2008, Brasília.

MOREIRA, Cristiano Costa. **Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos**. In: 37º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2006, Goiânia.

NASCIMENTO, J. F. (2003). **Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária**, dissertação de mestrado, UFMG.

OLIVEIRA, F. U.(2006) **Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para uso em pavimentação**, dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Es.141p.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

SILVA, R.G.O da (2010). **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**, dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 101p.

SUZUKI, Carlos Yukio; AZEVEDO, Angela Martins; KABBACH JÚNIOR, Felipe Issa. **Drenagem Subsuperficial de Pavimentos: conceitos e dimensionamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TAVARES, D. S.; ODA, S.; MOTTA, L. M. G.. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em pavimentação asfáltica.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Rio de Janeiro.