



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ANÁLISE DA EROSÃO INTERNA DE SOLOS EM
BARRAGENS COM BASE NA DISTRIBUIÇÃO DE VAZIOS**

MARCOS DE ÁVILA PIMENTA FILHO

Belo Horizonte, 21 de agosto de 2013

Marcos de Ávila Pimenta Filho

ANÁLISE DA EROSÃO INTERNA DE SOLOS EM BARRAGENS COM BASE NA DISTRIBUIÇÃO DE VAZIOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Terezinha de Jesus Espósito

Coorientador: Eng^o, Msc, Consultor Joaquim Pimenta de Ávila

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

P644a Pimenta Filho, Marcos de Ávila
Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios [manuscrito] / Marcos de Ávila Pimenta Filho. — 2013.
124 f., enc. : il.

Orientador: Terezinha de Jesus Espósito.
Coorientador: Joaquim Pimenta de Ávila.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 120-124.

1. Mecânica do solo – Teses. 2. Solos – Erosão – Teses. 3. Porosimetria – Teses.
I. Espósito, Terezinha de Jesus. II. Ávila, Joaquim Pimenta de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA EROSÃO INTERNA DE SOLOS EM BARRAGENS COM BASE NA DISTRIBUIÇÃO DE VAZIOS

MARCOS DE ÁVILA PIMENTA FILHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 21 de agosto de 2013, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Terezinha de Jesus Esposito Barbosa - Orientador
UFMG

Prof(a). Lucio flávio de Suza Villar
UFMG

Prof(a). Mauro da Cunha Naghettini
UFMG

Prof(a). Ciro Humes
FEI Fundação Educacional Inaciana

Prof(a). Joaquim Pimenta de Avila
Pimenta de Avila Consultoria

Belo Horizonte, 21 de agosto de 2013.

DEDICATÓRIA

*AOS MEUS PAIS, MARCOS E MARITA, E AOS
MEUS IRMÃOS, LUCAS E MARINA*

AOS AVÓS JANJA E AUGUSTA E ZARO E MARIA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, em geral, e por colocar nela as pessoas que me cercam.

À UFMG, em especial à Escola de Engenharia, na graduação e no mestrado. Nela aprendi muito mais que apenas a engenharia.

À amiga e orientadora Prof. Terezinha de Jesus Espósito, pelas injeções de ânimo e confiança no meu trabalho, mesmo nos momentos mais solitários e difíceis. A ela deixo meu agradecimento sincero e declaro minha admiração pela pessoa e profissional que é, tão competente e humilde.

Aos professores do Mestrado de Geotecnia da UFMG, pelos ensinamentos e pela oportunidade e incentivo em fazer parte deste grupo.

Ao amigo, chefe e coorientador Joaquim Pimenta de Ávila, não apenas pela sugestão do tema e pela enorme contribuição técnica neste trabalho, mas também pelo aprendizado na vida profissional, desde meus tempos de estagiário.

Ao Prof. Ciro Humes, pela ajuda imprescindível nesta dissertação, pela boa vontade em compartilhar o conhecimento da forma mais didática, a todo momento, mesmo quando nem nos conhecíamos. Agradeço a ele também pela sugestão do caso de estudo e pela verificação final desta dissertação.

Ao engenheiro Dr. Ashok Raut, por disponibilizar publicações importantes, pelos debates enriquecedores nos diversos e-mails trocados e por compartilhar comigo o programa que foi essencial para que o estudo de caso desta dissertação pudesse ser desenvolvido com eficácia.

À engenheira Rafaela Faciola, por dedicar tempo e esforço, no início dos meus trabalhos, para obter algumas publicações indispensáveis para a realização deste trabalho.

À secretária do curso de mestrado Kátia de Souza, pela boa vontade em ajudar sempre, o que fez dela uma parceira importante do início ao fim desta caminhada.

Aos meus pais, Marcos e Marita, por estarem sempre ao meu lado, pelo amor, pela educação, pelo exemplo de caráter e valores repassados.

Ao meu pai, por me dar o privilégio de ter em casa um exemplo de engenheiro que preza pela técnica e pelo trabalho bem feito. Agradeço também pela verificação técnica minuciosa desta dissertação.

Aos meus irmãos e melhores amigos, Lucas e Marina, pela cumplicidade e amor.

Aos meus avós Janja e Augusta e Zaro e Maria, por serem exemplos próximos de pessoas tão boas, solidárias, persistentes, de valores tão preciosos – em especial, o da importância da união da família. Agradeço pelo amor e carinho. Compartilho com eles e com meus pais este e todos os meus êxitos.

Aos meus primos, grandes amigos que tenho, lembrados com carinho em muitos momentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

À família Golo Golo, pela amizade sincera e por participarem na minha formação pessoal.

Aos amigos da graduação da Escola de Engenharia da UFMG.

Aos colegas da Pimenta de Ávila, pelo convívio, auxílio e aprendizado na rotina de trabalho.

A todas as outras pessoas que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse concluído.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos da dissertação	2
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 GLOSSÁRIO.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Introdução	12
3.2 A Importância da Erosão Interna na Segurança de Barragens e seus Mecanismos.....	13
3.2.1 Relevância do Problema.....	13
3.2.2 Uma Visão Geral sobre a Erosão Interna e seus Mecanismos	16
3.3 Análise Granulométrica do Solo.....	20
3.4 Forma das Partículas	23
3.5 Compacidade de Materiais Não Coesivos	24
3.5.1 Índice de Vazios	24
3.5.2 Índice de Densidade	25
3.6 Mecanismo de Filtragem	26
3.7 Estabilidade Interna dos Solos.....	28
3.7.1 Introdução.....	28
3.7.2 Critérios para avaliação da susceptibilidade à instabilidade interna.....	29
3.8 Critérios de Filtros	34
3.8.1 Introdução e Histórico.....	34
3.8.2 Dimensionamento granulométrico de filtros granulares	37
3.8.3 Considerações adicionais de projeto	43

3.9 Teoria de Curvas de Vazios	44
3.9.1 Introdução.....	44
3.9.2 Distribuição de Vazios e Análises de Carreamento	48
3.9.3 Distribuição de Vazios em Termos de Áreas de Superfície.....	60
3.9.4 Compactação dos Filtros	63
3.9.5 Dimensões de Controle e Critérios de Dimensionamento de Filtros	64
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
4.1 Introdução	71
4.2 Metodologia	71
4.2.1 Análise e Tratamento dos Dados.....	73
4.2.2 Verificação do Projeto de Filtro	73
4.2.3 Análise da Estabilidade Interna do Núcleo	74
4.2.4 Análises de Carreamento.....	75
4.3 Materiais	79
5 ESTUDO DE CASO	81
5.1 Introdução	81
5.2 Barragem de Balderhead.....	82
5.2.1 Caracterização Granulométrica dos Materiais – Núcleo e Filtro	84
5.2.2 Evento de falha.....	88
6 RESULTADOS	90
6.1 Verificação do Projeto de Filtro.....	90
6.2 Análise da Estabilidade Interna do Núcleo.....	94
6.3 Análises de Carreamento	97
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
7.1 Verificação do Projeto de Filtro.....	110
7.2 Análise da Estabilidade Interna do Núcleo.....	111
7.3 Análises de Carreamento	111
7.3.1 Condições Críticas – Cenários 3, 4, 7, 8 e 13.....	111
7.3.2 Avaliação do Projeto de Filtro – Cenários 16 e 17	112
7.3.3 Influência da compactação do filtro (Índice de Densidade I_D)	113
7.3.4 Razão de retenção D_{15}/d_{85} e influência da fração pedregulho no processo de filtragem	113
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	115

8.1 Conclusões	115
8.1.1 Revisão Bibliográfica.....	115
8.1.2 Estudo de Caso	117
8.2 Sugestões para Estudos Futuros.....	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Erosão de Contato.....	6
Figura 2.2 - (a) “Modelo de rede tridimensional de poros”, proposto por Schuler (1996); e (b) Vazio formado, composto por um poro único e seis constrições (adaptado de Locke et al., 2001)	10
Figura 3.1 - Modos de ruptura devidos a eventos de erosão interna (adaptado de Fell e Fry, 2007).....	17
Figura 3.2 – Alguns tipos de maciço praticados na engenharia de barragens (adaptado de Foster et al., 1998).....	18
Figura 3.3 – Erosão interna no maciço de uma barragem iniciada devido a um escoamento concentrado (adaptado de Foster e Fell, 1999)	19
Figura 3.4 – Erosão interna na fundação de uma barragem iniciada a partir de um processo de erosão regressiva (adaptado de Foster e Fell, 1999).....	19
Figura 3.5 – Erosão interna iniciada a partir de um processo de erosão regressiva entre o maciço e a fundação de uma barragem (adaptado de Foster e Fell, 1999).....	20
Figura 3.6 – Escalas granulométricas adotadas pela ASTM, AASHTO, MIT e ABNT.	21
Figura 3.7 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica.....	22
Figura 3.8 – Exemplo de distribuições granulométricas bem graduada (ou contínua), mal graduada (ou uniforme) e descontínua (adaptado de Das, 2007).....	22
Figura 3.9 – Mecanismos de filtragem (Humes, 1995).....	27
Figura 3.10 – Granulometrias típicas de solos com potencial à instabilidade interna (Foster e Fell, 1999).....	28
Figura 3.11 – Ilustração esquemática do critério proposto por De Mello (1975) (adaptado de ICOLD, 1994).....	31
Figura 3.12 – Representação gráfica resumida do critério proposto por Kenney e Lau (1985, 1986) para a avaliação da estabilidade interna (adaptado de Indraratna e Raut, 2006).....	32
Figura 3.13 – Representação gráfica do método para determinação da curva de forma Adaptado de Kenney e Lau (1985).....	33
Figura 3.14 – Representação gráfica do critério para a avaliação da estabilidade interna Adaptado de Kenney e Lau (1985, 1986).....	33
Figura 3.15 – Dimensionamento de filtro realizado para material base areno siltoso com presença de pedregulhos (adaptado de NRCS, 1994).....	42
Figura 3.16 – Representação das curvas granulométricas contínua e descontínua (Silveira, 1964).....	49
Figura 3.17 – “Esquemas de vazios” (constrições) de filtros para os estados (a) mais denso e (b) menos denso adotados por Silveira (1964, 1966).....	50
Figura 3.18 – Arranjos de partículas de um filtro (a) no estado mais denso e (b) no estado mais fofo; (c) a área formada pelo plano que corta o centro de quatro partículas (estado fofo), A_v , e (d) o diâmetro equivalente do vazio correspondente à área A_v (adaptado de Silveira et al., 1975).....	51

Figura 3.19 – Representação esquemática (a) do vazio de controle, de diâmetro d_v , formado entre os grãos de um filtro em seu estado denso; e (b) da partícula de solo base, de diâmetro d	57
Figura 3.20 – Curva dos vazios de um filtro e curva granulométrica de um material base (adaptado de Silveira, 1964).....	58
Figura 3.21 – Exemplo de curva de penetração (adaptado de Silveira, 1964).....	59
Figura 3.22 – Configuração esquemática dos vazios formados em (a) solos bem graduados e (b) solos pouco graduados.....	61
Figura 3.23 – DG_m , DG_n e DG_{as} para (a) solo uniforme, $C_u = 1,2$, e (b) solo mais bem graduado, $C_u = 4,4$ (adaptado de Trani, 2009).....	62
Figura 3.24 – Influência do índice de densidade, I_D , de determinado filtro na sua distribuição de vazios (adaptado de Raut e Indraratna, 2004).....	64
Figura 3.25 – Probabilidade de carreamento das partículas de determinado solo base através das camadas de um filtro granular (adaptado de Indraratna et al., 2007).....	66
Figura 4.1 – Fluxograma das atividades.....	72
Figura 4.2 – Fluxograma resumido do procedimento de cálculos incorporado à rotina do programa para determinação da curva de distribuição dos vazios (Adaptado de Raut, 2006).....	77
Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos materiais da Barragem de Balderhead (Adaptado de Vaughan e Soares, 1982).....	79
Figura 5.1 – Localização da Barragem de Balderhead (Imagens orbitais Spot e Orbview de maio de 2005 a setembro de 2012, Digital Globe; Google Earth, data das imagens: 9 de novembro de 2009 e acesso em 12 de junho de 2013).....	82
Figura 5.2 – Seção típica da Barragem de Balderhead (Adaptado de Vaughan et al., 1970).....	83
Figura 5.3 – Seção longitudinal da Barragem de Balderhead (Adaptado de Vaughan et al., 1970).....	84
Figura 5.4 – Curvas granulométricas plotadas após tratamento das informações obtidas de Vaughan e Soares (1982).....	85
Figura 5.5 – Curvas granulométricas em massa das duas amostras do núcleo da Barragem de Balderhead.....	86
Figura 5.6 – Curvas granulométricas em massa de três amostras do filtro da Barragem de Balderhead.....	87
Figura 5.7 – Núcleo da Barragem de Balderhead com representação do <i>sinkhole</i> , na região afetada pelo evento de <i>piping</i> ocorrido (adaptado de Vaughan e Soares, 1982).....	88
Figura 6.1 – Dimensionamento de filtro para o núcleo (amostras “Fina” e “Grossa”) da Barragem de Balderhead – pontos e limites granulométricos determinados.....	92
Figura 6.2 – Curvas granulométricas do núcleo e filtro da Barragem de Balderhead e dos dimensionamentos feitos no projeto da barragem e no presente trabalho.....	93
Figura 6.3 – Análise da estabilidade interna do núcleo (Núcleo Grosso).....	95
Figura 6.4 – Análise da estabilidade interna do núcleo (Núcleo Fino).....	96
Figura 6.5 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 1 e 2 (amostras “Filtro Fino” e “Núcleo Grosso”).....	100

Figura 6.6 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 3 e 4 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Fino”)	100
Figura 6.7 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 5 e 6 (amostras “Filtro Grosso1” e “Núcleo Fino”)	101
Figura 6.8 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 7 e 8 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Grosso”)	101
Figura 6.9 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 9 e 10 (amostras “Filtro Grosso1” e “Núcleo Grosso”)	102
Figura 6.10 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 11 e 12 (amostras “Filtro Fino” e “Núcleo Fino”)	102
Figura 6.11 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 13 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)	103
Figura 6.12 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 14 (amostras “Filtro Grosso1” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)	103
Figura 6.13 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 15 (amostras “Filtro Fino” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)	104
Figura 6.14 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 16 (amostras “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso” e “Núcleo Fino”)	104
Figura 6.15 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 17 (amostras “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso” e “Núcleo Grosso”)	105
Figura 6.16 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Fino”, $I_D = 70\%$	105
Figura 6.17 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Fino”, $I_D = 50\%$	106
Figura 6.18 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso2”, $I_D = 70\%$	106
Figura 6.19 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso2”, $I_D = 50\%$	107
Figura 6.20 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso1”, $I_D = 70\%$	107
Figura 6.21 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso1”, $I_D = 50\%$	108
Figura 6.22 – Curvas de penetração – Amostra “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso”, $I_D = 50\%$	108
Figura 6.23 – Diagrama de Carreamento – representação gráfica dos carreamentos simulados e razões de retenção D_{15}/d_{85} para cada cenário	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Estatísticas de rupturas de barragens construídas entre 1800 e 1986 (adaptado de Foster et al., 1998, 2000).....	13
Tabela 3.2 – Estatísticas de rupturas de barragens construídas entre 1970 e 1989 (adaptado de Foster et al., 1998, 2000).....	14
Tabela 3.3 – Frequência histórica das rupturas e acidentes (1) em grandes barragens construídas entre 1800 e 1986 (adaptado de Foster et al., 1998, 2000).....	15
Tabela 3.4 – Classificação de probabilidade de ocorrência de erosão interna em barragens de acordo com o tipo de maciço (adaptado de Foster et al., 2000).....	18
Tabela 3.5 – Resumo com descrição de alguns dos critérios de filtros estabelecidos desde os estudos conduzidos por Terzaghi na década de 1920.....	36
Tabela 3.6 – Critérios para determinação da categoria do solo base.....	38
Tabela 3.7 – Determinação do D_{15} máximo (critério de filtração ou retenção).....	38
Tabela 3.8 – Determinação do D_{15} mínimo (critério de permeabilidade).....	39
Tabela 3.9 – Determinação do mínimo D_5 e do máximo D_{10}	40
Tabela 3.10 – Critério de segregação.....	41
Tabela 3.11 – Critério para filtros utilizados para revestir tubos coletores perfurados.....	42
Tabela 3.12 – Alguns trabalhos realizados relativos à teoria da distribuição de vazios – a evolução dos estudos (adaptado de Trani, 2009).....	47
Tabela 3.13 – Relações entre os diâmetros dos grãos para os agrupamentos considerados por Silveira (1964).....	53
Tabela 3.14 – Valores das relações entre os diâmetros dos vazios e o menor diâmetro do filtro, d_1 (Silveira, 1964).....	54
Tabela 3.15 – Tabela sugerida por Silveira (1964) para o cálculo das distribuições de vazios para diferentes determinações (adaptado de Silveira, 1964).....	55
Tabela 3.16 – Resumo dos resultados dos estudos comparativos realizados por Raut e Indraratna (2008) para validação do critério proposto.....	68
Tabela 5.1 – Dados da granulometria dos materiais da Barragem de Balderhead.....	85
Tabela 6.1 – Limites granulométricos obtidos para o filtro do núcleo da Barragem de Balderhead (conforme critérios de NRCS, 1994).....	91
Tabela 6.2 – Análises de carreamento realizadas – cenários avaliados.....	98
Tabela 6.3 – Resumo dos resultados para as análises realizadas – Análises de carreamento.....	99

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SIGLAS

AASHTO	American Association for State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
IAEG	International Association for Engineering Geology
ICOLD	International Commission on Large Dams
ISRM	International Society for Rock Mechanics
ISSMGE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NBR	Normas Brasileiras Registradas

SÍMBOLOS

A	Angularidade de partículas de um solo
A_v	Área do vazio contido em um plano que liga os centros de quatro partículas – condição de um material qualquer no estado fofo
C_c	Coefficiente de curvatura do solo
C_u	Coefficiente de uniformidade do solo
d	Diâmetro equivalente de determinada partícula do solo-base
D	Diâmetro equivalente de determinada partícula do filtro
D_{85}^*	Diâmetro das partículas do solo com porcentagem de ocorrência igual a 85% - após reclassificação da granulometria com a exclusão dos diâmetros maiores que 4,75 mm
D_{10}	Diâmetro das partículas do filtro correspondentes a 10% passante
D_{15g}	Diâmetro correspondente ao D_{15} da fração grossa de determinado material
D_{30}	Diâmetro das partículas do filtro correspondentes a 30% passante
D_{60}	Diâmetro das partículas do filtro correspondentes a 60% passante
D_{85}	Diâmetro das partículas do solo-base correspondentes a 85% passante
d_{85f}	Diâmetro correspondente ao d_{85} da fração fina de determinado material
d_{85R}	Diâmetro das partículas do solo com porcentagem de ocorrência igual a 85% - após reclassificação da granulometria com a exclusão dos diâmetros maiores que $d_{v,95}$
D_e	Diâmetro equivalente de uma partícula para o cálculo de sua esfericidade, S
D_{ef}	Diâmetro efetivo
DG	Distribuição Granulométrica
DG_{as}	Distribuição Granulométrica em termos das áreas de superfície das partículas
DG_{base}	Distribuição Granulométrica do solo base
DG_m	Distribuição Granulométrica em termos das massas das partículas

DG _n	Distribuição Granulométrica em número de partículas
D _i	i-ésimo diâmetro médio das partículas da curva granulométrica em massa (utilizado na determinação da distribuição granulométrica em termos de áreas de superfície das partículas, DG _{as})
d _i , d _j , d _k , d _m	Diâmetros genéricos de determinado material granular
d _{SF}	Diâmetro de controle para a autofiltragem – self-filtering size – definido em ICOLD (1994) para o cálculo da razão de retenção, em projetos de filtros
d _v	Diâmetro equivalente de determinado vazio do filtro
Dv ₀	Menor vazio da distribuição de vazios de determinado material no estado fofo
d _{v35}	Diâmetro de controle dos vazios - diâmetro dos vazios filtro com porcentagem de ocorrência igual a 35%
Dv ₃₅	Diâmetro do vazio correspondente a 35% de ocorrência/ Diâmetro controlador dos vazios dos filtros
d _{v95}	Maior diâmetro dominante dos vazios - diâmetro dos vazios filtro com porcentagem de ocorrência igual a 95%
Dv ₉₅	Diâmetro do vazio correspondente a 95% de ocorrência/ Diâmetro dominante dos vazios dos filtros
DV _d	Distribuição dos vazios (porosimetria) no estado denso
dv _d	Diâmetro dos vazios do estado denso
DV _f	Distribuição dos vazios (porosimetria) no estado fofo
dv _f	Diâmetro dos vazios do estado fofo
dv _{máx}	Maior diâmetro de vazios de determinada distribuição porosimétrica
Dv _{máxdi}	Maior diâmetro de vazios de um material no estado denso
Dv _{máxfi}	Maior diâmetro de vazios de um material no estado fofo
dv _{mín}	Menor diâmetro de vazios de determinada distribuição porosimétrica
e	Índice de vazios de um solo
e _{máx}	Índice de vazios máximo de um solo granular
e _{mín}	Índice de vazios mínimo de um solo granular
e _{nat}	Índice de vazios natural, ou <i>in situ</i> , de um solo granular
I _D	Índice de densidade de um material granular
I _{Dmáx}	Índice de densidade máxima de um material granular
I _{Dmín}	Índice de densidade mínima de um material granular
L _p	Comprimento de uma partícula para o cálculo de sua esfericidade, S
m	Número de diâmetros diferentes de grãos a serem considerados para o cálculo da distribuição dos vazios de determinado filtro
n	Número de provas ou confrontos entre partículas de um material base e vazios de determinado filtro
N	Número total de combinações com repetição possíveis de três grãos
p	Porcentagem acumulada de partículas passantes em determinada peneira

P^*	Nível de confiança de uma partícula qualquer do solo base para que esta seja retida por um vazio qualquer após um número n de confrontos, ou provas – em valor absoluto ($P^* = P^{**}/100$)
P^{**}	Nível de confiança de uma partícula qualquer do solo base para que esta seja retida por um vazio qualquer após um número n de confrontos, ou provas – em porcentagem
P_{Ai}	Coefficiente para determinação da distribuição granulométrica em termos de áreas de superfície das partículas, DG_{as}
P_i, P_j, P_k, P_m	Probabilidade de ocorrência do diâmetro da i -ésima partícula da distribuição granulométrica de determinado material granular
P_{mi}	Probabilidade de ocorrência do i -ésimo diâmetro médio da distribuição granulométrica em massa (utilizado na determinação da distribuição granulométrica em termos de áreas de superfície das partículas, DG_{as})
Pv_i	Probabilidade de ocorrência do diâmetro do i -ésimo vazio da distribuição dos vazios de determinado material
s	Percurso unitário de uma partícula do solo base através de determinado material – correspondente a um confronto n , nas análises probabilísticas de Silveira (1964)
S	Percurso total de uma partícula do solo base carregada através de determinado material até sua retenção, quando encontra um vazio de dimensões menores que a dela
S_{esf}	Esfericidade de partículas de um solo
V	Volume de uma partícula para o cálculo de sua esfericidade, S
V_s	Volume da parte sólida de um solo
V_v	Volume dos vazios de um solo

RESUMO

Processos de erosão interna juntamente com eventos de galgamentos são as principais causas de rupturas de barragens no mundo. Este fenômeno ocorre quando as partículas de um solo sofrem carregamentos excessivos devidos ao fluxo da percolação existente no maciço, em virtude da inexistência ou do funcionamento inadequado do sistema de filtros implantado no mesmo. O problema da filtragem, seja quanto ao dimensionamento ou avaliação de desempenho, é geralmente abordado em termos de diâmetros característicos dos materiais do solo base e do filtro. Embora os critérios usualmente aplicados para o dimensionamento de filtros sejam considerados satisfatórios, estes foram estabelecidos com base em resultados de ensaios de laboratórios e não contam com base teórica que permita avaliar qual é o carregamento das partículas do solo base através dos vazios formados entre os grãos de um filtro. Diante deste cenário, o professor Araken Silveira (Silveira, 1964), visando estabelecer critérios para dimensionamento não apenas granulométrico, mas também em termos das espessuras dos filtros, desenvolveu uma teoria para determinação da distribuição dos vazios, a partir da qual é possível simular o carregamento das partículas de um solo. Esta metodologia geométrica-probabilística permite determinar as distâncias percorridas pelas partículas do solo base até encontrar um vazio no filtro que restrinja seu transporte.

Este trabalho apresenta, como estudo de caso, uma avaliação sobre o processo de erosão interna ocorrido na Barragem de Balderhead, localizada na Inglaterra, na década de 60. A partir das análises realizadas, foi verificado que parcela considerável das partículas do núcleo da barragem estariam sujeitas a carregamentos maiores que a espessura do filtro implantado, fato que apresenta boa concordância em relação ao evento observado em campo. Além disso, foi feita uma correlação entre os resultados obtidos e a razão de retenção D_{15}/d_{85} – “Critério Clássico de Terzaghi” – a qual indicou a coerência deste critério, conforme já esperado.

Palavras Chaves: *Distribuição de vazios; filtros granulares; erosão interna; piping; porosimetria; carregamento.*

ABSTRACT

Internal erosion, along with overtopping events, are the main causes of dam failures in the world. This phenomenon occurs when particles of a base soil undergo excessive washing through due to embankment's seepage because of absence or poor performance of the filter system. The problem of filtering, either related to the design or performance evaluation, is generally discussed in terms of the characteristic diameters of base soil and filter materials. Although the criteria usually applied to the design of filters are considered satisfactory, they are based on results of laboratory tests and do not have a theoretical basis for assessing washing through, or for determining the distance that a base soil particle can migrate through the filter constrictions. In this context, Professor Araken Silveira (Silveira, 1964), in order to establish design criteria - not just in terms of particle sizes, but also in order to determine the thicknesses of filters - developed a theory for determining the constriction size distribution of materials, from which it is possible to simulate washing through phenomenon. This geometric-probabilistic methodology allows to determine the distances traveled by the particles of the base soil, through the filter, until they find a constriction which restricts its transport.

This case study presents an evaluation of the internal erosion process occurred in Balderhead Dam, located in England, in the 60s. Based on the analysis performed, it was found that a considerable portion of particles of the dam core would be subjected to washing through extents larger than the filter thickness, which indicates reasonable agreement with the incident observed at the dam. In addition, it was evaluated the correlation between the obtained results in washing through analysis and the retention ratio D_{15}/d_{85} - "Classical Terzaghi's Retention Criterion" - which indicated the consistency of this criterion, as previously expected.

Keywords: *Constriction size distribution; granular filters; internal erosion; piping; porosimetry; washing through.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Entre os aspectos a serem avaliados na ocasião do projeto de uma barragem – ou demais estruturas constituídas por elementos de drenagem interna e transições – devem ser destacadas as condicionantes e os procedimentos associados ao dimensionamento de filtros e transições, sendo que a segurança e a eficiência da estrutura estão intimamente relacionadas, dentre outras, a esta etapa do projeto.

Embora os projetos contem cada vez mais com processos automatizados e com novas tecnologias de análise disponíveis, observa-se que as falhas dos dispositivos de drenagem interna dos maciços projetados são causas frequentes de incidentes e acidentes nessas estruturas, sendo os processos de erosão interna a causa de cerca da metade das rupturas de barragens de que se tem registro (Foster et al., 1998, 2000).

Além de estar relacionado à segurança dessas estruturas, bem como de instalações e populações localizadas a jusante das mesmas, cabe ressaltar que um adequado dimensionamento de elementos de drenagem interna pode conduzir a reduções importantes de quantitativos de materiais em um projeto, embora muitas vezes os volumes de materiais envolvidos nestes sistemas não correspondam a parcelas significativas do orçamento da obra como um todo.

Dos problemas observáveis em drenos de materiais granulares em barragens, destacam-se as patologias associadas: (1) ao carreamento de partículas finas através de materiais granulares; (2) à incapacidade de drenar a água que percola pelo maciço, seja por mau dimensionamento ou devida à colmatação da estrutura. Tais fatores podem conduzir à formação de processos de erosão interna ou elevação do nível freático do maciço, respectivamente, podendo ambos acarretarem a ruptura da barragem.

Neste contexto, o presente trabalho aborda a evolução dos estudos sobre o carreamento de partículas através de materiais granulares, levando em consideração a configuração dos vazios existentes no interior destes materiais. Apresenta-se uma

revisão bibliográfica, a indicação de uma metodologia e um exemplo de simulação de carreamento aplicado a um estudo de caso.

1.2 Objetivos da dissertação

O objetivo desta dissertação é apresentar um estudo metodológico sobre o problema da erosão interna de solos sob o ponto de vista da distribuição de vazios dos materiais, tendo como foco a ocorrência deste fenômeno em barragens.

Os objetivos específicos são:

- Abordar a relevância do fenômeno da erosão interna na engenharia de barragens.
- Abordar alguns conceitos geotécnicos básicos e aspectos relevantes relacionados ao processo de filtragem, bem como critérios para dimensionamento de filtros.
- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre os estudos relacionados à teoria de curvas de vazios e análises de carreamentos.
- Apresentar uma metodologia para avaliar o problema da erosão interna de solos com base na distribuição de vazios e análise de carreamento.
- Apresentar um exemplo de aplicação da metodologia a um estudo de caso real da engenharia de barragens, simulando os carreamentos das partículas do núcleo de uma barragem através do filtro da mesma.
- Comparar as condições de carreamento obtidas nas análises com a realidade observada em campo, além de verificar, para os diversos cenários avaliados, a concordância dos resultados em relação ao critério de retenção D_{15}/d_{85} , proposto por Terzaghi.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos:

- Capítulo 1: apresenta as considerações iniciais, os objetivos dos estudos e a forma como o trabalho está organizado.
- Capítulo 2: apresenta um glossário com a conceituação de alguns termos relevantes relacionados ao tema discutido neste trabalho – termos apresentados em português e inglês. A apresentação do glossário em um capítulo específico, no início deste trabalho, visa facilitar a consulta dessas terminologias, que são

relevantes não só à revisão bibliográfica, mas também aos demais conteúdos desta dissertação.

- Capítulo 3: apresenta a revisão bibliográfica realizada, a qual aborda diversos aspectos relevantes para a discussão do tema deste trabalho.
- Capítulo 4: apresenta os materiais e dados utilizados e a metodologia aplicada ao estudo de caso relatado no Capítulo 5.
- Capítulo 5: apresenta um breve descritivo com as principais informações relevantes ao caso de estudo desta dissertação.
- Capítulo 6: apresenta as análises realizadas e os resultados obtidos.
- Capítulo 7: apresenta uma discussão sobre os resultados das análises realizadas.
- Capítulo 8: apresenta as principais conclusões da dissertação e algumas sugestões para estudos futuros.

2 GLOSSÁRIO

Para um melhor entendimento do assunto em discussão neste trabalho, julgou-se conveniente a conceituação de alguns termos técnicos importantes relacionados ao tema em questão, conforme apresentado nos itens seguintes.

Cabe destacar que é frequente a identificação de estruturas ou fenômenos com palavras cujos significados diferem no português em relação ao inglês. Em vista disso, os tópicos a seguir visam também discutir sobre a utilização destes termos, sobretudo os relacionados à teoria da distribuição dos vazios.

Para fins de unificação das terminologias apresentadas neste trabalho, os termos apresentados estão também redigidos em inglês, entre parêntesis.

Autocicatrização (*self-healing*)

A autocicatrização consiste na capacidade de um solo base, nas adjacências da interface base-filtro, de atingir o equilíbrio de suas partículas após um colapso interno, onde se iniciou um processo de instabilização interna (Sherard e Dunnigan, 1989).

Autocolmatação (*self-clogging*)

A autocolmatação consiste no preenchimento dos vazios de um solo base internamente instável pelas partículas mais finas deste material (ICOLD, 1994).

Colmatação (*clogging*)

A colmatação é o preenchimento dos vazios do filtro por partículas finas do solo base, o que conduz a uma considerável redução da permeabilidade na interface base-filtro (ICOLD, 1994).

Dreno (*drain*)

Materiais granulares, tubulações ou outros dispositivos – implantados sozinhos ou de forma associada – utilizados para coletar, transportar ou descarregar vazões e/ ou evitar a ocorrência de poropressões elevadas no maciço ou na fundação de estruturas geotécnicas. Para que não ocorram poropressões elevadas nos drenos ou em suas adjacências, a capacidade de conduzir vazões nestes dispositivos deve ser compatível com as vazões previstas em projeto. Em casos específicos, filtros – compostos por materiais finos ou granulares – podem operar com a finalidade de dreno (ICOLD, 1994).

Erosão (*erosion*)

Consiste no desprendimento e transporte de partículas de solo em virtude da atuação de forças causadas pelo fluxo de água através do mesmo. Tal desprendimento é a primeira condição que indica que as forças de arraste são maiores que as forças de resistência favoráveis à permanência da partícula no meio onde ela se encontra. O transporte, por sua vez, se constitui na segunda condição, expressando a situação hidromecânica em que as forças de arraste são maiores que a resistência ao carreamento.. Além disso, o transporte reflete uma condição geométrica em que os vazios e as fendas existentes no interior do maciço são grandes o suficiente para que as partículas sejam carreadas. Esta última condição representa uma peculiaridade das erosões internas em relação às externas (Fell et al., 2008).

Erosão de Contato (*contact erosion/ parallel contact erosion*)

De acordo com Fell et al. (2008), a erosão de contato consiste no carreamento de partículas finas localizadas na interface com determinado material granular, através do qual percola um fluxo na direção paralela ao contato entre os dois materiais (Figura 2.1).

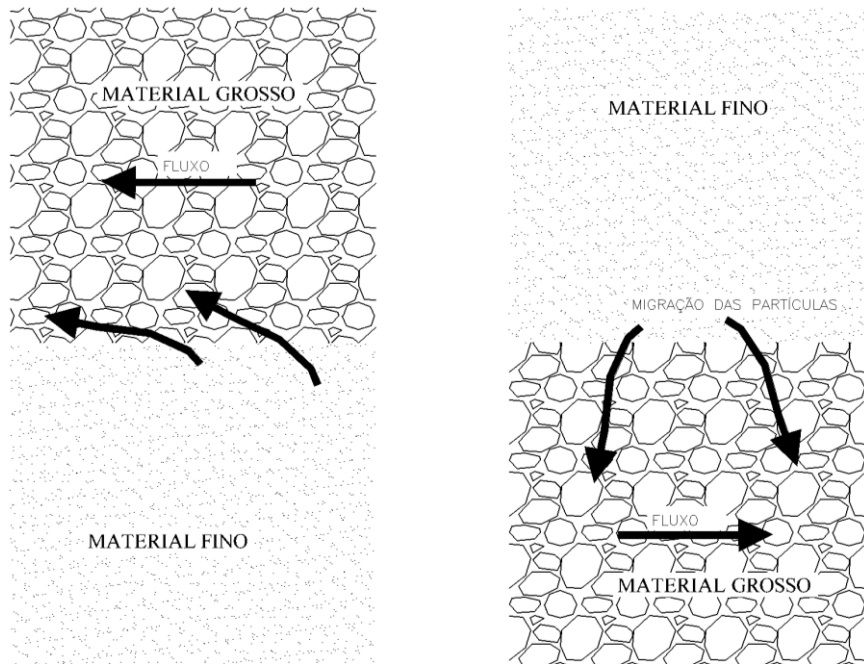


Figura 2.1 – Erosão de Contato

Quanto ao processo no qual o fluxo se dá na direção normal à interface entre os materiais, o mesmo não é considerado um mecanismo de erosão de contato, podendo corresponder a alguma outra fase de um processo de erosão, como filtração ou continuação.

Erosão Interna (*internal erosion*)

O fenômeno da erosão interna ocorre quando as partículas de um solo, no maciço de uma barragem ou em sua fundação, são carreadas pelo fluxo da percolação existente. O processo pode ter início com a ocorrência de erosões por escoamentos concentrados, erosões regressivas, sufusões e erosões de contato (com estruturas de concreto e tubulações, por exemplo) (Fell et al., 2008).

Erosão Regressiva (*backward erosion*)

A erosão regressiva consiste num processo erosivo no qual o carregamento de partículas se inicia no ponto de saída do fluxo que percola por determinado maciço, de

forma que a erosão ocorra regressivamente, ou seja, no sentido de jusante para montante, promovendo a formação de um “tubo”, por meio do qual o fluxo é contínuo.

Existem duas formas de erosão regressiva (Fell et al., 2008):

- erosão regressiva tubular, na qual o “tubo” é formado no plano horizontal, através de maciço ou fundação, por solo coesivo;
- erosão regressiva global, na qual o “tubo” se forma sub-verticalmente, através de camadas de solos siltosos ou arenosos, bem graduados (e não-plásticos), os quais geralmente compõem o núcleo de uma barragem. Nestes casos, é possível a formação de *sinkholes* na crista da barragem, por exemplo.

Ambas as formas supramencionadas se caracterizam como um processo de *piping*, descrito mais adiante, neste item.

Escoamentos Concentrados (*concentrated leaks*)

Onde existe uma fenda, num determinado solo, através da qual um vazamento concentrado pode ocorrer, as paredes desta abertura podem ser erodidas pelo fluxo de água. Estas fendas podem ser decorrentes de abatimentos ou fratura hidráulica em solos coesivos, ou de trincas de tração no interior do maciço. Podem ocorrer em zonas contínuas de materiais granulares e/ou mal compactados, de modo a permitir a formação de “vazios intercomunicantes” (Fell et al., 2008).

Filtro (*filter*)

Material através do qual é possível percolar um fluxo de água sem, contudo, permitir a passagem das partículas em suspensão. Caso haja a erosão destas partículas e o movimento das mesmas, o filtro tem a finalidade de retê-las em seu interior ou em sua interface com o solo de onde se originam tais partículas. Assim, o filtro previne a ocorrência de *piping* ao mesmo tempo que não impede a passagem da água, o que poderia conduzir a um aumento das poropressões (ICOLD, 1994).

Fratura Hidráulica (*hydraulic fracture*)

A fratura hidráulica pode ocorrer no núcleo ou na fundação de barragens, em casos em que os valores de poropressão excedem o valor da tensão principal menor e a tensão efetiva no interior do maciço atinge o valor nulo. Nessas condições, a pressão da percolação da água pode ser maior que as tensões compressivas do maciço e conduzir à formação de fendas (fraturas), a partir das quais um processo de erosão interna por escoamentos concentrados pode ser iniciado (Fell et al., 2008).

Conforme apresentado em FEMA (2011), a fratura hidráulica conduz a uma separação entre as partículas da massa de solo. Ainda de acordo com esta referência, solos compactados com umidade menor que a ótima são mais susceptíveis à ocorrência de fratura hidráulica.

Índice de Densidade ou Densidade Relativa (*relative density*)

O Índice de Densidade, I_D , de um solo não coesivo quantifica o estado natural de compactação do mesmo.

Tal parâmetro é muitas vezes referido como densidade relativa ou compactação relativa. De acordo com “Terminologia, Simbologia e Unidades, UNB/1998”, em concordância com associações internacionais – tais como de Mecânica dos Solos (ISSMGE), Mecânica das Rochas (ISRM), Geologia de Engenharia (IAEG), Barragens (ICOLD), entre outras – o termo “densidade relativa” foi substituído por “índice de densidade”.

Conforme destacado por Espósito (2000), deve-se ter cautela quando da avaliação de determinado material em termos de seu índice de densidade, sobretudo quando este for obtido por meio de investigações *in situ*. Conforme relatado pela autora, Tavenas e Rochelle (1972) citam estudos que apresentam, mesmo para condições adequadas de laboratório, divergências consideráveis nos valores de índice de densidade para diferentes métodos de ensaios, com coeficientes de variação em torno de 12%.

No item 3.5 apresentada-se uma discussão acerca da compactação de materiais não coesivos e descreve-se a forma de obtenção do índice de densidade desses materiais.

Instabilidade Interna (*internal instability*)

Segundo Kenney e Lau (1985), estabilidade interna é a capacidade de um solo de prevenir a migração de suas partículas finas como resultado de uma alteração das condições do meio devido à percolação e/ou à vibração.

Em solos sujeitos à instabilidade interna, as partículas finas do solo são passíveis de se movimentar no interior da massa de solo por ação de forças decorrentes de percolação. O início de tal fenômeno não requer que haja a presença de fendas no maciço, como no caso de escoamentos concentrados (Fell et al., 2008).

Materiais granulares e/ou com granulometria aberta têm susceptibilidade à instabilidade interna. O termo pode se confundir com “sufusão”, a qual será descrita mais adiante. No entanto, destaca-se que a instabilidade interna pode ocorrer em materiais que não atendem aos requisitos de um solo sufusivo, mas que podem ser submetidos a altos gradientes (Fell et al., 2008).

A Figura 3.10 apresenta formatos de curvas granulométricas típicas de solos que apresentam potencial à instabilidade interna. O item 3.7 desta dissertação é reservado para tratar especificamente da estabilidade interna dos solos.

Piping

O fenômeno *piping* consiste em um processo específico de erosão interna o qual tem início por meio de uma erosão regressiva e resulta na formação de um canal, ou “tubo”, por meio do qual o fluxo percola, com vazões consideráveis, de forma contínua entre a porção de montante e jusante do maciço ou fundação da barragem, podendo conduzir à formação de fendas e até à ruptura do maciço (Fell et al., 2008).

Sinkhole

Um *sinkhole* é um buraco, ou cavidade, formada no núcleo de uma barragem ou dique como resultado de um processo de erosão interna. Geralmente, a formação de tal cavidade se dá na direção subvertical, podendo ser decorrente de um processo de erosão regressiva (Fell et al., 2005).

Sufusão (*suffusion/ suffosion*)

A sufusão é uma forma de erosão interna de solos instáveis internamente onde as partículas finas constituintes de uma matriz com partículas mais grosseiras são carregadas pelo fluxo de água que percola pelo maciço, deixando para trás apenas um esqueleto formado por partículas grosseiras (Fell et al., 2008). Geralmente, a sufusão é caracterizada pela pequena ou nula variação de volume das camadas de solo envolvidas. O fenômeno caracteriza-se também por ocorrer na vertical, sendo os gradientes hidráulicos atuantes menores que o gradiente crítico de Terzaghi, e pelo fato de as tensões efetivas existentes entre as partículas grosseiras do solo terem maiores valores ao final do processo.

Vazios, poros, constrictões (*void, pores, constrictions*)

Embora os termos “vazios”, “poros” e “constrictões” sejam utilizados com frequência em referência a um mesmo significado, tanto em português como em inglês, é importante salientar a distinção existente entre estes conceitos.

Segundo ICOLD (1994), as dimensões das constrictões dos filtros são definidas pelos diâmetros das maiores esferas capazes de passar por uma determinada constrictão. Como apresentado na Figura 2.2, os vazios existentes entre as partículas dos filtros são compostos por poros e constrictões.

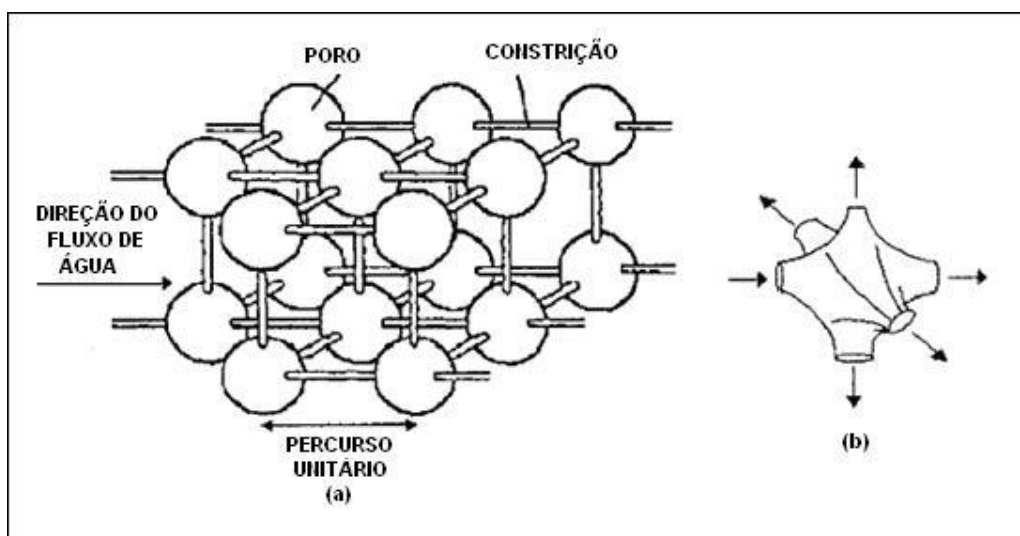


Figura 2.2 - (a) “Modelo de rede tridimensional de poros”, proposto por Schuler (1996); e (b) Vazio formado, composto por um poro único e seis constrictões (adaptado de Locke et al., 2001)

Define-se como um poro o espaço volumétrico formado entre quatro ou mais partículas. Uma constrição é uma abertura que conecta dois poros (Gardoni, 2000).

O termo “vazio” está associado a volume, ao passo que os estudos acerca da porosimetria estão relacionados principalmente à dimensão e forma dos grãos. Exemplificando a questão, uma partícula do solo pode ter um volume menor que determinado vazio do filtro e assim mesmo não ser carregada pelo mesmo, caso sua forma ou diâmetro seja maior que o diâmetro daquele vazio (Humes, 1995).

Conforme destacado por Humes (1995), a porosimetria, ou seja, a distribuição de vazios, que interessa para analisar o processo de filtração (bloqueio das partículas do material base) é aquela que determina a dimensão mínima (diâmetro) que controla a passagem da partícula do material base. Ou seja, a dimensão das restrições, e não dos vazios ou dos poros, é que controla a passagem da partícula do material base.

Em vista do exposto, a porosimetria é tratada geralmente, por muitos autores, em inglês, como “*Constriction Size Distribution*” (CSD). Em português, desde Silveira (1964), precursor da Teoria da Distribuição dos Vazios, as restrições têm sido referidas por “vazios de controle”.

Seguindo a concepção proposta por Silveira (1964) e buscando manter a uniformização dos termos utilizados em português, o presente trabalho tratará dos vazios de controle do processo de filtração apenas como “vazios”, mesmo que a análise sobre os mesmos seja, na prática, feita de forma bidimensional. Assim, serão tratados como sinônimos os termos “porosimetria”, “distribuição porosimétrica”, “distribuição dos vazios” e “*constriction size distribution*”.

Visando facilitar a menção às Curvas de Distribuição Granulométrica e dos Vazios, as mesmas serão identificadas pelas siglas DG e DV, respectivamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

A revisão bibliográfica desta dissertação está estruturada de forma a permitir a apresentação de alguns conceitos geotécnicos básicos para os materiais granulares, no que tange aos aspectos relacionados ao dimensionamento de filtros e transições, bem como àqueles que se tem desenvolvido desde meados da década de 1960 a respeito das análises de filtros em termos da distribuição dos vazios dos materiais que os constituem.

Cumprido destacar a importância do processo de filtração para o tema deste trabalho. Relacionado a este mecanismo, foco importante será dado aos critérios de dimensionamento de filtros, estudos que tiveram como principal precursor Karl Terzaghi, autor do “critério clássico de Terzaghi”, o qual é considerado até os dias atuais no dimensionamento de filtros.

Além das abordagens em termos das dimensões das partículas dos materiais, a distribuição e dimensão dos vazios formados nos solos é base importante para a compreensão dos mecanismos de filtração. Em vista disto, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica específica a respeito da distribuição dos vazios dos materiais.

Sendo a erosão interna um dos focos deste trabalho, julgou-se conveniente iniciar esta revisão bibliográfica com uma abordagem sobre a importância desse mecanismo na segurança de barragens, apresentando alguns dados estatísticos sobre eventos de falha por meio deste fenômeno e descrevendo as diferentes fases do processo, desde seu início até sua etapa final.

Pode-se, portanto, dividir este capítulo em quatro partes principais, quais sejam: (1) a importância da erosão interna na segurança de barragens e seus mecanismos – item 3.2; (2) alguns conceitos geotécnicos básicos para os materiais granulares – itens 3.3 ao 3.5; (3) os mecanismos de filtração e dimensionamento de filtros – itens 3.6 ao 3.8; e (4) uma revisão bibliográfica sobre os estudos relacionados à distribuição de vazios dos materiais – item 3.9.

3.2 A Importância da Erosão Interna na Segurança de Barragens e seus Mecanismos

Este item apresenta breve abordagem sobre a importância da erosão interna na segurança de barragens, bem como seus principais mecanismos de ocorrência. Tal fenômeno tem extrema relevância no meio geotécnico de barragens, sobretudo tendo em vista os dados que serão mencionados nesta seção, os quais apontam os problemas relacionados à erosão interna como os principais fatores causadores de rupturas de barragens, juntamente com eventos de galgamento.

3.2.1 Relevância do Problema

Com base em dados disponíveis sobre o histórico de incidentes em barragens construídas entre 1800 e 1986, e cujos mecanismos de falha são conhecidos, Foster et al. (1998, 2000) avaliaram as informações e apresentaram uma compilação destes dados sob uma visão estatística, visando possibilitar uma melhor compreensão sobre as principais causas, modos de falha e locais dos maciços onde ocorreram as rupturas das barragens. Parte dessa análise é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Estatísticas de rupturas de barragens construídas entre 1800 e 1986 (adaptado de Foster et al., 1998, 2000)

Mecanismo de Ruptura	Erosão		Escorregamento de Talude	
Modo de Falha	Galgamento	Erosão Interna	Instabilidade Estática	Instabilidade Sísmica
% de ocorrência	48	46	4	2
	94		6	

Como pode ser observado, erosões internas são responsáveis por cerca de metade das rupturas observadas, para a série avaliada, se juntando aos galgamentos como principais causas. Dados similares já haviam sido apresentados por Middlebrooks (1953), que reuniu dados sobre barragens de terra e enrocamento construídas nos Estados Unidos desde 1914. De acordo com o apresentado por este autor, cerca de 60% das anomalias constatadas nessas barragens consistiam em problemas relacionados a

galgamento ou erosão interna, destacando ainda a instabilização de taludes como causa de cerca de 15% das falhas.

É importante mencionar que a série avaliada por Foster et al. (1998, 2000) compreende barragens cuja implantação não levou em consideração diretrizes de projeto desenvolvidas mais recentemente, como critérios de dimensionamento de filtros. No entanto, cabe observar que as principais causas de rupturas em barragens construídas recentemente permanecem sendo relacionadas a erosões internas e galgamentos, como apresentado na Tabela 3.2. Entretanto, observou-se que parte considerável das barragens que estavam em desacordo com os critérios de filtro praticados atualmente não apresentaram problemas relacionados a erosões internas, o que sugere o conservadorismo desses critérios, como abordado no item 3.8.

Tabela 3.2 – Estatísticas de rupturas de barragens construídas entre 1970 e 1989 (adaptado de Foster et al., 1998, 2000)

Modos de Falha	Número de rupturas em relação ao número total de barragens avaliadas (%)	
	1970-1979	1980-1989
Erosão Interna	0,20	0,16
Galgamento ⁽¹⁾	0,26	0,19
Escorregamentos	0,04	0,01
Total	0,50	0,36

⁽¹⁾ Devido a dimensionamento e/ou operação inadequada das estruturas extravasoras.

Entre as barragens levadas em consideração nas análises, 0,5% das construídas entre 1970 e 1979 sofreram ruptura por algum motivo e 0,36%, entre aquelas implantadas entre 1980 e 1989, o que indica uma melhora nos métodos de projetos e/ ou construção e operação das barragens.

De acordo com Foster et al. (1998, 2000), uma em cada oitenta barragens construídas entre 1800 e 1986 apresentaram ocorrência de algum tipo de erosão interna (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Frequência histórica das rupturas e acidentes⁽¹⁾ em grandes barragens construídas entre 1800 e 1986 (adaptado de Foster et al., 1998, 2000)

CASO	TOTAL	NOS MACIÇOS	NAS ADJACÊNCIAS DE TUBULAÇÕES E PAREDES DE ESTRUTURAS
Rupturas por erosões internas	36	19	17
Acidentes por erosões internas	75	52	23
Acidentes devidos a percolação sem erosões detectadas	36	30	6
Nº total de rupturas e acidentes	146	101	46
Total de barragens	11.192	11.192	5,596
Frequência histórica de rupturas e acidentes	0,013	0,009	0,0082
Proporção de rupturas e acidentes no primeiro enchimento do reservatório	36%	-	-
Proporção de rupturas e acidentes após o primeiro enchimento do reservatório	64%	-	-
Frequência histórica para o primeiro enchimento do reservatório	-	0,0032	0,0030
Frequência histórica para após o primeiro enchimento do reservatório	-	0,0058	0,0052
Frequência histórica anual após o primeiro enchimento do reservatório	-	$2,2 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$

⁽¹⁾ De acordo com a terminologia adotada pelo Foster et al. (1998), acidentes são ocorrências com potencial para conduzir a um colapso, que sofrem rápida intervenção, impedindo eventuais rupturas.

Além do que foi mostrado na Tabela 3.3, os mesmos trabalhos desses autores mostrou que, para todos os modos de erosão interna, cerca de dois terços das falhas e cerca de metade dos acidentes ocorrem no primeiro ano de enchimento do reservatório ou nos primeiros cinco anos de operação.

Foster et al. (1998) constataram que praticamente todas as falhas por erosão interna no maciço ocorreram quando o nível do reservatório estava em sua cota máxima, ou a até um metro desse nível. Tal constatação indica a importância da carga hidráulica do reservatório e, por conseguinte, do gradiente hidráulico, para a ocorrência do carreamento das partículas do solo do maciço.

3.2.2 Uma Visão Geral sobre a Erosão Interna e seus Mecanismos

Este item aborda as fases de um processo de erosão interna desde seu início até o colapso de determinada estrutura, bem como destaca os principais mecanismos por meio dos quais tal fenômeno pode ser iniciado.

O fenômeno da erosão interna ocorre quando as partículas de um solo, no maciço de uma barragem ou em sua fundação, são carregadas pelo fluxo da percolação existente. O processo pode ter início com a ocorrência de erosões por escoamentos concentrados, erosões regressivas, sufusões ou erosões de contato (com estruturas de concreto e tubulações, por exemplo) (Fell et al., 2008).

3.2.2.1 Fases de um processo de erosão interna

Conforme relatado por Foster et al. (1998), existem quatro graus, ou fases, de erosões internas. Estas fases estão descritas a seguir, de acordo com Foster e Fell (1998):

- *Início*: etapa a partir da qual o processo é engatilhado, podendo ter sua causa relacionada a escoamentos concentrados, erosão regressiva, erosão de contato ou sufusão – ou a mais de um desses fatores simultaneamente.

- *Continuação*: etapa posterior ao início do processo, no qual a erosão não foi paralisada pela ação de um filtro ou simplesmente pelo fato de as partículas erodidas não terem sido retidas por nenhum material.

- *Progressão*: estágio no qual o “tubo” é efetivamente formado e a percolação e/ ou as poro-pressões na porção de jusante da barragem ou fundação se estabilizam ou tem suas intensidades aumentadas.

Nos casos de erosões regressivas, o estágio de progressão se caracteriza pelo início da formação do “tubo”, ou seja, a erosão passa a não atuar apenas superficialmente na face de jusante da barragem.

Em casos de sufusões, embora não haja a formação de um “tubo” neste estágio, a permeabilidade do maciço aumenta significativamente.

- *Fratura (“breach”)*: estágio de formação da brecha, no qual eflui uma vazão descontrolada do reservatório e não se tem mais controle sobre o processo. Até esta etapa do processo, geralmente todas as intervenções possíveis já devem ter sido efetuadas.

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente os modos de ruptura mais comuns devidos à erosão interna, de acordo com Fell e Fry (2007).

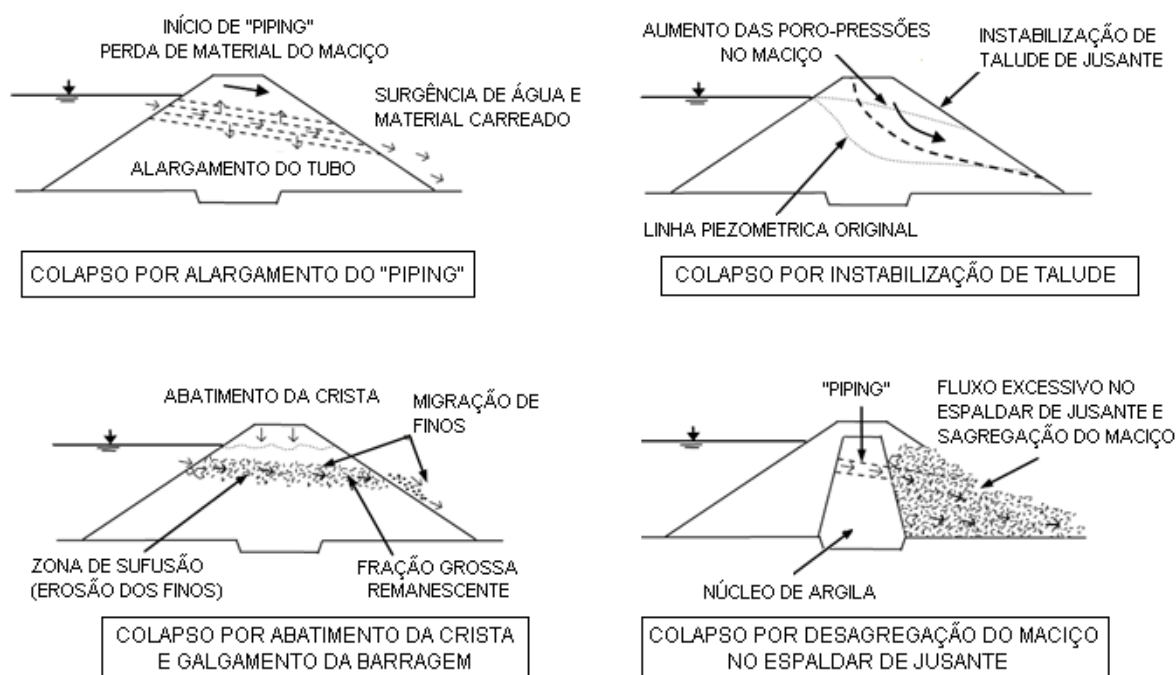


Figura 3.1 - Modos de ruptura devidos a eventos de erosão interna (adaptado de Fell e Fry, 2007)

Em referencia à etapa de continuação da erosão interna, Foster et al. (2000) apresentaram uma avaliação estatística qualitativa sobre alguns dos tipos de sistemas de filtro e maciços utilizados na engenharia de barragens e as probabilidades de ocorrência de erosão interna, conforme apresentado na Figura 3.2 e na Tabela 3.4.

Tal análise não levou em conta detalhes de projeto, construção e demais fatores, servindo apenas como um panorama geral, de acordo com eventos já ocorridos e dos quais se tem informações.

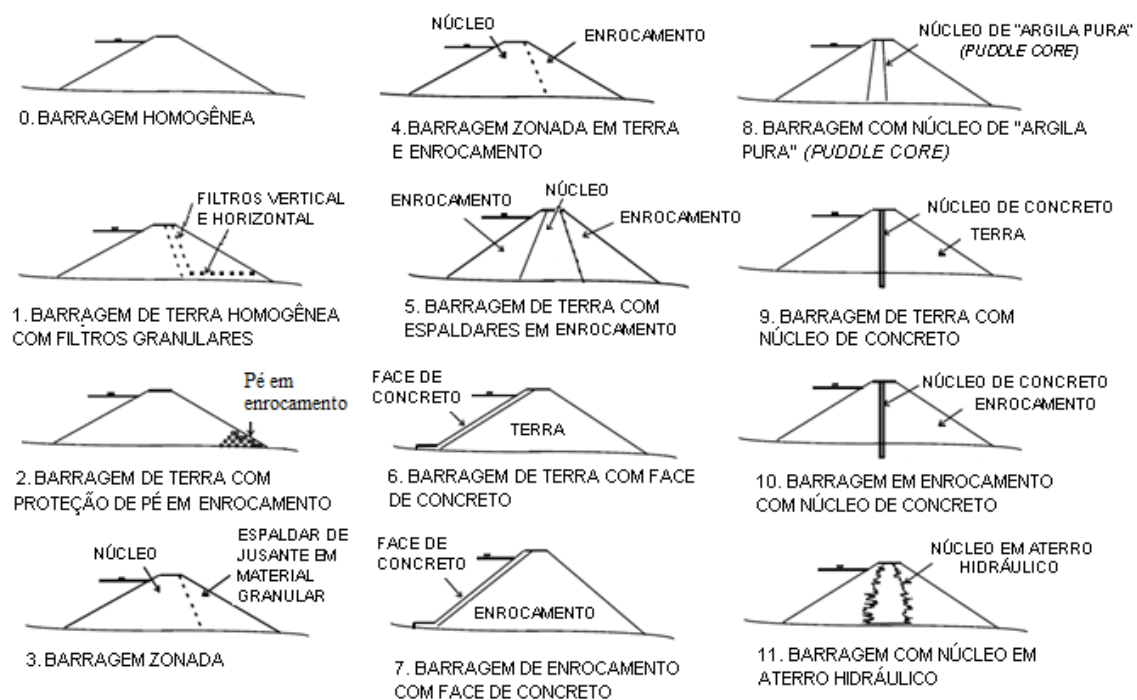


Figura 3.2 – Alguns tipos de maciço praticados na engenharia de barragens (adaptado de Foster et al., 1998)

Tabela 3.4 – Classificação de probabilidade de ocorrência de erosão interna em barragens de acordo com o tipo de maciço (adaptado de Foster et al., 2000)

Tipo/ Categoria de maciço (ver Figura 3.2)	Probabilidade de ocorrência de erosão interna	Controle da erosão interna
Barragem homogênea (0) Barragem de terra com proteção de pé em enrocamento (2)	A. Alta	Pouco ou nenhum controle
Barragem zonada (3) Barragem zonada em terra e enrocamento (4) Barragem com núcleo de "argila pura" (<i>puddle core</i>) (8) Barragem com núcleo em aterro hidráulico (11)	B. Moderada	Algum controle, a depender dos materiais do maciço e da eficiência do filtro
Barragem de terra com face de concreto (6) Barragem de enrocamento com face de concreto (7) Barragem de terra com núcleo de concreto (9) Barragem em enrocamento com núcleo de concreto (10)	C. Baixa	Controle moderado, a depender da eficiência do filtro e dos dispositivos em concreto
Barragem de terra homogênea com filtros granulares (1) Barragem de terra com espaldares em concreto (5)	D. Muito baixa	Bom controle, a depender de boa qualidade de projeto e construção do maciço e filtros

3.2.2.2 Mecanismos de início de erosões internas

Conforme mencionado no item 3.2.2.1, existem quatro mecanismos por meio dos quais um processo de erosão interna pode ser iniciado, quais sejam: escoamentos concentrados, erosão regressiva, erosão de contato e sufusão. O Capítulo 2, dedicado à conceituação de alguns termos relevantes ao tema desta dissertação descreve esses processos.

As Figuras 3.3 a 3.5 descrevem, de forma esquemática, os diferentes estágios de uma erosão interna iniciada a partir de vazões concentradas e erosões regressivas – na fundação ou no maciço da barragem.

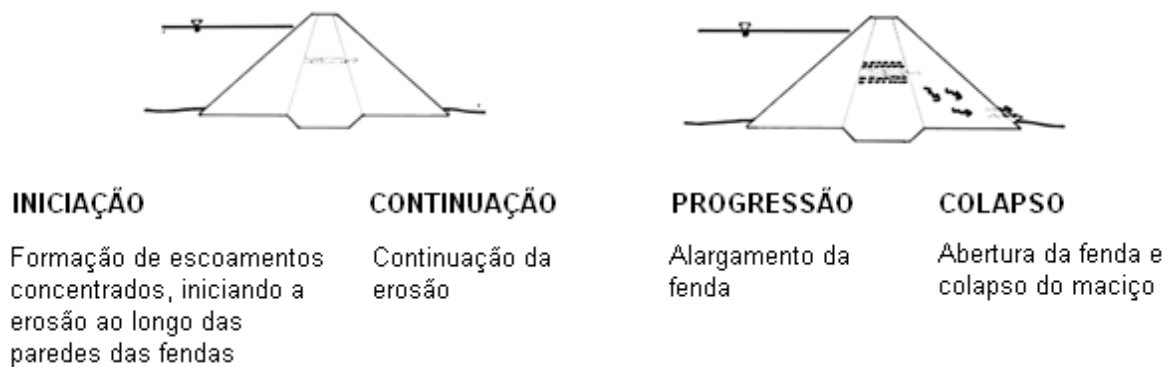


Figura 3.3 – Erosão interna no maciço de uma barragem iniciada devido a um escoamento concentrado (adaptado de Foster e Fell, 1999)

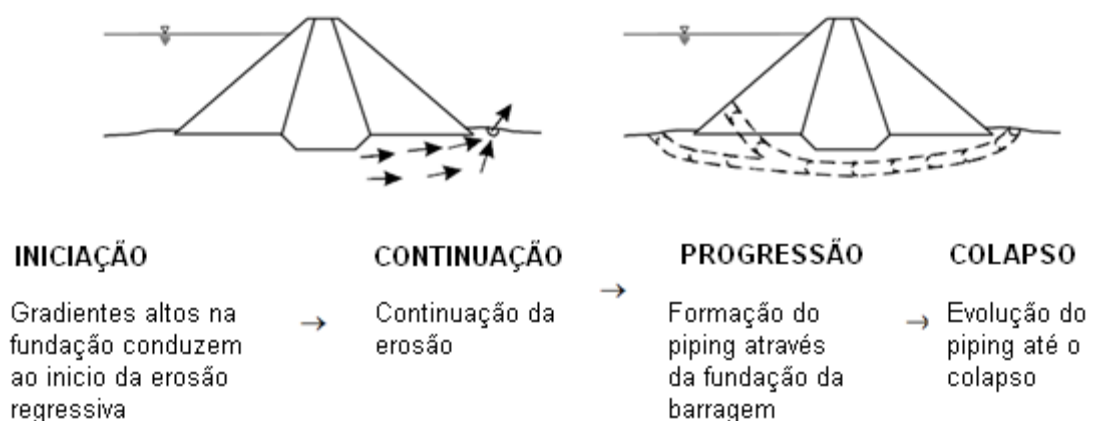


Figura 3.4 – Erosão interna na fundação de uma barragem iniciada a partir de um processo de erosão regressiva (adaptado de Foster e Fell, 1999)

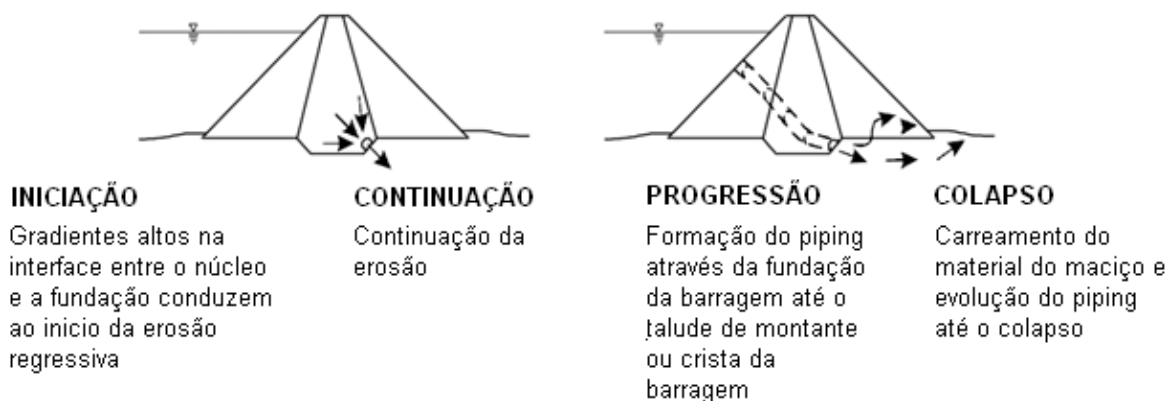


Figura 3.5 – Erosão interna iniciada a partir de um processo de erosão regressiva entre o maciço e a fundação de uma barragem (adaptado de Foster e Fell, 1999)

3.3 Análise Granulométrica do Solo

A análise granulométrica consiste na determinação de faixas de tamanhos das partículas presentes em determinado solo e é expressa geralmente como uma porcentagem da massa total ensaiada. Como será abordado no item 3.9, uma distribuição granulométrica de um material granular pode ser expressa também em termos dos números de partículas ou das áreas superficiais das mesmas.

As partículas de um solo não são esféricas, sendo utilizado o termo “diâmetro equivalente da partícula”, ou muitas vezes simplesmente “diâmetro da partícula”, para se referir ao tamanho das mesmas. Em uma curva granulométrica, para as frações grosseiras, o diâmetro equivalente se refere ao diâmetro da menor esfera que circunscreve a partícula, enquanto que para as frações mais finas este diâmetro é calculado por meio da lei de Stokes.

Os solos podem ser classificados quanto às dimensões de suas partículas. A Figura 3.6 apresenta as categorias usualmente empregadas para tanto, de acordo com os critérios adotados pela ASTM (*American Society for Testing Materials*), AASHTO (*American Association for State Highway and Transportation Officials*), MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) – NBR 6502/95 (ABNT, 1995).

Embora os critérios adotados pela ABNT sejam corriqueiramente utilizados nas obras geotécnicas no Brasil, de uma forma geral, a escala estabelecida pela AASHTO também é muito utilizada para fins rodoviários.

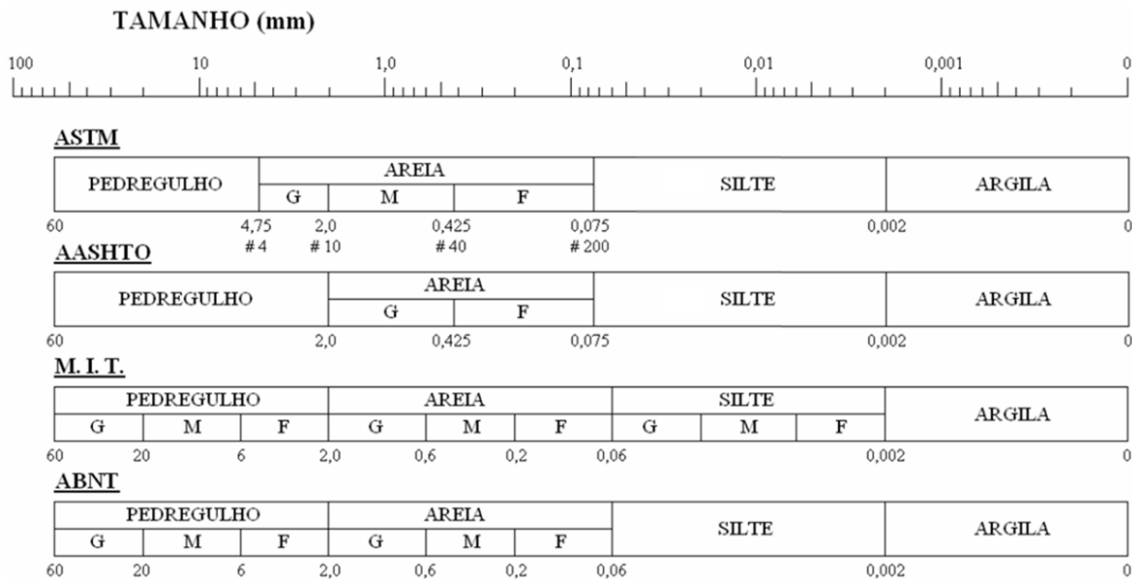


Figura 3.6 – Escalas granulométricas adotadas pela ASTM, AASHTO, MIT e ABNT

Para a determinação da distribuição granulométrica dos solos, a norma NBR 7181/84 (ABNT, 1984) estabelece que os materiais devem ser investigados por meio de ensaio que consiste em dois procedimentos distintos para as frações mais grosseiras e mais finas, quais sejam:

- Ensaio de peneiramento: para partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm;
- Ensaio de sedimentação: para partículas com diâmetros menores que 0,075 mm.

Uma vez determinadas as porcentagens de ocorrência e as massas correspondentes, os valores são plotados em um gráfico, sendo o eixo das abscissas correspondente às aberturas das malhas, em escala logarítmica, e as ordenadas, às porcentagens do material que passa, como exemplificado pela Figura 3.7. A este gráfico, dá-se o nome de curva de distribuição granulométrica.

Um solo é classificado como mal graduado, ou uniforme, se o mesmo apresentar pouca variação nos diâmetros dos grãos. Caso os tamanhos de suas partículas estejam distribuídos em uma ampla faixa, o mesmo é classificado como um solo bem graduado, ou contínuo, ou ainda desuniforme. Caso um material apresente mais de uma fração com granulometrias uniformes, o mesmo pode ser classificado como um solo de granulometria descontínua, ou de granulometria “aberta” (*gap-graded*).

A Figura 3.8 apresenta exemplos de curvas granulométricas com diferentes formas.

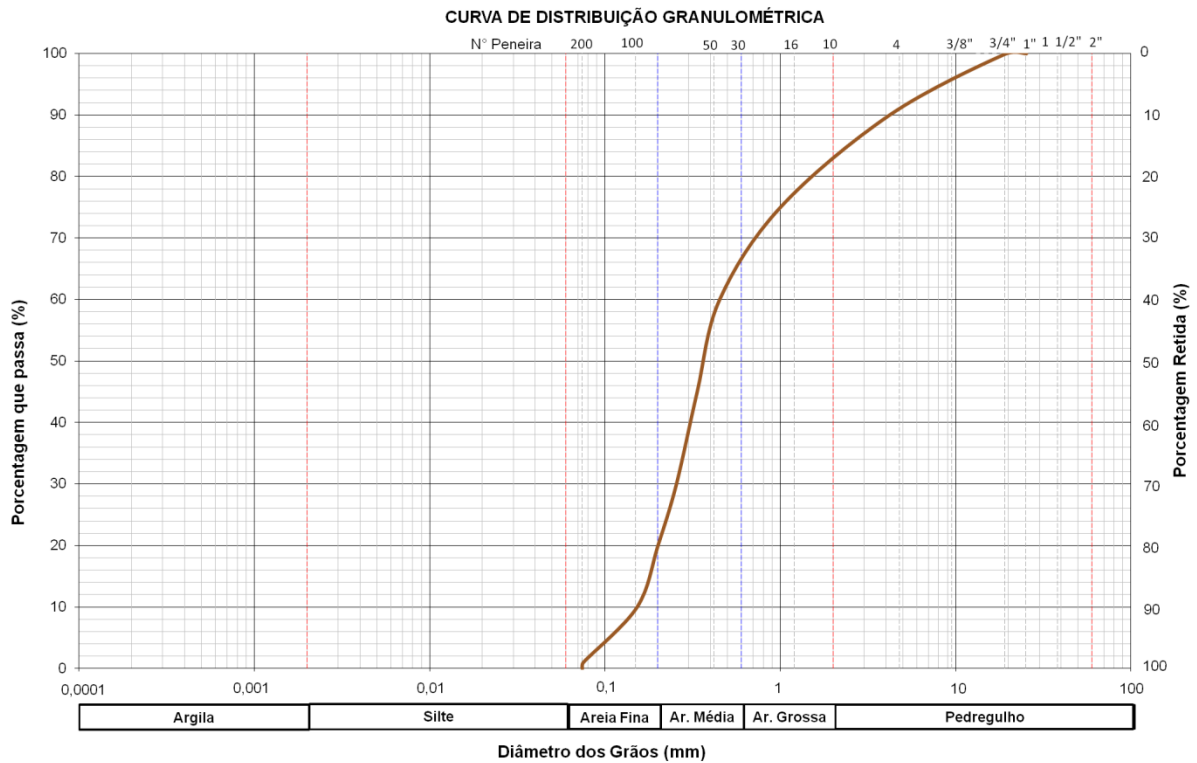


Figura 3.7 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica

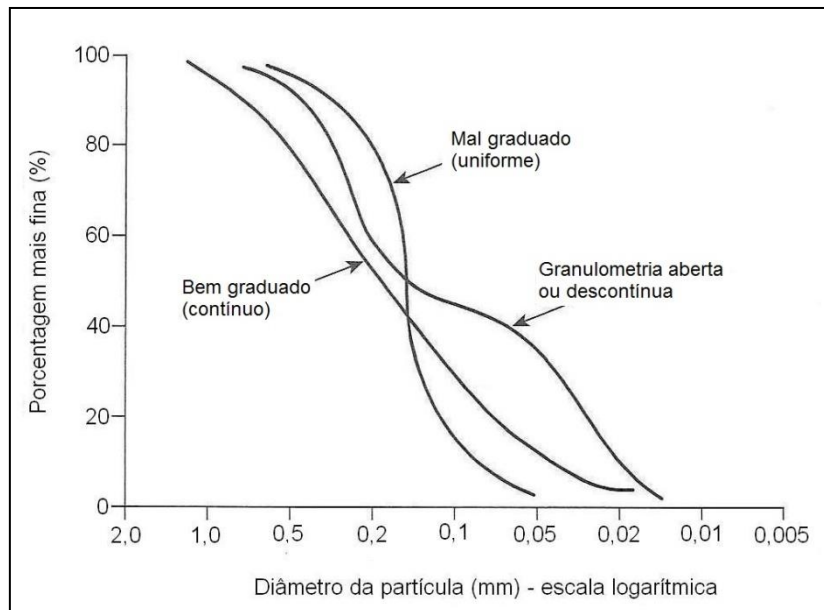


Figura 3.8 – Exemplo de distribuições granulométricas bem graduada (ou contínua), mal graduada (ou uniforme) e descontínua (adaptado de Das, 2007)

Como observado, a curva de distribuição granulométrica de um solo representa não apenas os tamanhos dos grãos, mas também a forma como os mesmos estão distribuídos no material.

Três parâmetros são importantes para a caracterização de uma curva granulométrica, conforme classificações supramencionadas: diâmetro efetivo (D_{ef} ou D_{10}), coeficiente de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c).

Os valores de C_u e C_c são definidos conforme Equações 3.1 e 3.2.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (3.2)$$

Os solos bem graduados apresentam coeficientes de curvatura entre 1 e 3.

Quanto ao coeficientes de uniformidade, o mesmo apresenta valores variados para solos muito uniformes ($C_u < 5$), medianamente uniformes ($5 < C_u < 15$) e solos desuniformes, sendo estes últimos referidos também como bem graduados ($C_u > 15$) (Das, 2007).

3.4 Forma das Partículas

A forma das partículas é um parâmetro importante para se caracterizar determinado material. No entanto, em virtude das dificuldades em se efetuar tal avaliação, não é comum realizá-la.

Tendo em vista o conteúdo a ser apresentado neste trabalho, faz-se conveniente abordar os critérios de classificação geralmente utilizados para classificar as partículas de determinado material em função das formas das mesmas.

As partículas são geralmente classificadas em três categorias, quais sejam (Das, 2007):

- Volumosa
 - Angular
 - Subangular
 - Subarredondada
 - Arredondada
- Laminar
- Fibrilar

Como pode ser notado, as partículas volumosas podem ser subdivididas em categorias, de acordo com a sua angularidade, A , definida pela Equação 3.3.

$$A = \frac{\text{Raio médio de cantos e bordas}}{\text{Raio da esfera máxima inscrita}} \quad (3.3)$$

A esfericidade das partículas volumosas é definida pela Equação 3.4.

$$S_{esf} = \frac{D_e}{L_p} \quad (3.4)$$

em que D_e = diâmetro equivalente da partícula = $\sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$

onde:

V = volume da partícula;

L_p = comprimento da partícula.

As partículas volumosas são formadas na maioria dos casos por intemperismo físico de rochas e minerais; as partículas laminares são predominantemente argilominerais e têm esfericidade muito reduzida – normalmente $S_{esf} \leq 0,01$; as partículas fibrilares são muito menos comuns que os outros dois tipos de partículas mencionados – exemplos de solos que contém partículas fibrilares são alguns depósitos de coral e argilas de atapulgita (Das, 2007).

3.5 Compacidade de Materiais Não Coesivos

3.5.1 Índice de Vazios

O índice de vazios, e , foi introduzido por Terzaghi ao estudar o fenômeno do adensamento do solo, visto que a variação de e , indicando uma variação de volume, só depende da variação do volume dos vazios, V_v , uma vez que o volume dos sólidos do solo, V_s não varia, ou varia pouco, durante o fenômeno.

Tal parâmetro consiste na relação entre o volume de vazios, V_v , e o volume da parte sólida, V_s , para determinado solo, conforme Equação 3.5.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.5)$$

3.5.2 Índice de Densidade

O Índice de Densidade, I_D , de um solo não coesivo quantifica o estado natural (*in situ*) de compactação do mesmo. Tal parâmetro é muitas vezes referido como densidade relativa ou compactação relativa (ver discussão sobre esta terminologia no Capítulo 2).

Quando da execução de filtros e transições, é comum que o controle tecnológico da obra seja efetuado por meio da verificação do atendimento às especificações técnicas e dos valores de I_D especificados pelas mesmas.

Este parâmetro é função dos índices de vazios máximos e mínimos, $e_{máx}$ e $e_{mín}$, determinados em laboratório antes da execução da obra, bem como do índice de vazios natural, ou *in situ*, do material, e_{nat} , determinado também em laboratório para cada amostra coletada das camadas executadas, de acordo com as quantidades definidas nas especificações técnicas da obra.

O índice de densidade é definido pela Equação 3.6.

$$I_D = \frac{e_{máx} - e_{nat}}{e_{máx} - e_{mín}} \quad (3.6)$$

As normas ABNT NBR 12004 (1990) e ABNT NBR 120051 (1991) descrevem os procedimentos para obtenção dos valores de $e_{máx}$ e $e_{mín}$, respectivamente, em solos não coesivos. A ABNT NBR 120051 (1991) descreve, ainda, o método para cálculo do índice de densidade correspondente a um determinado índice de vazios, e_{nat} , do material ensaiado.

Segundo o USBR (1987), os filtros devem apresentar compactidades adequadas, de modo a reproduzirem densidades suficientes para evitar a liquefação, prover tensões efetivas adequadas e evitar a quebra dos grãos, o aumento do teor de finos e a redução da permeabilidade.

Embora os valores de I_D aceitáveis para a execução de filtros sejam geralmente definidos nas especificações técnicas de cada obra, cabe mencionar que um valor mínimo de $I_D = 70\%$ é sugerido pelo USBR (1987) para a execução de filtros.

3.6 Mecanismo de Filtragem

Neste item é discutida a forma como ocorre um processo de filtragem. Embora seja uma questão simples e relacionada somente a aspectos físicos e geométricos, o autor desta dissertação julgou relevante discutir a respeito dos mecanismos por meio dos quais uma zona de interface entre um solo base e um filtro, numa barragem, por exemplo, tem suas características alteradas desde o início do processo de filtragem, até a estabilização do filtro.

Humes (1995) apresenta de forma esquemática os dois estados mencionados, tendo como foco as dimensões das partículas do solo base e dos vazios do filtro.

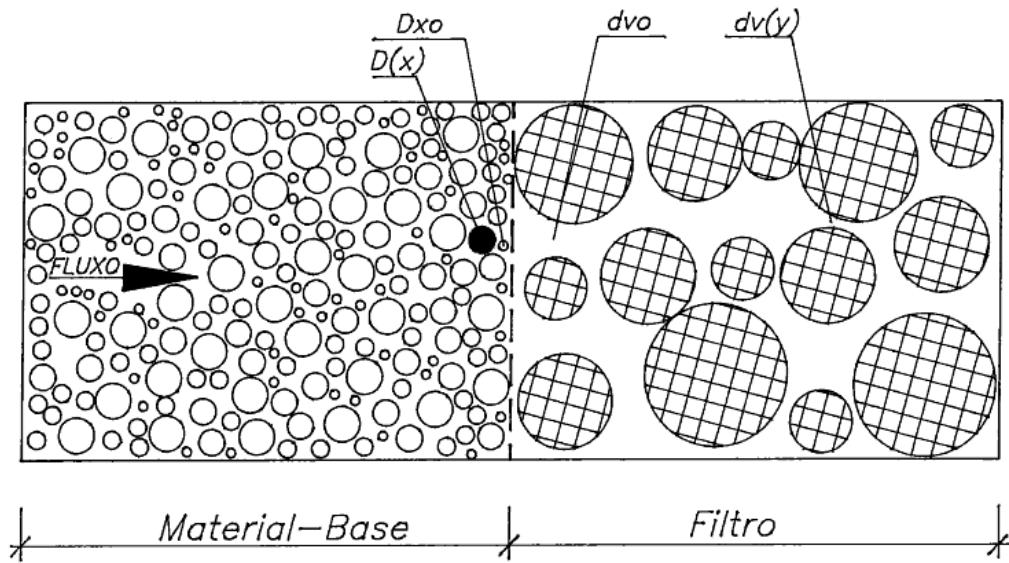
Como pode ser notado pela Figura 3.9, na condição final de um filtro dimensionado corretamente, o mesmo se encontra estabilizado, ou seja, numa condição na qual sua distribuição de vazios não permite que ocorra carreamentos relevantes de partículas do solo base.

Tal processo conduz à formação de zonas definidas na região de transição entre o solo e o filtro, identificadas como “zona de pré-filtro” e “zona de autofiltragem” (*self-filtration layer*), sendo esta última muitas vezes referida como “zona de autoestabilização”. Geralmente, sob o ponto de vista de projetos, a zona de autofiltragem é definida com largura aproximada correspondente à distância percorrida pela partícula do solo base de diâmetro d_{85} .

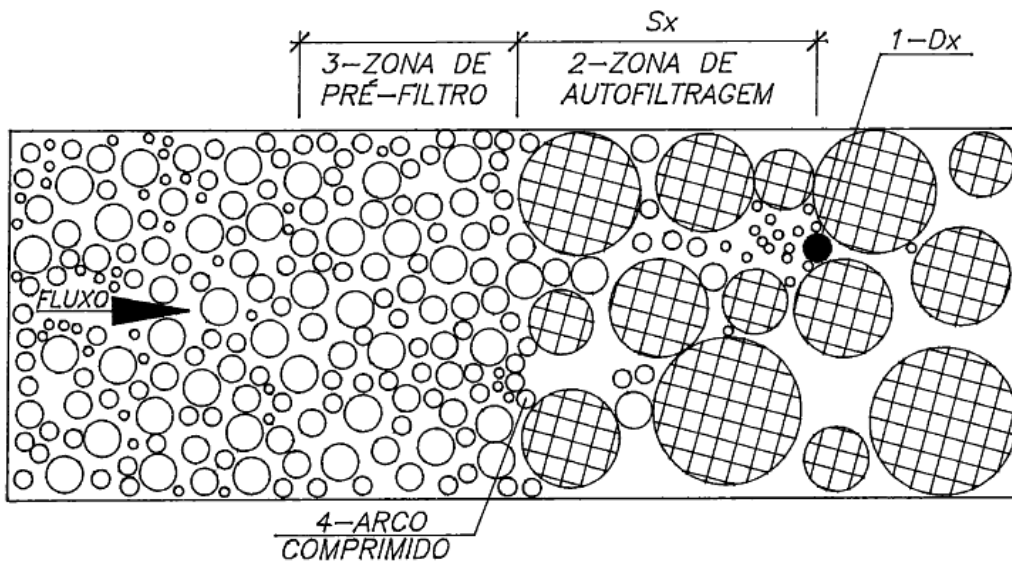
Com relação à zona de pré-filtro, esta caracteriza-se por apresentar granulometria intermediária entre o solo base e o filtro, uma vez que esta região sofreu perda de parte de suas partículas mais finas.

A estabilização de um filtro pode ser facilitada pela formação de arcos comprimidos, constituídos por partículas do solo tensionadas umas sobre as outras, mesmo que estas, individualmente, apresentem dimensões menores que o vazio que seria atravessado. No entanto, ressalta-se que tal configuração pode ser facilmente

desfeita por meio de quaisquer vibrações, conforme constatado em USACE (1941) e Sherard et al. (1984a).



a - Situação Inicial



b - Situação Estabilizada

- 1 - Retenção dos grãos maiores que impedem o transporte dos grãos menores
- 2 - Formação da zona de autofiltragem no interior do filtro
- 3 - Formação da zona de pré-filtro no material-base
- 4 - Criação de arcos comprimidos sobre as entradas do filtro

Figura 3.9 – Mecanismos de filtração (Humes, 1995)

Em vista do dinamismo associado ao processo de filtragem, é importante ter em mente a complexidade da interação “solo base x filtro”, lembrando-se que a distribuição dos vazios na zona de autofiltragem se altera constantemente, tornando-se mais fina à medida que as partículas do solo são retidas.

3.7 Estabilidade Interna dos Solos

3.7.1 Introdução

Um aspecto fundamental a ser levado em consideração num processo de filtragem é a susceptibilidade dos materiais envolvidos à instabilidade interna. Neste caso, as partículas menores de um determinado solo ou filtro podem ficar sujeitas a serem transportadas através de uma matriz de grãos de maiores diâmetros do mesmo material.

A instabilidade interna ocorre principalmente em materiais de granulometria descontínua, caracterizados por terem um trecho sub-horizontal na curva granulométrica, e em materiais muito bem graduados que apresentam uma curva granulométrica com concavidade voltada para cima, conforme relatado por Humes (1995) e ilustrado por Foster e Fell (1999) na Figura 3.10.

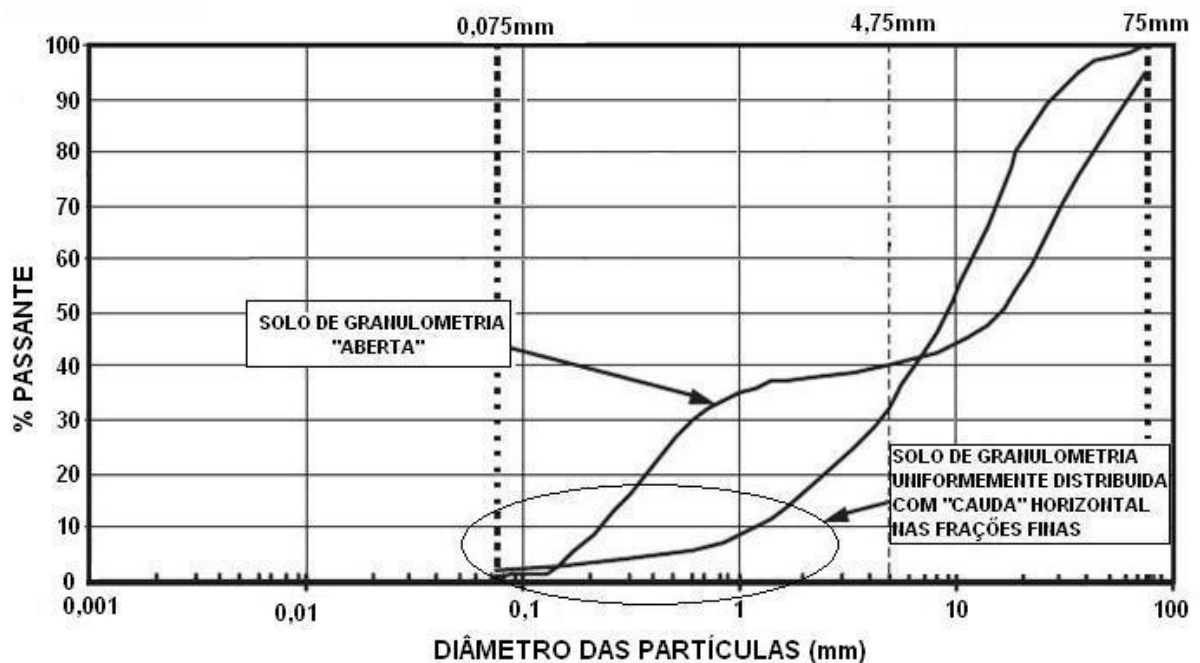


Figura 3.10 – Granulometrias típicas de solos com potencial à instabilidade interna (Foster e Fell, 1999)

Segundo Kenney e Lau (1985), estabilidade interna é a capacidade de um solo de prevenir a migração de suas partículas finas como resultado de uma alteração das condições do meio devido à percolação e/ou à vibração. Quando ocorre a segregação das frações finas e grossas de um material durante a execução da obra tal material se torna mais susceptível à instabilidade Interna (ICOLD, 1994).

Segundo Lubochkov (1969), a preocupação com a instabilização interna dos solos se iniciou em 1898, quando Pavlov propôs o termo “*Mechanical Suffosion*” para descrever a erosão das partículas de determinado solo. Após alguns estudos sobre o tema, Istomina (1957) foi a primeira a propor um critério de estabilidade dos solos com base em seus coeficientes de uniformidade, C_u .

Em obras de aterros de barragens, nas quais são utilizados solos internamente instáveis, os estudos de estabilidade interna devem subsidiar a definição sobre qual fração deste solo base deverá ser considerado para o dimensionamento do filtro da barragem.

Uma vez que a instabilidade interna de um material pode acarretar a erosão interna de suas partículas e, progressivamente, do maciço, a formação de um processo de *piping* torna-se possível, comprometendo a segurança da estrutura.

Cabe ressaltar que um determinado material pode também ser instável em decorrência de sua composição mineralógica, podendo aspectos que independem da granulometria exercer influência nesta condição, como pode ocorrer em casos de materiais dispersivos.

3.7.2 Critérios para avaliação da susceptibilidade à instabilidade interna

Neste item são apresentados dois critérios usualmente aplicados para a avaliação da estabilidade interna dos solos.

Tais critérios foram estabelecidos por De Mello (1975)/ Sherard (1979) e Kenney e Lau (1985, 1986) e os mesmos podem ser utilizados em conjunto. Conforme relatado por Fell et al. (2005), Schuler e Brauns (1993) recomenda que estes métodos sejam aplicados de acordo com os seguintes critérios:

- Método de De Mello (1975)/ Sherard (1979): solos com granulometria aberta ou descontínua;

- Método de Kenney e Lau (1985, 1986): solos com granulometria contínua nas frações mais grosseiras com porção bem graduada nas frações mais finas (“cauda de finos”), ou seja, com concavidade para cima, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Conforme destacado por Humes (1995), o critério proposto por Kenney e Lau (1985, 1986) foi desenvolvido com base em experimentos realizados especificamente sobre materiais granulares com coeficientes de uniformidade $C_u < 12$. Assim, tal restrição deve ser considerada, podendo eventualmente representar uma limitação do critério.

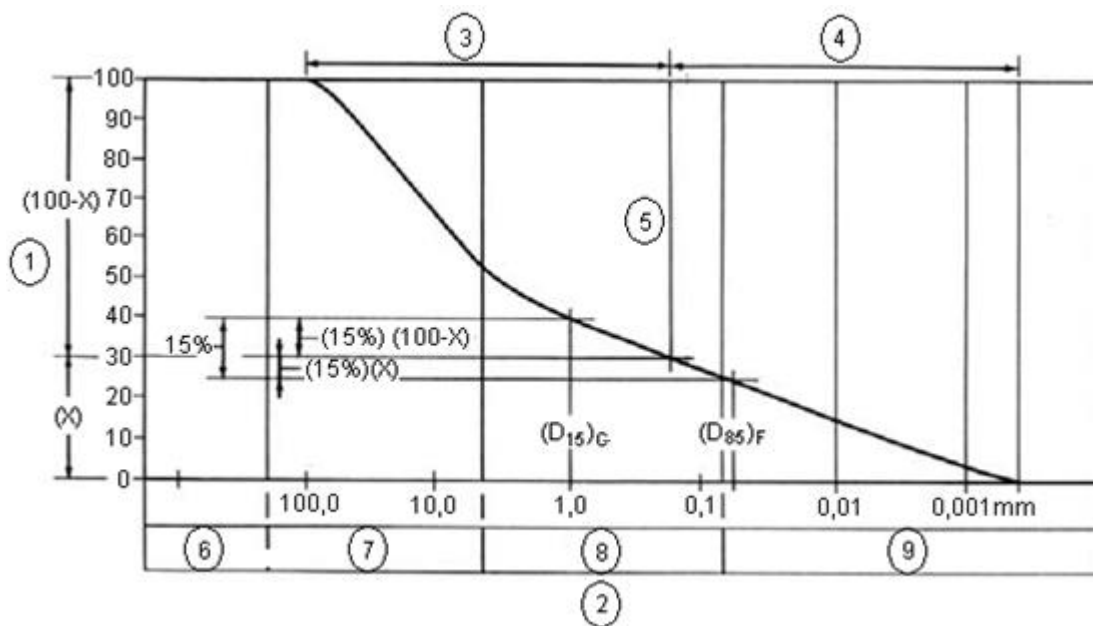
Humes (1995) sugere, ainda, que a metodologia de análise do carregamento pode ser uma boa ferramenta para avaliar a susceptibilidade à instabilidade interna.

3.7.2.1 Critério de De Mello (1975)/ Sherard (1979)

O critério aqui identificado como Critério de De Mello (1975)/ Sherard (1979) consiste em um critério inicialmente proposto por De Mello (1975) e posteriormente adaptado por Sherard (1979).

Trata-se de um procedimento simples e tem base no critério de Terzaghi (1926). Segundo De Mello (1975), para que um material seja estável internamente, o diâmetro D_{15g} de sua fração mais grossa deve ser, no máximo, quatro a cinco vezes maior que o d_{85f} da fração fina do mesmo solo. Para tal verificação, faz-se necessária a divisão da curva granulométrica do material em duas, a partir de um ponto de descontinuidade arbitrário, conforme ilustrado pela Figura 3.11.

Sherard (1979) propõe que, ao invés de se estabelecer um ponto de descontinuidade arbitrário da curva granulométrica do material, sejam avaliadas diferentes combinações de pares do tipo “ D_{15g}/d_{85f} ”. Desta forma, para curvas granulométricas nas quais a descontinuidade não é tão acentuada ou claramente definida, a avaliação de mais de um ponto de descontinuidade seria mais adequada. Sherard considera o material como estável internamente se todas as razões “ D_{15g}/d_{85f} ” calculadas apresentarem valores menores que quatro.



- | | |
|--|---------------------------------|
| (1) Porcentagem que passa (em massa) - % | (6) Seixos |
| (2) Diâmetros, d (mm) | (7) Pedregulho |
| (3) Fração grossa | (8) Areia |
| (4) Fração fina | (9) Dimensões de Silte e Argila |
| (5) Ponto arbitrário de separação | |

Figura 3.11 – Ilustração esquemática do critério proposto por De Mello (1975) (adaptado de ICOLD, 1994)

3.7.2.2 Critério de Kenney e Lau (1985, 1986)

Kenney e Lau (1984) verificaram que entre os três fatores que podem causar a instabilização interna de um solo – granulometria, índice de densidade (ou densidade relativa) e condições hidráulicas – a granulometria é predominante.

Ao analisar este aspecto separadamente, os autores verificaram que a forma da curva é o principal fator capaz de influenciar na estabilidade interna de um material, ao invés dos diâmetros das partículas, por exemplo.

O método proposto por Kenney e Lau (1985, 1986) tem base em experimentos realizados com permeâmetros com cargas constantes, nos quais foram induzidas vibrações e percolações, em gradientes específicos, em amostras de 16 solos granulares bem graduados. As granulometrias foram medidas antes e depois dos ensaios, de modo a possibilitar a verificação sobre a estabilidade interna do material ensaiado.

Em resumo, o procedimento proposto por Kenney e Lau (1985, 1986) consiste no cálculo de uma razão H/F estabelecida a partir de pontos estabelecidos na curva granulométrica do material avaliado. Os pares de valores H/F definem a curva de forma do material, sendo que o mesmo é considerado internamente estável caso apresente valores $H/F \geq 1$, sendo que $F \leq 20\%$ e $F \leq 30\%$ para solos com fração grossa bem graduada (com $C_u > 3$) e solos com fração grossa uniforme (com $C_u < 3$), respectivamente. Em outras palavras, a curva de forma, no intervalo $0\% < F < 20\%$ ou $0\% < F < 30\%$, deve estar situada abaixo da curva $H/F=1$ para que o material seja considerado estável internamente. Segundo Kenney e Lau (1985), tal limite foi inicialmente definido como $H / F = 1,3$ com base no trabalho de Lubochkov (1969), porém posteriormente (Kenney e Lau, 1986) foi verificado ser tal condição conservadora.

A Figura 3.12 ilustra de forma esquemática e resumida o método em questão. As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam graficamente os métodos para obtenção da curva de forma (Kenney e Lau, 1985) e para avaliação da estabilidade interna de solos – Kenney e Lau (1985, 1986).

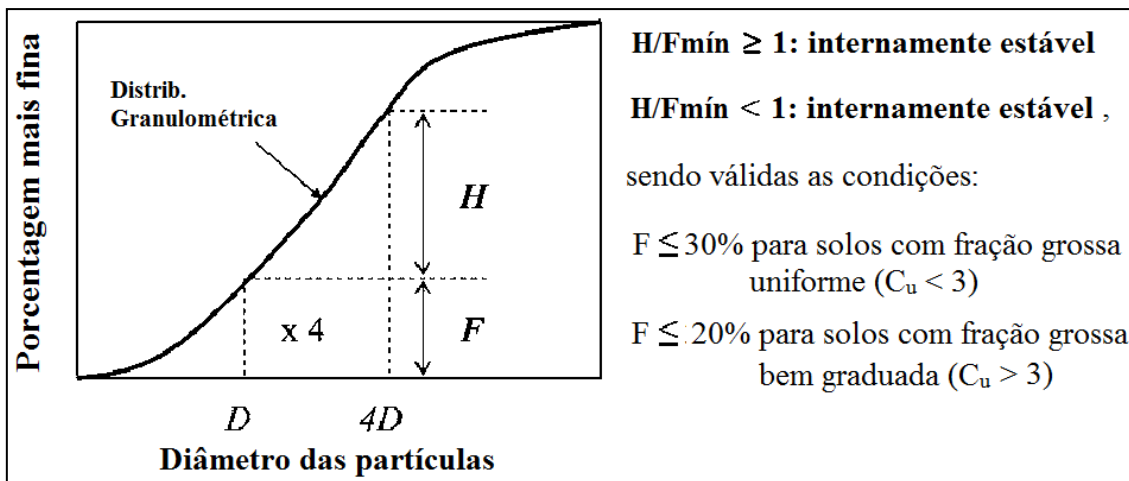


Figura 3.12 – Representação gráfica resumida do critério proposto por Kenney e Lau (1985, 1986) para a avaliação da estabilidade interna (adaptado de Indraratna e Raut, 2006)

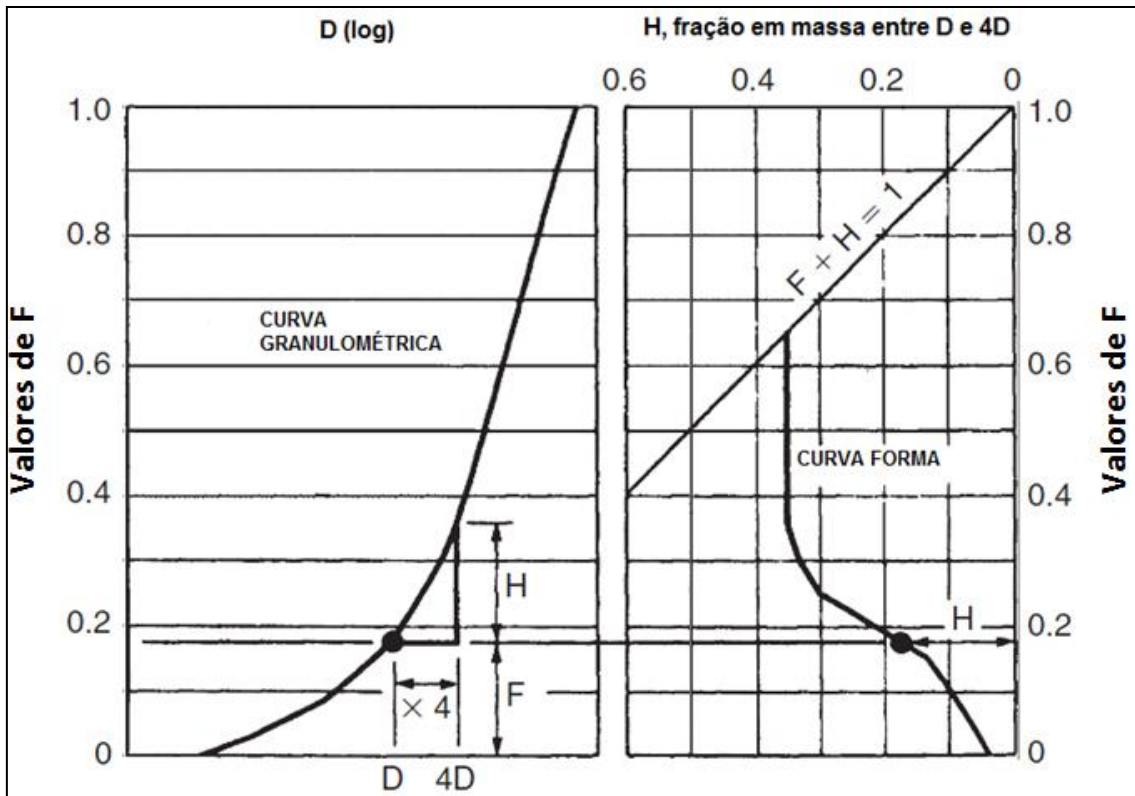


Figura 3.13 – Representação gráfica do método para determinação da curva de forma
Adaptado de Kenney e Lau (1985)

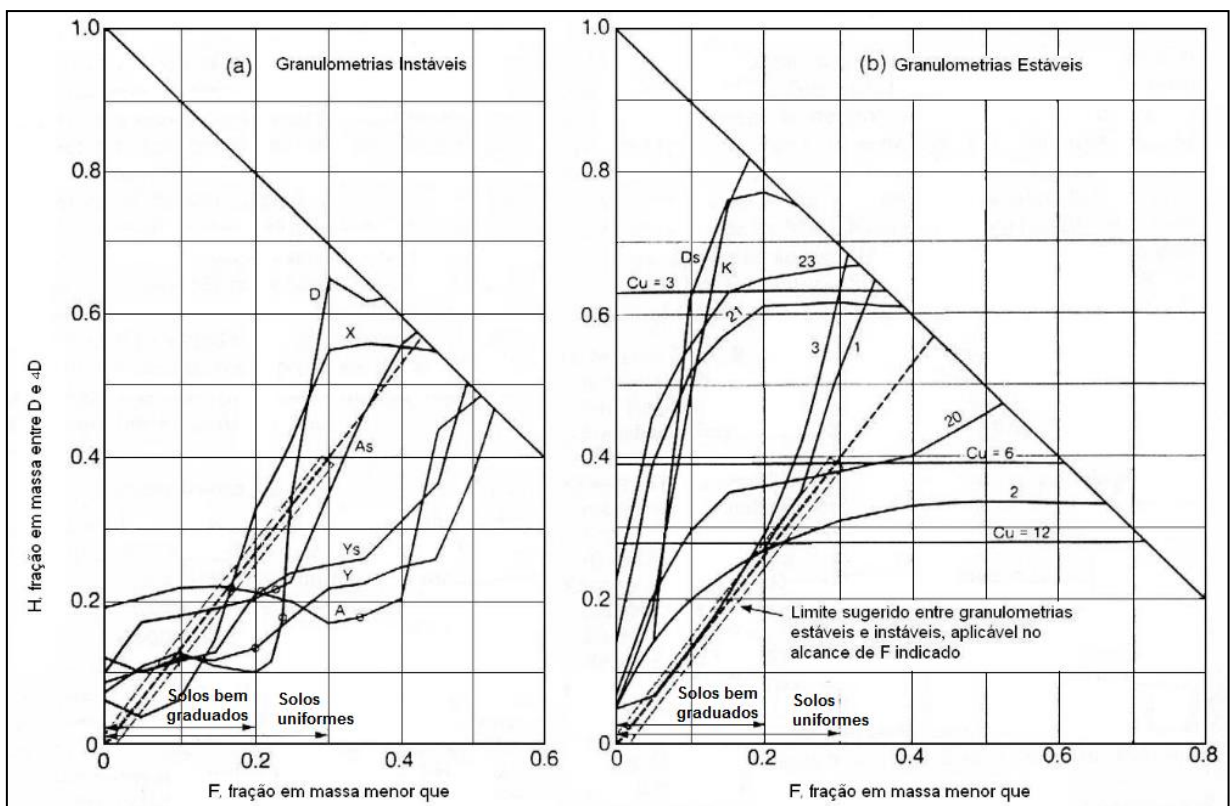


Figura 3.14 – Representação gráfica do critério para a avaliação da estabilidade interna
Adaptado de Kenney e Lau (1985, 1986)

Faz-se importante destacar as ressalvas feitas pelos autores na conclusão do trabalho em questão (Kenney e Lau, 1985, 1986):

- O método mais seguro para se determinar a estabilidade ou não de um material é a realização de ensaios de percolação para as condições a serem praticadas durante a vida útil da estrutura a ser dimensionada;
- Ensaios que combinam altas velocidades de percolação e vibração representam condições mais severas do que as encontradas na prática, porém tais condições se justificam pela pequena duração dos ensaios em comparação à vida útil das estruturas contruídas em campo.

3.8 Critérios de Filtros

3.8.1 Introdução e Histórico

Estudos acerca do dimensionamento de filtros vem sendo realizados desde o início do século XX, tendo tal disciplina o engenheiro geotécnico Karl Von Terzaghi como precursor.

O “Critério clássico de Terzaghi”, como é conhecido, foi proposto por Terzaghi (1926) e foi o primeiro critério largamente adotado em projetos de filtros, tendo sido utilizado como base para inúmeros estudos posteriores.

Em projetos de barragens, os filtros devem ser dimensionados para atender aos seguintes critérios básicos:

- Critério de retenção: as dimensões dos vazios existentes entre os grãos do filtro devem ser suficientemente pequenas de forma a possibilitar a retenção de partículas do material protegido. Inicialmente, tal premissa era referida como “critério de estabilidade” ou “critério de *piping*”;
- Critério de permeabilidade: O filtro deve apresentar condutividade hidráulica suficiente para prover à estrutura condições para drenagem das águas provenientes do interior do maciço.

Caso ocorra carreamento de finos do solo base, esse processo deve se estabilizar de modo que o filtro ainda apresente espessura íntegra (não colmatada) satisfatória para atender às premissas de vazões de água a ser percolada, conforme previsto em projeto.

Destaca-se que nem sempre um filtro tem a finalidade de drenar a água, de modo que, para estes casos, o dimensionamento da espessura do mesmo deve considerar este fato como premissa. Devem-se, portanto, ser distinguidos os conceitos de filtro e dreno. O Capítulo 2 apresenta os conceitos de filtro e dreno, segundo ICOLD (1994).

O critério de Terzaghi é válido para solos não coesivos e uniformes. As equações 3.7 e 3.8 apresentam os critérios de retenção e de permeabilidade, de acordo com o critério de Terzaghi, os quais definem limites e um intervalo de aceitação – baseados na curva granulométrica do solo base – dentro do qual a granulometria dos filtros projetados deve estar compreendida.

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \quad (\text{critério de retenção}) \quad (3.7)$$

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \quad (\text{critério de permeabilidade}) \quad (3.8)$$

onde D_{15} é o diâmetro das partículas do filtro correspondente a 15% passantes, e o d_{15} e o d_{85} são os diâmetros das partículas do solo base correspondentes a 15% e 85% passantes.

A maioria dos critérios de filtro existentes propõe a determinação de limites. Como constatado por estudos posteriores (Sherard et al. 1984a; Bertram, 1940), filtros podem ser eficazes mesmo apresentando razões de retenção maiores que os valores propostos por Terzaghi, especialmente para solos uniformes.

Desenvolvido com base em experimentos, o critério é considerado simples e eficaz, embora seja considerado conservador por alguns autores, como constatado por Sherard et al. (1984a) e Raut e Indraratna (2008) – item 3.9. Segundo Sherard et al. (1984a), no entanto, o fator de segurança de aproximadamente 2 implícito no critério de Terzaghi não repercute em grandes aumentos de custos nas obras.

Sherard et al. (1984a) ressaltam, portanto, a conveniência de se adotar o critério de Terzaghi. De forma similar, Honjo e Veneziano (1989), que realizaram uma série de análises estatísticas sobre resultados de experimentos anteriores, relataram que a razão de retenção D_{15}/d_{85} , estabelecida por Terzaghi, é o parâmetro mais adequado para dimensionamento de filtros para solos sem coesão

A Tabela 3.5 apresenta um resumo com a descrição de alguns dos critérios estabelecidos em estudos realizados desde Terzaghi (1926), com destaque para a razão de retenção (critério de filtragem).

Tabela 3.5 – Resumo com descrição de alguns dos critérios de filtros estabelecidos desde os estudos conduzidos por Terzaghi na década de 1920

Referência	Coeficiente de Uniformidade		Razões estabelecidas				Observações/ Comentários	
	Material de Base	Material de Filtro	Critério de Filtragem	D_{15}/d_{15}	D_{15}/d_{50}	D_{50}/d_{50}		
Terzaghi (1926)	-	-	< 4	> 4	-	-	Para solos não coesivos/ uniformes	
Bertram (1940)	1,2	1,2	< 6	< 9	-	-	Para solos não coesivos/ uniformes Gradiente hidráulico: 8 a 20	
USACE (1941)	Uniforme	2,3 a 8	< 5	-	-	-	Gradiente hidráulico: 2	
USACE (1953)	1,2 a 6,1	2 a 23	< 5	< 20	< 25	-	Gradiente hidráulico: 1 a 26	
USBR (1955)	1,4 a 7,0	1,2 a 1,4	-	-	-	5 a 10	Filtros Uniformes	Outros requisitos: (1) $D_{100} < 75$ mm
	7 a 25	5 a 30	-	12 a 40	-	12 a 58	Filtros Graduados	(2) Curvas granulométricas do solo e do filtro devem ter formas similares
	-	-	-	6 a 18	-	9 a 30	Materiais britados	(3) Partículas do solo mais finas que 4,76 mm apenas (i.e., reclassificá-la, caso tal condição seja atendida)
Sherard et al (1984a) ⁽¹⁾	-	-	< 5	-	-	-	Curvas granulométricas do filtro e do solo não precisam ter formas similares	
Kenney et al (1985)/ Kenney e Lau (1985)	< 6		-	-	< 5	-	Ainda: $D_5/d_{50} < 4$	
Honjo e Veneziano (1989)	-	-	-	-	-	-	Critério de projeto proposto: $D_{15}/d_{85} \leq 5 - 0,5 D_{95}/d_{75}$ (para $D_{95}/d_{75} \leq 7$)	

⁽¹⁾O critério de Sherard (1984a) foi complementado por Sherard (1984b) e Sherard e Dunnigan (1985); consolidados em USDA SCS (1986) e revisado em NRCS (1994), em consonância com ICOLD (1994)

3.8.2 Dimensionamento granulométrico de filtros granulares

Este item apresenta procedimento resumido para dimensionamento granulométrico de filtros, conforme proposto pelo USDA SCS (1986), e revisado em NRCS (1994), em consonância com ICOLD (1994), o qual é reconhecido como um critério usual da boa prática da engenharia de projetos de filtros em barragens.

Tais critérios têm base nos trabalhos conduzidos por James Sherard, em Sherard et al. (1984a; 1984b), e foram estabelecidos após extensivos estudos e experimentos realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, em Lincoln, Nebraska, por membros do SCS (*Soil Conservation Service*), entre 1980 e 1985. A versão apresentada por NRCS (1994) contempla revisões efetuadas desde então.

1) Plotar curvas granulométricas do material base

Devem ser plotadas quantidades suficientes de curvas granulométricas do solo base de tal forma que as mesmas possam ser representativas do material e permitir a avaliação correta de quais premissas adotar para o dimensionamento.

Para atendimento aos critérios de proteção do filtro, o mesmo deve ser dimensionado para a curva granulométrica do solo base que apresentar o menor valor de d_{15} .

Para atendimento aos critérios de drenagem, o sistema deve ser dimensionado para a curva granulométrica do solo base que apresentar o maior valor de d_{15} .

2) Proceder para o passo (4), caso o solo base não contenha partículas com dimensões maiores que 4,75 mm (peneira 4, conforme padrões ASTM)

3) Reclassificar as curvas granulométricas para materiais que contenham partículas maiores que 4,75 mm

- Obter o fator de correção da curva granulométrica dividindo 100 pela porcentagem passante correspondente à dimensão 4,75 mm.
- Multiplicar as porcentagens passantes correspondentes às dimensões menores que 4,75 mm pelo fator de correção determinado.

- Plotar as porcentagens corrigidas para obter a nova curva granulométrica do solo base, ou a curva reclassificada.
- Para a etapa seguinte (4), considerar a curva reclassificada para determinação da porcentagem passante correspondente à dimensão 0,075 mm.

4) Classificar o solo base

Para dimensionamento do filtro, o solo a ser protegido deve ser enquadrado em uma das categorias conforme apresentado na Tabela 3.6, com base em sua curva granulométrica reclassificada, obtida em (3), caso tal reclassificação tenha sido aplicável.

Tabela 3.6 – Critérios para determinação da categoria do solo base

Categoria do solo base	% mais fina que a abertura da peneira 200 (0,075 mm) - após reclassificação quando aplicável	Classificação granulométrica do solo base
1	> 85	Silte fino e argila
2	40 - 85	Areias, siltes, argilas e areias siltosas e argilosas
3	15 - 39	Areias siltosas e argilosas e pedregulhos
4	< 15	Areias e pedregulhos

5) Determinar o D_{15} máximo admissível

Determinar o D_{15} máximo admissível do filtro em projeto para atendimento aos pre-requisitos de filtração, de acordo com a Tabela 3.7 (definir Ponto 1).

Tabela 3.7 – Determinação do D_{15} máximo (critério de filtração ou retenção)

Categoria do solo base	D_{15} Máximo
1	$\leq 9 \times d_{85}$, mas não menor que 0,2 mm
2	$\leq 0,7$ mm
3	$\leq \left(\frac{40 - A}{40 - 15} \right) [(4 \times d_{85}) - 0,7 \text{ mm}] + 0,7$ mm A = % passantes na #200 após reclassificação (Se $4 \times d_{85}$ for inferior a 0,7 mm, considerar 0,7mm)
4	$\leq 4 \times d_{85}$ do solo base após reclassificação

6) Determinar o D_{15} mínimo admissível

Determinar o D_{15} mínimo admissível de acordo com a Tabela 3.8 (caso a permeabilidade do sistema seja premissa para o dimensionamento) – definir Ponto 2.

Tabela 3.8 – Determinação do D_{15} mínimo (critério de permeabilidade)

Categoria do solo base	D_{15} Mínimo
Todas as categorias	4 x d_{15} do solo base antes da reclassificação, mas não inferior a 0,1mm

Destaca-se que, para os casos nos quais um dreno – associado a um filtro – tem por premissa a finalidade de conduzir um valor determinado de vazão, este deve ter sua espessura dimensionada para este fim.

7) Ajustar os diâmetros D_{15} máximo e mínimo determinados em (5) e (6)

A faixa determinada nos passos (5) e (6) deve ser ajustada de modo que a razão entre os diâmetros D_{15} máximo e mínimo seja igual ou menor que 5 ($D_{15máx}/D_{15mín} \leq 5$) – revisar Pontos 1 e 2.

Caso tal condição não seja atendida inicialmente, os diâmetros D_{15} determinados devem ser corrigidos de forma a atendê-la. Em função da finalidade principal do sistema projetado – filtro ou dreno – o limite inferior ou superior pré-determinado deverá ser corrigido.

Tal ajuste é recomendado de forma a evitar a utilização de filtros de granulometria “aberta”. Materiais com este tipo de granulometria são geralmente reconhecidos apenas pelo formato de sua curva granulométrica. No entanto, para fins de procedimentos de projeto, um controle sistemático é necessário.

Para a escolha do D_{15} final, deve-se também considerar a disponibilidade e características dos materiais naturais do local da obra ou características compatíveis com os materiais comercializados.

8) Ajustar os diâmetros D_{60} máximo e mínimo para obtenção de coeficientes de uniformidade adequados (definir Pontos 3 e 4 – máximo e mínimo D_{60})

Segundo as diretrizes fornecidas em NRCS (1994), ambas as curvas granulométricas limites estabelecidas para o filtro devem apresentar coeficiente de uniformidade $C_u \leq 6$.

Para tanto, sugere-se cumprir os procedimentos seguintes:

- Definir para o máximo D_{10} admissível o valor resultante da divisão do máximo D_{15} por 1,2 (este fator se baseia na hipótese de que a inclinação da linha que conecta D_{15} e D_{10} deve estar em conformidade com um coeficiente de uniformidade próximo de 6);
- Definir para o máximo D_{60} admissível o valor resultante da divisão do máximo D_{10} por 6 (Ponto 3);
- Definir para o mínimo D_{60} admissível o valor resultante da divisão do máximo D_{60} por 5 (Ponto 4);

9) Determinar os diâmetros D_5 mínimo e D_{100} máximo (Pontos 5 e 6)

Determinar o mínimo D_5 e o máximo D_{100} do filtro de acordo com o previsto na Tabela 3.9 (definir Pontos 5 e 6, respectivamente).

Tabela 3.9 – Determinação do mínimo D_5 e do máximo D_{10}

Categoria do solo base	D_{100} Máximo	D_5 Mínimo
Todas as categorias	≤ 75 mm	0,075 mm (peneira 200)

10) Determinar o D_{90} máximo (Ponto 7)

Calcular a relação entre o máximo D_{90} e o mínimo D_{10} visando minimizar a segregação dos materiais do filtro (definir Ponto 7). Para tanto, sugere-se cumprir os procedimentos seguintes:

- Definir para o mínimo D_{10} admissível o valor resultante da divisão do mínimo D_{15} por 1,2;

- Calcular o máximo D_{90} admissível de acordo com o critério apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Critério de segregação

Categoria do solo base	Se D_{10} é igual a (mm):	Então D_{90} máximo é igual a (mm):
Todas categorias	< 0,5	20
	0,5 - 1,0	25
	1,0 - 2,0	30
	2,0 - 5,0	40
	5,0 - 10	50
	> 10	60

Areias de filtros com D_{90} menor que 20 mm geralmente não requerem ajustes especiais relacionados à amplitude da faixa de projeto do filtro. Para materiais mais grosseiros, incluindo zonas de pedregulhos, com a finalidade de drenar e filtrar, a razão D_{90}/D_{10} deve decrescer rapidamente com o aumento dos valores de D_{10} .

11) Conectar os pontos determinados e definir a granulometria de projeto

Enfim, para consolidação dos limites de granulometrias de projeto do filtro, basta unir os pontos definidos ao longo da rotina apresentada neste item (Figura 3.15):

- Conectar os pontos 4, 2 e 5 para definir a fração fina da granulometria de projeto;
- Conectar os pontos 6, 7, 3 e 1 para definir a fração grosseira da granulometria do projeto;
- Completar a curva extrapolando os limites da mesma.

Para fins de especificações técnicas do material requerido para o projeto, recomenda-se selecionar, na etapa de extrapolação das curvas, os diâmetros correspondentes às peneiras apropriadas e as porcentagens correspondentes, tabulando tais valores.

A Figura 3.15 apresenta um exemplo de projeto de filtro realizado de acordo com as etapas descritas neste item com a representação dos Pontos 1 ao 7 estabelecidos.

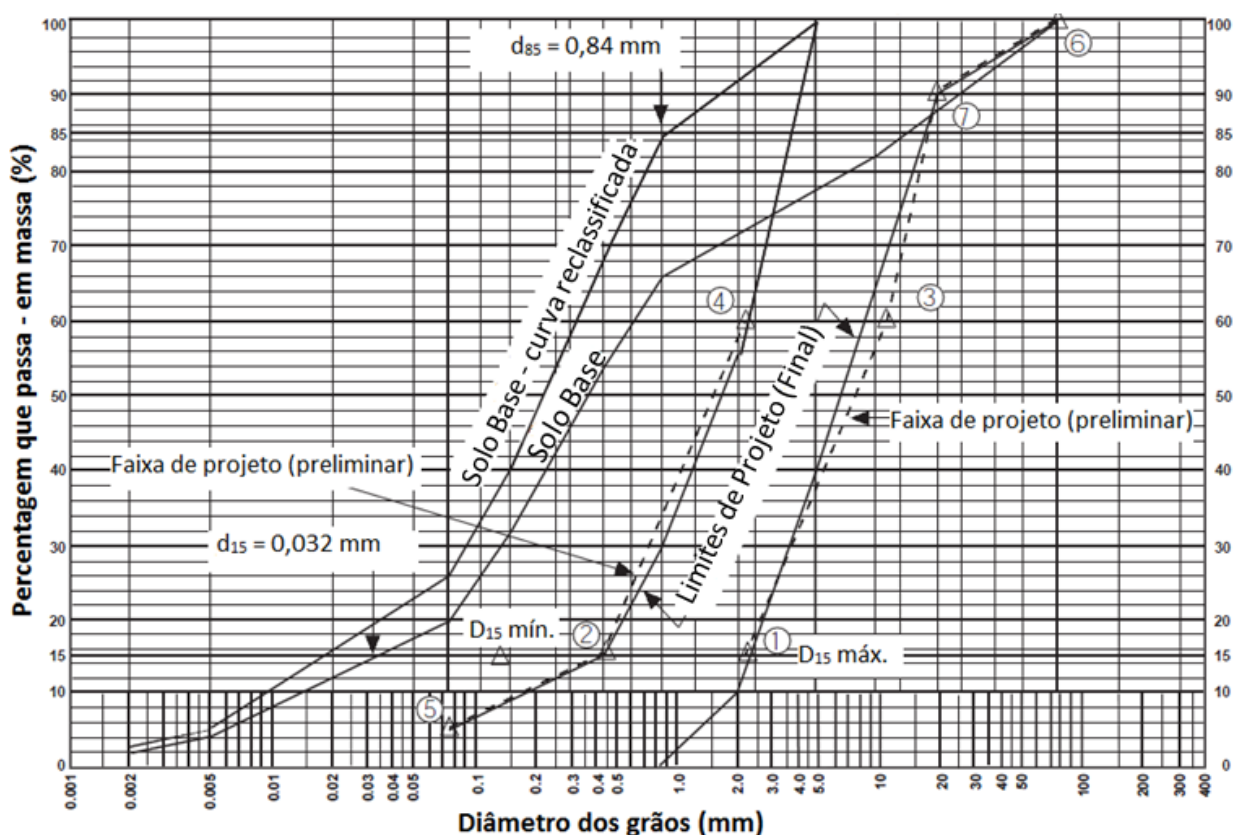


Figura 3.15 – Dimensionamento de filtro realizado para material base areno siltoso com presença de pedregulhos (adaptado de NRCS, 1994)

12) Filtros para tubos coletores

Para o dimensionamento de filtros granulares para utilização de forma associada a tubos coletores perfurados, o NRCS (1994) faz as recomendações apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Critério para filtros utilizados para revestir tubos coletores perfurados

Critério para filtros utilizados nas adjacências de tubos coletores perfurados	
Drenos para os quais não é prevista a atuação de gradientes invertidos ⁽¹⁾	O filtro deve ter D_{85} maior ou igual ao diâmetro do furo do tubo
Drenos para os quais é prevista a atuação de gradientes invertidos ⁽¹⁾	O filtro deve ter D_{15} maior ou igual ao diâmetro do furo do tubo

⁽¹⁾ Gradientes invertidos ou reversos: considerados para os casos nos quais o fluxo se estabelece no sentido "interior do tubo - exterior ao tubo"

Nota: ICOLD (1994) recomenda, para filtros granulares com $Cu \leq 5$, os critérios relacionados a seguir:

- D_{85} / Abertura máxima do tubo > 2 (USBR, 1987);
- D_{85} / Diâmetro do furo > 1 ;
- D_{85} / Largura da ranhura $> 1,2$ (USACE, 1986);
- Para drenos nos quais é prevista a atuação de gradientes invertidos, o filtro deve ser suficientemente grosso, com D_{15} maior ou igual ao diâmetro do furo do tubo.

3.8.3 Considerações adicionais de projeto

Os tópicos a seguir apresentam algumas considerações adicionais a respeito do projeto de filtros.

- Os critérios apresentados por meio das etapas de dimensionamento relacionadas fornecem intervalos de granulometrias possíveis para os filtros para as diferentes necessidades, de forma que o filtro ideal geralmente é o que apresenta, dentro dos intervalos obtidos, a granulometria mais bem graduada. No entanto, em alguns casos, uma granulometria mais pobre, ou mais uniforme, pode ser a ideal em casos em que não se dispõe de grande variedade de material no local da obra (NRCS, 1994).
- As curvas granulométricas mais fina e mais grossa dos filtros podem ser mais inclinadas, desde que $2 \leq Cu < 6$. Nota-se que os critérios relacionados ao coeficiente de uniformidade se aplicam apenas aos limites estabelecidos. Eventualmente, é possível que um filtro seja considerado seguro mesmo que este apresente coeficiente de uniformidade maior que 6.

As etapas de dimensionamento apresentadas visam impedir a definição de filtros com granulometria aberta, o que é a principal razão pela qual o critério de uniformidade do filtro existe. Tal critério ($2 \leq Cu < 6$) não precisa ser rigorosamente obedecido, devendo o intervalo de granulometrias ser atendido e a forma da curva granulométrica do filtro não caracterizar um material de granulometria “aberta” (NRCS, 1994).

- Com relação à largura de filtros, geralmente tal parâmetro é governado por aspectos construtivos, e não por resultados de dimensionamentos hidráulicos ou com base na capacidade de retenção das partículas do solo base, uma vez que estes estudos indicam espessuras muito inferiores às dos equipamentos utilizados

na execução das obras. Assim, as larguras de filtros em barragens geralmente excedem 500 mm (ICOLD, 1994).

- Quando à variação da permeabilidade dos filtros, Cedergren (1977) constatou que até mesmo pequenas quantidades de silte e argila podem conduzir a reduções consideráveis na permeabilidade de areias, conforme descrito em ICOLD (1994).
- Além da presença dos finos, a mineralogia das argilas exerce papel importante na permeabilidade de areias finas uniformes (NRCS, 1994).
- Como ressaltado por ICOLD (1994), em casos onde houver dúvidas, tanto em virtude das características dos materiais ou por demais razões, ensaios específicos são recomendados para se conhecer de forma fidedigna o comportamento de determinado sistema de filtro/ dreno frente à condição à qual o mesmo estará submetido.

3.9 Teoria de Curvas de Vazios

3.9.1 Introdução

Os solos são compostos por partículas de variadas dimensões e a disposição dessas partículas pode variar em função da compactação em que se encontra o mesmo – estados fofo e denso. Invariavelmente, pode-se dizer que os vazios formados entre as maiores partículas são preenchidos pelas partículas menores e assim sucessivamente.

Os critérios de projeto de filtros usualmente praticados na engenharia são baseados em relações entre um ou mais diâmetros característicos dos solos e dos filtros, visando-se obter filtros eficientes sob o ponto de vista dos diversos aspectos, conforme relatado no item 3.8.

Tais metodologias de dimensionamento têm base empírica e são provenientes de estudos desenvolvidos por meio da execução de repetidos experimentos sobre materiais granulares e solos-base, de modo a permitir se estabelecer intervalos de granulometrias ideais para filtros destes materiais. Tais modelos de dimensionamento de filtros são incapazes de prever as variações de comportamento, eficiência, e características dos materiais ao longo da vida do filtro.

Segundo Silveira (1964), Cedergren (1960) foi o primeiro a encarar o problema dos filtros de proteção sob o ponto de vista de dimensionamento em termos de

espessura, e não apenas das granulometria dos materiais. No entanto, Cedergren (1960) avaliou a questão apenas visando atender às questões hidráulicas relacionadas à percolação, por meio de análise de redes para filtros inclinados e tapetes horizontais de barragens.

O professor Dr. Araken Silveira, da USP/São Carlos, em sua tese de doutorado (Silveira, 1964), foi o primeiro a propor a análise de filtros de proteção com base na distribuição de vazios (porosimetria) destes, a partir de um modelo geométrico e probabilístico.

Posteriormente, Silveira (1965), Silveira (1966) e Silveira et al. (1975) aprimoraram tal proposta. Além destes, outros trabalhos apresentaram abordagens relevantes sobre o tema em questão, devendo-se destacar os trabalhos de De Mello (1977), Wittman (1979), Musso-Federico (1983 e 1985), Sherard et al. (1984), Kenney et al. (1985), Tsutyia (1987), Honjo e Veneziano (1989), Soria et al. (1993), Silveira (1993), Witt (1993), Humes (1995), Schuler (1996), Giroud (1996), Indraratna e Vafai (1997), Locke et al. (2001), Raut e Indraratna (2004), Indraratna e Raut (2006) e Indraratna et al. (2007).

Em resumo, os autores citados abordaram, sob o ponto de vista da distribuição dos vazios dos filtros, os seguintes aspectos:

- Critérios para determinação da porosimetria de materiais granulares.
- Métodos de avaliação de eficácia.
- Critérios de dimensionamento.
- Comportamento e variação das propriedades em função do tempo.

A Tabela 3.12 mostra como se deu a evolução dos estudos relacionados à distribuição de vazios, apresentando contribuições dos autores desde a década de 1960.

Os itens seguintes apresentam uma revisão bibliográfica sobre o assunto específico que tange à teoria de curvas de vazios e às análises de carreamento. Sendo os estudos conduzidos por Araken Silveira entre 1964 (Silveira, 1964) e 1975 (Silveira et al., 1975) uma abordagem precursora e tida como base dos trabalhos que se sucederam, os relatos publicados por este autor serão apresentados de forma mais detalhada, tanto no que se refere à determinação da porosimetria de materiais granulares (aspectos geométricos), como também sob o foco das análises de carreamento do solo base através dos vazios de filtros (aspectos probabilísticos).

O Capítulo 2 apresenta uma discussão sobre algumas nomenclaturas comumente utilizadas, seja em português ou inglês, nas bibliografias de referência deste trabalho. Os temas discutidos no presente item levam em conta os conceitos apresentados no Capítulo 2, em especial no que se refere aos “vazios”, “poros” e “constrições”, os quais, algumas vezes, têm sido usados indistintamente.

Visando facilitar a menção às curvas de distribuição granulométrica e dos vazios, as mesmas serão aqui identificadas eventualmente pelas siglas DG e DV, respectivamente.

Tabela 3.12 – Alguns trabalhos realizados relativos à teoria da distribuição de vazios – a evolução dos estudos (adaptado de Trani, 2009)

Ano	Autor(es)	Principais contribuições
1907	Fuller e Thompson	Proposição de curva granulométrica e arranjo de partículas no estado mais denso, a partir de avaliações teóricas com base em esferas uniformes
1965	Silveira	Propõe: - Método para determinação da distribuição dos vazios para o estado denso do filtro - Método para análise de carreamento
1966	Silveira	Incorporação da condição de porosimetria para a condição fofo do filtro
1975	Silveira et al	Determinação das dimensões dos vazios formados por filtros no estado fofo com base no critério de áreas equivalentes
1977	De Mello	- Indica restrições dos métodos de Silveira (1964 e 1966), referentes à determinação da granulometria do filtro em termos de massa, para filtros bem graduados - Propõe avaliação da granulometria em termos de números de partículas
1979	Wittmann	Modelo de caminho de fluxo em forma de canais de poros com larguras irregulares
1985	Kenney et al	Modelo de rede de vazios: estimativa do número de confrontos - até a retenção da partícula do solo base no interior do filtro - para vazios aleatórios; modelagem com base na granulometria do filtro em termos de número de partículas
1989	Honjo e Veneziano	Modelo de transporte de partículas com base na conservação de massa nas fases sólida e líquida
1993	Soria et al	Resultados experimentais em concordância com a teoria geométrico-probabilística são apresentados
1993	Silveira	Aprimoramento do modelo proposto em 1975
1993	Witt	Modelo de redes de poros tridimensional: esferas como os poros; e tubos como as constrições
1995	Humes	- Indica restrições da utilização da granulometria em termos de números de partículas apresentada por De Mello (1977) - Propõe avaliação da granulometria em termos das áreas de superfície das partículas ("Metodologia de Silveira-Humes")
1996	Schuler	Modelo de Rede Cúbica de Poros: rede regular de poros interconectados por seis constrições - de modo similar à proposta de Witt (1993)
1996	Giroud	"O arranjo mais denso das partículas pode ser encontrado até mesmo em materiais sem a máxima compactação"
1997	Indraratna e Vafai	Modelo de canais de poros: aprimoramento do modelo de transporte de partículas, mostrando que a menor dimensão do "canal de poros" determina a dimensão das partículas do solo que poderão ser carreadas
2000	Indraratna e Locke	O modelo de Indraratna e Vafai (1997) é aprimorado por meio da incorporação do "Modelo de Rede Cúbica de Poros"
2001	Locke et al	Propõe: - método para avaliar a evolução do processo de carreamento e mudança das propriedades ao longo do tempo; - Formulação para cálculo da distribuição dos vazios para dada densidade relativa
2004	Raut e Indraratna	Modelo da distribuição dos vazios (constrições): avaliações numéricas sobre a eficácia de filtros granulares não uniformes
2006	Indraratna e Raut	Determinação do Dv_{95} : diâmetro dominante dos vazios.
2007	Indraratna et al	Determinação do Dv_{35} : diâmetro controlador dos vazios/ proposta de critério de retenção para filtros

3.9.2 Distribuição de Vazios e Análises de Carreamento

O trabalho desenvolvido por Araken Silveira, em sua tese de doutorado (Silveira, 1964), teve como objetivo principal a proposta de iniciar um estudo sistemático sobre o dimensionamento dos filtros, visando obter não apenas a granulometria mais adequada, mas procurando também estabelecer a espessura necessária dos filtros em função da distribuição dos vazios e do carreamento das partículas, assunto que até então não contava com nenhum procedimento ou base teórica aprofundada.

Em resumo, a análise de Silveira (1964) buscou simular o caminho percorrido por uma determinada partícula do solo-base, de diâmetro equivalente d , através dos vazios formados pelos grãos de um filtro.

Silveira (1964) dividiu seus estudos em duas etapas de análises, quais sejam:

- a) Determinação da distribuição dos vazios (porosimetria).
- b) Análise de carreamento.

Estas análises têm base em aspectos geométricos e probabilísticos, respectivamente, e estão descritas nos itens 2.9.2.1 e 2.9.2.2.

Os itens 2.9.3 e 2.9.4 apresentam propostas mais recentes que complementam as proposições de Silveira (1964) e outros autores, para a determinação da porosimetria de filtros.

3.9.2.1 Determinação da Curva de Distribuição dos Vazios (DV)

Para determinação da porosimetria de materiais granulares, Silveira (1964) admitiu as seguintes hipóteses fundamentais:

- a) Ser a curva de frequência acumulada da ocorrência dos grãos do filtro associada à sua curva de distribuição granulométrica em massa, conforme determinação por meio de ensaios de peneiramento.
- b) Terem os grãos forma esferoidal.
- c) Serem as posições ocupadas pelos grãos independentes umas em relação às outras.
- d) Estar o filtro em seu estado máximo de compactação.

Referente à **hipótese (a)**, Silveira (1964) a considera razoável, podendo a função de distribuição contínua obtida do peneiramento de uma amostra representativa ser discretizada para determinação de diâmetros médios, $d_i, d_j, d_k, \dots, d_n$, aos quais correspondem porcentagens acumuladas $F_i, F_j, F_k, \dots, F_n$, as quais estão associadas a probabilidades de não excedência $P_i, P_j, P_k, \dots, P_n$ ($P_n = P(d \leq d_n)$). Esta hipótese, confere, portanto, a cada diâmetro dos grãos, uma probabilidade de ocorrer um diâmetro menor ou igual a um determinado valor de referência.

A Figura 3.16 apresenta um exemplo de curva granulométrica original, obtida por meio de ensaios (curva contínua) e a curva discretizada (curva descontínua), para obtenção dos diâmetros médios.

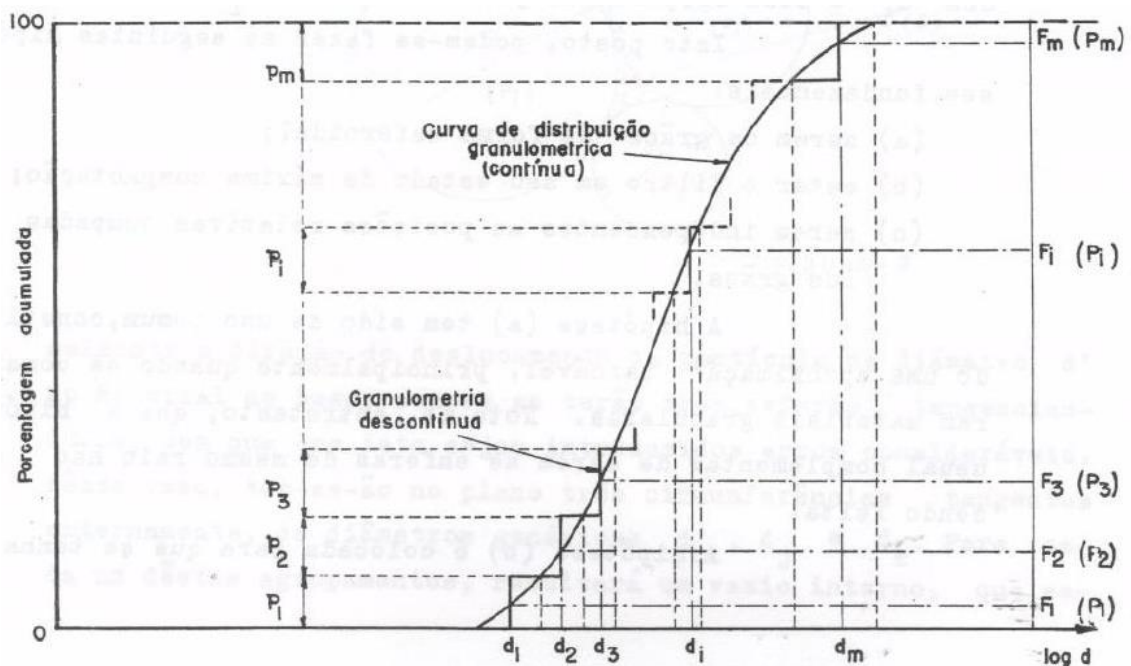


Figura 3.16 – Representação das curvas granulométricas contínua e descontínua (Silveira, 1964)

Conforme proposto por Humes (1995) e apresentado no item 3.9.3 desta dissertação, a determinação da porosimetria dos materiais é mais eficaz quando efetuada a partir da granulometria obtida em termos de áreas superficiais das partículas, e não em termos de massa. Tal abordagem representa grande vantagem especialmente quando aplicada a materiais bem graduados.

Quanto à **hipótese (b)**, tal aproximação é razoável e comumente praticada na geotecnia, inclusive nas determinações granulométricas convencionais.

Com relação à **hipótese (c)**, a mesma está associada a uma mistura e homogeneização bem feita do material, sendo portanto desconsiderada a hipótese de segregação deste. Neste caso, a posição das partículas de diferentes diâmetros é considerada aleatória no interior do filtro.

A **hipótese (d)** foi proposta por Silveira (1964) para que se pudesse ter uma imagem bem definida dos agrupamentos dos grãos, de modo que os mesmos sempre fossem tangentes entre si e associados à formação de um “vazio” central (Figura 3.17).

Silveira (1966) verificou, por meio de ensaios de laboratório, que os resultados das análises teóricas propostas por Silveira (1964) apresentavam boa concordância com os resultados práticos, exceto para o trecho superior das curvas granulométricas do filtro. Isto é, a teoria não levava em consideração possíveis vazios maiores que os maiores encontrados para o estado de máxima compactação.

Em vista disso, Silveira (1966) apresentou uma variação destes estudos, tendo considerado dessa vez a hipótese de mínima compactação do material, de modo a prover a formação de um vazio tangenciado por quatro grãos, e não por três, como proposto para o estado mais denso.

Cumprе ressaltar que tal estado de compactação é raramente atingido na prática, de modo que é recomendável que se adote estados de compacidades intermediárias. A Figura 3.17 apresenta as configurações adotadas por Silveira (1964) e Silveira (1966).

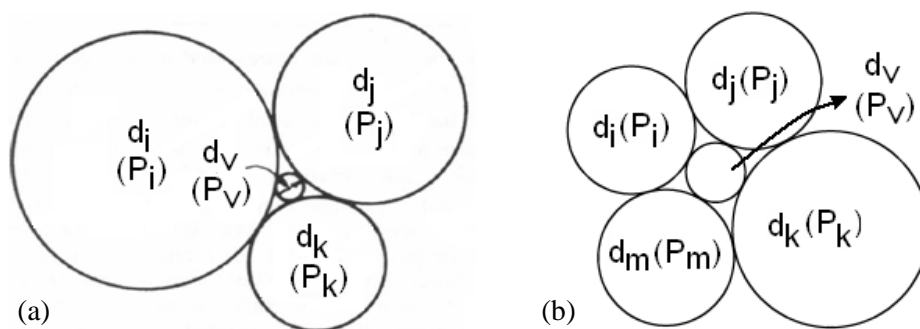


Figura 3.17 – “Esquemas de vazios” (constricções) de filtros para os estados (a) mais denso e (b) menos denso adotados por Silveira (1964, 1966)

Além de Silveira (1966), Silveira et al. (1975) apresentaram proposição alternativa, tendo assumido, para o estado fofo do filtro, que o vazio formado pela combinação de quatro grãos do filtro pode ser associado a um diâmetro equivalente, o

qual possui a mesma área do vazio formado (Figura 3.18) – o Capítulo 2 apresenta uma discussão a respeito dos significados dos termos “vazios”, “constrições” e “poros”, entre outros.

De forma similar à apresentada por Silveira (1964), o referido vazio estaria associado à probabilidade de ocorrência das quatro partículas, P1, P2, P3 e P4, de forma simultânea.

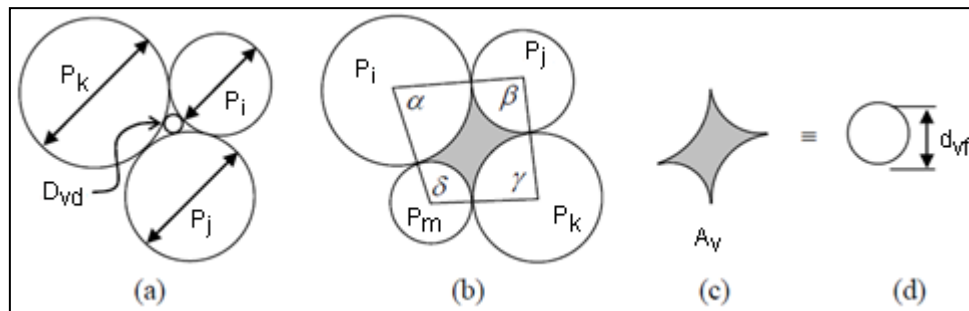


Figura 3.18 – Arranjos de partículas de um filtro (a) no estado mais denso e (b) no estado mais fofo; (c) a área formada pelo plano que corta o centro de quatro partículas (estado fofo), A_v , e (d) o diâmetro equivalente do vazio correspondente à área A_v (adaptado de Silveira et al., 1975)

Conforme apresentado no item 3.9.4 desta dissertação, recentemente foram desenvolvidos estudos que levam em consideração o índice de densidade dos filtros para a determinação da distribuição dos vazios (Locke et al., 2001). Tal abordagem é interessante, visto que geralmente os filtros se encontram em estados intermediários de compactação, de acordo com as especificações técnicas e métodos construtivos de cada obra. A metodologia para incorporação deste aspecto será aplicada ao estudo de caso apresentado no presente trabalho.

Dando-se sequência à proposta de Silveira (1964) – estado mais denso – cuja teoria pode ser aplicada a filtros de diferentes estados de compactação, pode-se resumir que o diâmetro de determinado vazio, d_v , será função apenas dos três diâmetros genéricos deste filtro, d_i , d_j e d_k .

Desta forma, considerando-se a presença de m diâmetros diferentes para os grãos de determinado filtro, existirão, para agrupamentos de três grãos, N arranjos, conforme Equação 3.9.

$$N = C_{m,3} = \frac{m(m+1)(m+2)}{3!} = \frac{1}{6}m(m+1)(m+2) \quad (3.9)$$

Uma vez que na época dos estudos de Silveira (1964) não se dispunha de ferramentas computacionais para a realização de cálculos extensos e complexos, o autor efetuou estudos comparativos e concluiu que, para **m** igual a 5, **N** é igual a 35, e a precisão do método é adequada e não implica em trabalhos excessivos. Assim, os trabalhos foram estabelecidos com a determinação de 5 diâmetros representativos para cada análise.

Cada vazio pode ser formado pela associação de grãos de três diâmetros, de forma aleatória. Ou seja, tendo três diâmetros iguais; dois diâmetros iguais e um diferente; ou tendo três diâmetros distintos. As probabilidades de ocorrência dos três tipos de agrupamentos possíveis são as seguintes:

$$P_{(i,i,i)} = 1 \times p_i^3 \quad (3.10)$$

$$P_{(i,i,j)} = 3 \times p_i^2 \times p_j \quad (3.11)$$

$$P_{(i,j,k)} = 6 \times p_i \times p_j \times p_k \quad (3.12)$$

Para determinação dos diâmetros dos vazios para os 35 possíveis agrupamentos, Silveira (1964) lançou mão da resolução gráfica do problema, fixando uma relação entre os cinco diâmetros de grãos envolvidos nas análises. Tal solução, por razões de simples semelhança, é mantida em qualquer escala, desde que sejam mantidas as relações entre os diâmetros.

Silveira (1964) propôs três diferentes relações, sempre em relação ao diâmetro d_1 , sendo d_1 o menor dos cinco diâmetros (Tabela 3.13).

Tabela 3.13 – Relações entre os diâmetros dos grãos para os agrupamentos considerados por Silveira (1964)

Relações d_n/d_1 ($d_1/d_1:d_2/d_1:d_3/d_1:d_4/d_1:d_5/d_1$)
1:2:4:8:16
1:2:4:6:8
1:2:3:4:5

Em função das relações apresentadas na Tabela 3.13, Silveira (1964) determinou graficamente as relações entre os diâmetros dos vazios e o menor diâmetro do filtro, d_v/d_1 . A Tabela 3.14 apresenta os valores destas relações para os diferentes tipos de agrupamentos propostos.

Uma vez determinados os diâmetros dos vazios e de posse das equações para determinação das probabilidades de ocorrência dos agrupamentos correspondentes, pode-se definir a curva de distribuição dos vazios com os diversos pares (d_v , ΣP). Eventualmente, visando ter maior controle sobre as variações possíveis das porosimetrias, pode-se cumprir o procedimento relatado por Silveira (1964) para diferentes determinações, ou seja, para diferentes grupos de diâmetros característicos da curva granulométrica, conforme sugerido por este autor que, para maior facilidade nos cálculos, sugeriu a utilização da Tabela 3.15 para realização dos mesmos.

Tabela 3.14 – Valores das relações entre os diâmetros dos vazios e o menor diâmetro do filtro, d_1 (Silveira, 1964)

VALORES d_v/d_1 PARA $m=5$

RELAÇÃO AGRUPAMENTO			1:2:4:8:16	1:2:4:6:8	1:2:3:4:5
d_1	d_2	d_3	0,275	0,275	0,260
d_1	d_2	d_4	0,308	0,300	0,275
d_1	d_2	d_5	0,320	0,308	0,300
d_1	d_3	d_4	0,380	0,365	0,315
d_1	d_3	d_5	0,400	0,380	0,320
d_1	d_4	d_5	0,475	0,420	0,340
d_2	d_3	d_4	0,550	0,530	0,430
d_2	d_3	d_5	0,617	0,550	0,460
d_2	d_4	d_5	0,760	0,630	0,500
d_3	d_4	d_5	1,100	0,860	0,600
d_1	d_1	d_2	0,190	0,190	0,190
d_1	d_1	d_3	0,220	0,220	0,210
d_1	d_1	d_4	0,225	0,222	0,218
d_1	d_1	d_5	0,250	0,225	0,220
d_2	d_2	d_1	0,235	0,235	0,235
d_2	d_2	d_3	0,380	0,380	0,350
d_2	d_2	d_4	0,435	0,420	0,380
d_2	d_2	d_5	0,450	0,435	0,400
d_3	d_3	d_1	0,335	0,335	0,280
d_3	d_3	d_2	0,470	0,470	0,400
d_3	d_3	d_4	0,760	0,700	0,500
d_3	d_3	d_5	0,870	0,760	0,530
d_4	d_4	d_1	0,440	0,400	0,335
d_4	d_4	d_2	0,670	0,560	0,470
d_4	d_4	d_3	0,940	0,800	0,560
d_4	d_4	d_5	1,520	1,000	0,650
d_5	d_5	d_1	0,560	0,440	0,360
d_5	d_5	d_2	0,880	0,670	0,540
d_5	d_5	d_3	1,340	0,940	0,640
d_5	d_5	d_4	1,880	1,120	0,700

OBS. para $d_i d_j d_i$, ter-se-a $d_v/d_i = 0,155$

Tabela 3.15 – Tabela sugerida por Silveira (1964) para o cálculo das distribuições de vazios para diferentes determinações (adaptado de Silveira, 1964)

RELAÇÃO : 1 : 2 : 4 : 8 : 16					
1ª DETERMINAÇÃO		2ª DETERMINAÇÃO		3ª DETERMINAÇÃO	
$d_1 =$	$p_1 =$	$d_1 =$	$p_1 =$	$d_1 =$	$p_1 =$
$d_2 =$	$p_2 =$	$d_2 =$	$p_2 =$	$d_2 =$	$p_2 =$
$d_3 =$	$p_3 =$	$d_3 =$	$p_3 =$	$d_3 =$	$p_3 =$
$d_4 =$	$p_4 =$	$d_4 =$	$p_4 =$	$d_4 =$	$p_4 =$
$d_5 =$	$p_5 =$	$d_5 =$	$p_5 =$	$d_5 =$	$p_5 =$

AGRUPAMENTO	1ª DETERMINAÇÃO			2ª DETERMINAÇÃO			3ª DETERMINAÇÃO		
	d_v	\bar{p}	Σd_v	d_v	\bar{p}	Σd_v	d_v	\bar{p}	$\Sigma \bar{p}$
$d_1 d_1 d_1$									
$d_1 d_1 d_2$									
$d_1 d_1 d_3$									
$d_1 d_1 d_4$									
$d_2 d_2 d_1$									
$d_1 d_1 d_5$									
$d_1 d_2 d_3$									
$d_1 d_2 d_4$									
$d_2 d_2 d_2$									
$d_1 d_2 d_5$									
$d_3 d_3 d_1$									
$d_1 d_3 d_4$									
$d_2 d_2 d_3$									
$d_1 d_3 d_5$									
$d_2 d_2 d_4$									
$d_4 d_4 d_1$									
$d_2 d_2 d_5$									
$d_3 d_3 d_2$									
$d_1 d_4 d_5$									
$d_2 d_3 d_4$									
$d_5 d_5 d_1$									
$d_2 d_3 d_5$									
$d_3 d_3 d_3$									
$d_4 d_4 d_2$									
$d_2 d_4 d_5$									
$d_3 d_3 d_4$									
$d_3 d_3 d_5$									
$d_5 d_5 d_2$									
$d_4 d_4 d_3$									
$d_3 d_4 d_5$									
$d_4 d_4 d_4$									
$d_5 d_5 d_3$									
$d_4 d_4 d_5$									
$d_5 d_5 d_4$									
$d_5 d_5 d_5$									

Os diâmetros dos vazios no estado denso (Figura 3.17), conforme proposição de Silveira (1964), também pode ser determinada a partir da Equação 3.13 (Silveira, 1965 *apud* Raut, 2006).

$$\begin{aligned}
[(d_i+d_j+d_k).d_i.d_j.d_k]^{1/2} &= [(d_i+d_j+d_{vd}).d_i.d_j.d_{vd}]^{1/2} \\
&+ [(d_i+d_{vd}+d_k).d_i.d_{vd}.d_k]^{1/2} \\
&+ [(d_{vd}+d_j+d_k).d_{vd}.d_j.d_k]^{1/2}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Alternativamente, Musso e Federico (1983) propuseram a Equação 3.14 para o cálculo da dimensão dos vazios para a mesma condição de densidade e arranjo.

$$(2/d_i)^2 + (2/d_j)^2 + (2/d_k)^2 + (2/d_{vd})^2 = 0,5 [(2/d_i) + (2/d_j) + (2/d_k) + (2/d_{vd})]^2 \tag{3.14}$$

Já para a condição fofo do material, conforme arranjo proposto por Silveira et al. (1975) – Figura 3.18 – a determinação da área, A_v , no plano entre as quatro partículas (ou seja, correspondente ao estado mais fofo do material), pode ser feita a partir da Equação 3.15.

$$\begin{aligned}
A_v = \frac{1}{8} [(d_i+d_j).(d_i+d_m).sen \alpha + (d_j+d_k).(d_j+d_m).sen \gamma - \\
(\alpha.d_i^2 + \beta.d_j^2 + \gamma.d_k^2 + \delta.d_m^2)]
\end{aligned} \tag{3.15}$$

, onde β , γ e δ podem ser relacionados a α por geometria plana. α pode ter valores entre o mínimo e máximo possíveis, e a área máxima, $A_{v,máx}$, estará associada a um valor de α intermediário esses extremos. Para tal hipótese em questão, o diâmetro equivalente do vazio pode ser calculado pela Equação 3.16.

$$d_{vf} = \sqrt{\frac{4A_{v,máx}}{\pi}} \tag{3.16}$$

De forma análoga ao proposto para o estado denso do material, existirão, para agrupamentos de quatro grãos, N arranjos, conforme Equação 3.17.

$$N = C_{m,4} = \frac{1}{24} m(m+1)(m+2)(m+3) \tag{3.17}$$

3.9.2.2 Análise do Carreamento

Uma vez determinada a curva de distribuição dos vazios do filtro, DV , o problema do carreamento se resume à comparação entre os pontos desta curva e os da curva de distribuição granulométrica do material base, DG_{base} (Silveira, 1964).

A distância percorrida por uma partícula de diâmetro d deste material depende dos vazios existentes no interior do filtro, de modo que ela será carreada sempre que encontrar um vazio de dimensão d_v tal que $d < d_v$, ao passo que será retida em casos em que se deparar com um vazio de dimensão tal que $d > d_v$. Tal condição corresponde à etapa de autofiltragem, ou autoestabilização do filtro.

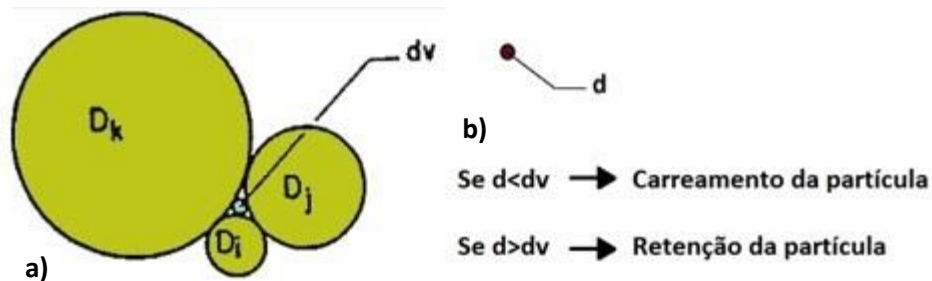


Figura 3.19 – Representação esquemática (a) do vazio de controle, de diâmetro d_v , formado entre os grãos de um filtro em seu estado denso; e (b) da partícula de solo base, de diâmetro d .

Além da avaliação simplificada mencionada, considerando-se as dimensões máximas e mínimas dos vazios, $d_{v_{máx}}$ e $d_{v_{mín}}$, três situações podem ocorrer, quais sejam (Figuras 3.19 e 3.20):

- $d > d_{v_{máx}}$: as partículas do material base não penetram o filtro;
- $d < d_{v_{mín}}$: as partículas do material base atravessam todo o filtro, qualquer que seja sua espessura;
- $d_{v_{mín}} < d < d_{v_{máx}}$: as partículas do material base penetram o filtro, percorrendo determinada distância, até ser retido por um vazio tal que $d_v < d$.

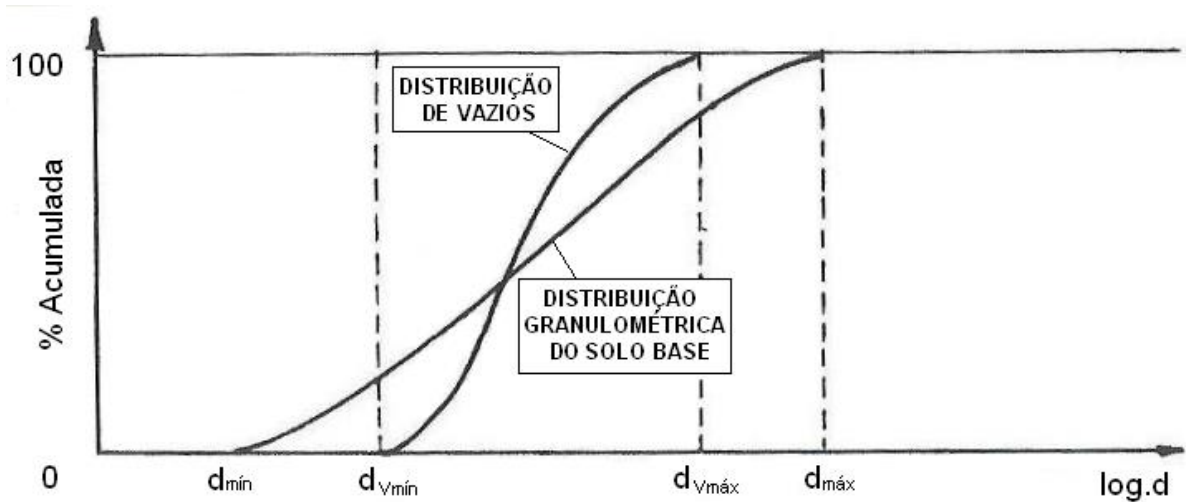


Figura 3.20 – Curva dos vazios de um filtro e curva granulométrica de um material base (adaptado de Silveira, 1964)

A probabilidade, portanto, de uma partícula d , em um confronto ou prova qualquer, n , encontrar um vazio tal que $d < d_v$ está associada à porcentagem de vazios maiores que este d_v , na curva porosimétrica. Assim, caso a probabilidade de $d < d_v$ seja igual a p^n , então a probabilidade dessa partícula ter seu caminho interrompido após n confrontos é de $1-p^n$.

Caso seja estabelecido um nível de confiança P^{**} , isto é, se se quiser ter P^{**} % de confiança de que a partícula não passe após n confrontos, é necessário que n satisfaça a condição $1-p^n = P^{**}$, onde $P^* = P^{**}/100$, obtendo-se a Equação 3.18.

$$n = \frac{\log(1 - P^*)}{\log p} \quad (3.18)$$

Por fim, para determinação do percurso total S da partícula através do filtro, para a confiança estabelecida, Silveira (1964) sugere que cada confronto seja associado a uma distância igual à média geométrica, ou D_{50} , da curva granulométrica do filtro em questão (Equação 3.19).

$$S = \frac{\log(1 - P^*)}{\log p} \cdot s \quad (3.19)$$

, onde s é o diâmetro médio dos grãos do filtro.

De posse dos percursos das partículas de cada diâmetro, para o nível de confiança adotado, é possível determinar a curva de penetração – $\log d \times S$ – de determinado solo em um filtro granular qualquer. A Figura 3.21 apresenta um exemplo de curva de penetração obtida por Silveira (1964).

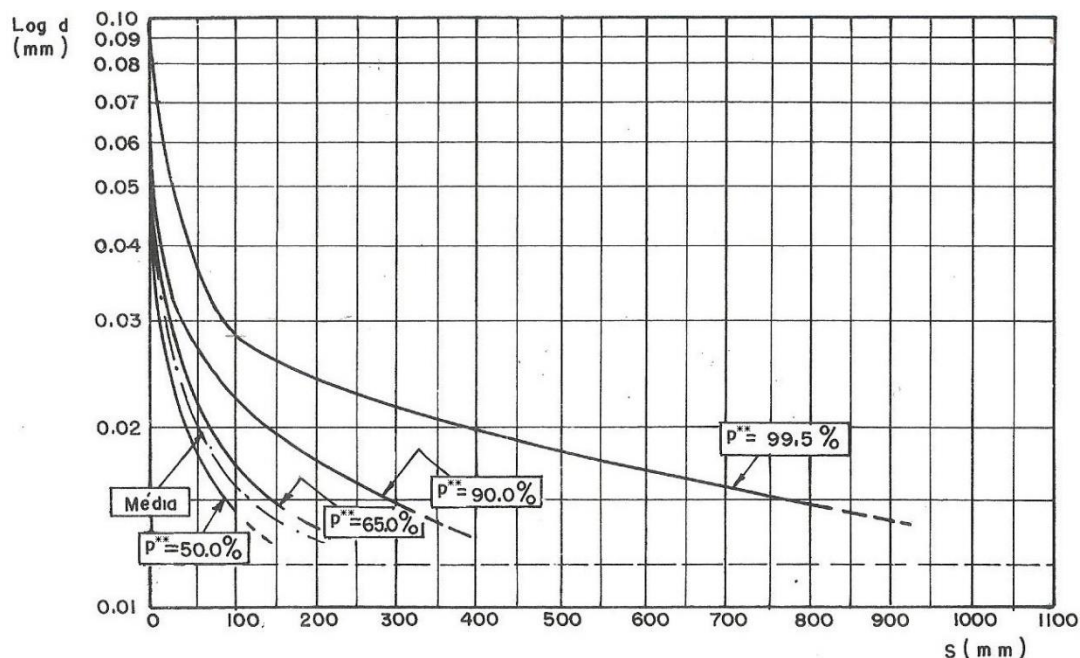


Figura 3.21 – Exemplo de curva de penetração (adaptado de Silveira, 1964)

A análise desses dados permite que se verifique se ocorre a retenção das partículas mais grossas do material base, isto é, pode-se ter uma ideia se é previsto que ocorra o efeito de autofiltragem do material. Permite também verificar a partir de qual distância a contaminação do filtro é praticamente nula. Silveira (1964) sugere, por fim, que o filtro deste solo tenha espessura igual à soma desta distância com a espessura necessária para atendimento aos critérios hidráulicos do filtro/ dreno.

Sobre o trabalho apresentado por Silveira (1964), faz-se relevante efetuar os seguintes comentários:

- À época de seus estudos, Silveira não dispunha de mecanismos computacionais avançados, fato que se configurava como um empecilho à aplicação de sua metodologia. Com o avanço da ciência, estudos posteriores tiveram o auxílio de programas de computador, permitindo a execução dos procedimentos propostos por Silveira (1964) com maior eficácia.
- Silveira (1964) relatou que as análises em termos das distribuições de vazios podem ser aplicadas até mesmo para materiais de base com a parte fina muito fina (estado coloidal).

- Destaca-se que o problema foi conduzido desconsiderando-se os aspectos hidráulicos e de tempo de ocorrência do carreamento, ou taxa de erosão. Assim, a percolação é tratada apenas como um meio natural pelo qual o solo será carreado. Em outras palavras, foi considerado que o processo de carreamento ocorreria ou não apenas em função dos aspectos geométricos e da distribuição dos grãos do solo e dos vazios do filtro, admitindo-se a hipótese de que o gradiente hidráulico teria valores suficientemente altos para que tal processo ocorresse.
- Conforme mencionado anteriormente e discutido em detalhes no item 3.9.3, a determinação da distribuição porosimétrica a partir da granulometria em termos de massa, como proposto por Silveira (1964), está associada a imprecisões consideráveis para solos bem graduados. Conforme será visto mais adiante, a distribuição porosimétrica em termos de áreas de superfície das partículas resulta numa aplicação adequada da teoria da distribuição dos vazios, independentemente da forma da curva granulométrica do filtro avaliado.

3.9.3 Distribuição de Vazios em Termos de Áreas de Superfície

Um cuidado a ser tomado quando da determinação da distribuição de vazios, DV , de filtros está relacionado à forma de obtenção da distribuição granulométrica, DG , dos mesmos. Usualmente, essa distribuição é determinada por meio de ensaios simples de granulometria, com o auxílio de peneiras e balança, as quais permitem separar e medir a massa das diversas frações do material. Como resultado, obtêm-se os diâmetros e as porcentagens que passam das partículas em termos de suas massas. Este resultado está associado a uma análise volumétrica do material.

Estudos realizados por De Mello (1977) mostraram as limitações em se adotar a distribuição granulométrica em termos de massa das partículas, DG_m , para a determinação da DV de filtros bem graduados. Foi mostrado que, à medida que se aumenta o valor de C_u , maior é o número de pequenas partículas que preenchem os vazios existentes entre os grãos maiores, o que resulta em menores dimensões desses vazios.

Para o caso dos materiais bem graduados, caso a DV seja determinada a partir da DG_m , ocorre que as poucas partículas maiores existentes no material são

supervalorizadas pelo modelo, em virtude de suas grandes massas, o que resulta na apresentação de alta frequência de vazios de grandes dimensões. No entanto, ocorre, na prática, para esses poucos grãos de maiores diâmetros, grande número de contatos superficiais com pequenos grãos, o que resulta em muitos vazios de pequenos diâmetros equivalentes. A Figura 3.22 ilustra tal questão.

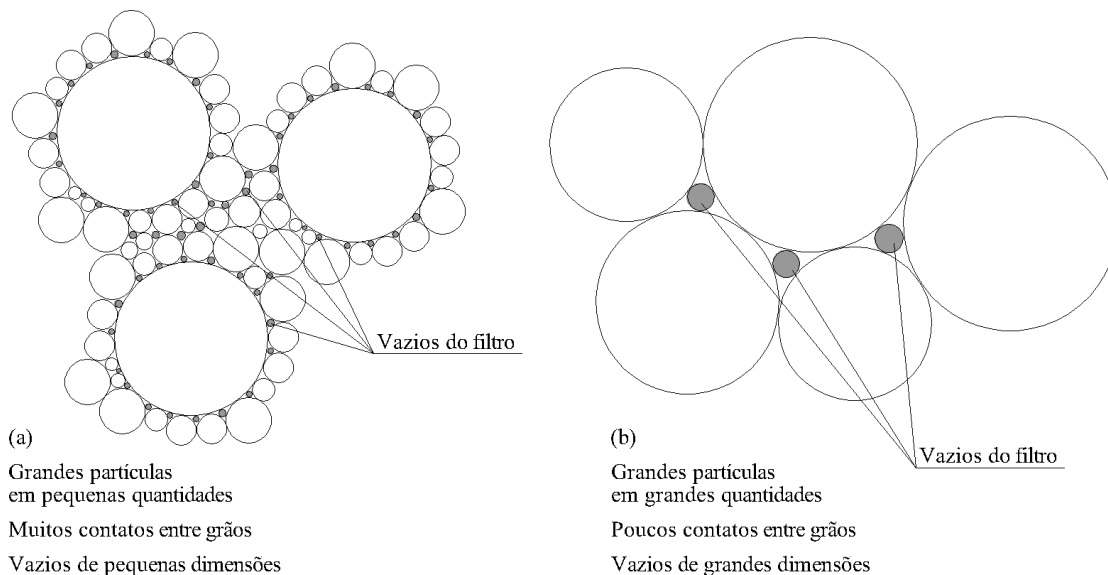


Figura 3.22 – Configuração esquemática dos vazios formados em (a) solos bem graduados e (b) solos pouco graduados

Em vista das inconsistências encontradas para tal consideração, Musso e Federico (1983, 1985), com base nas proposições feitas por De Mello (1977), apresentaram metodologia para cálculo da distribuição granulométrica em termos de número de partículas, DG_n . No entanto, tal consideração não tem fundamento, uma vez que a probabilidade de se encontrar um determinado agrupamento de partículas em um filtro não está associada ao número de partículas.

Conforme apresentado por Humes (1995), a probabilidade de tangência das três partículas deve ser associada à sua distribuição em superfície lateral, e não à sua distribuição em volume.

Em uma linguagem prática, Humes (1995) relata: “Ao invés de pensar no volume total do filtro, imaginemos somente o volume dos seus vazios, ou seja, uma rede de poro-canais. Cada vazio pertencente a um poro-canal é limitado pelas superfícies de três partículas que são tangentes entre si, conseqüentemente a probabilidade de que uma partícula seja fronteira de um vazio é proporcional à sua área lateral, e não ao

seu volume, uma vez que os seus pontos internos não participam na formação dos vazios (partículas sólidas ou ocas produzem o mesmo vazio).”

A conversão da DG_m para a DG_{as} pode ser efetuada multiplicando-se a percentagem de massa passante (DG_m) pelos correspondentes coeficientes P_{Ai} , os quais podem ser determinados pela Equação 3.20 (Humes, 1995).

$$P_{Ai} = \frac{P_{mi}/D_i}{\sum_{j=1}^m P_{mj}/D_j} \quad (3.20)$$

, onde:

- j é o número de diâmetros médios que compõem a DG do filtro;
- P_{mi} é a probabilidade de ocorrência do i -ésimo diâmetro;
- D_i é a i -ésima média dos diâmetros.

A Figura 3.23 apresenta exemplos de curvas granulométricas em termos de massa, número de partículas e área de superfície para um solo uniforme ($C_u=1,2$) e para um solo mais bem graduado ($C_u=4,4$). Observa-se que, para solos uniformes, a DG não varia significativamente em se adotando DG_m , DG_n ou DG_{as} . Por outro lado, nota-se que, para solos bem graduados, a DG_m resulta em uma DV que indica vazios de dimensões maiores que os reais.

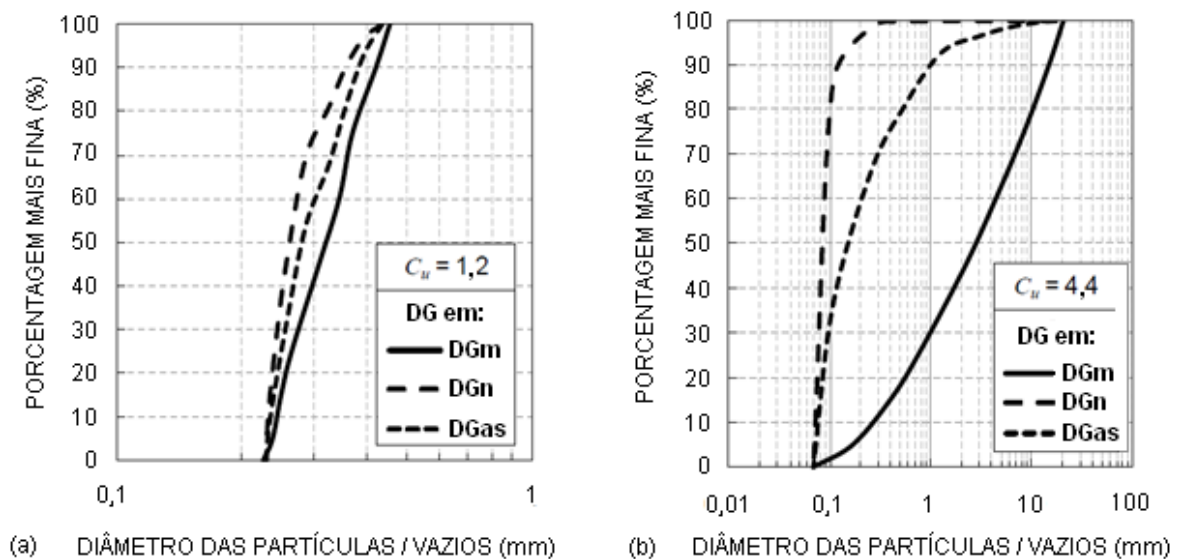


Figura 3.23 – DG_m , DG_n e DG_{as} para (a) solo uniforme, $C_u = 1,2$, e (b) solo mais bem graduado, $C_u = 4,4$ (adaptado de Trani, 2009)

3.9.4 Compactação dos Filtros

Ao se analisar o comportamento de filtros, faz-se relevante a questão relacionada à compactação com a qual os mesmos foram ou deverão ser executados em campo. Por ocasião dos primeiros estudos relacionados à distribuição dos vazios, foram apresentados modelos de cálculos da DV para as condições extremas de compactação possíveis para os filtros: os estados denso e fofo. Sabe-se, no entanto, que na prática da operação dos filtros, é improvável que os mesmos apresentem algum desses estados de distribuição de vazios (DV_f e DV_d).

Conforme relatado no item 3.5 deste trabalho, a compactidade de um material granular pode ser medida pela sua densidade relativa, ou Índice de Densidade, I_D . Em suma, quanto menor for o I_D de um filtro, por exemplo, maiores serão os vazios existentes entre as partículas do mesmo.

Schuler (1996) estudou a DV de um solo para diversos valores de índice de densidade e verificou que as curvas porosimétricas determinadas apresentaram sempre os mesmos formatos, independentemente do I_D do material. Giroud (1996), no entanto, relatou que, para materiais granulares com compactidades médias a altas, em determinados locais sempre ocorrerá uma condição para a qual o solo já apresentará a maior densidade em termos de arranjo de suas partículas, correspondendo aos menores vazios possíveis.

Com base no exposto, Indraratna e Locke (2000) adotaram a hipótese de que os maiores diâmetros da DV de um filtro, tal que $d_{v_d} < d_v < d_{v_f}$, tendem a se expandir de modo linearmente proporcional ao decréscimo da compactidade deste filtro. Os autores admitiram, ainda, que o menor vazio de uma DV_f (estado fofo) tem a mesma dimensão que o menor vazio da DV_d (estado denso), independentemente da densidade do filtro (Figura 3.24).

Tal hipótese permitiu a formulação apresentada pela Equação 3.21 (Locke et al., 2001), que determina uma DV para determinado índice de densidade, I_D , dadas suas distribuições dos vazios para os estados fofo e denso. Tal formulação considera a divisão das DV_f e DV_d em n partes iguais.

$$d_{vi} = D_{vDi} + \frac{i}{n}(1 - I_D)(D_{vfi} - D_{vDi}) \quad (3.21)$$

onde:

- $i = 0, 1, 2, \dots, n$ = números inteiros que representam as n porções da DV_f e da DV_d ;
- d_{vi} é o diâmetro médio do vazio da i -ésima porção da DV ;
- $DV_{máxfi}$ e $DV_{máxdi}$ são os maiores vazios das DV 's nos estados fofo e denso, correspondentes às percentagens de ocorrência $i/n\%$.

Assim, para $i = 0$, o menor vazio d_{v0} é o menor vazio da DV_f ; Se $n = 10$, então $i = 1$ corresponde ao diâmetro médio do vazio Dv_1 , cuja probabilidade de ocorrência é de $1/10$, ou 10% .

A Figura 3.24 mostra exemplos de curvas de distribuição de vazios determinadas para diferentes graus de compactidade.

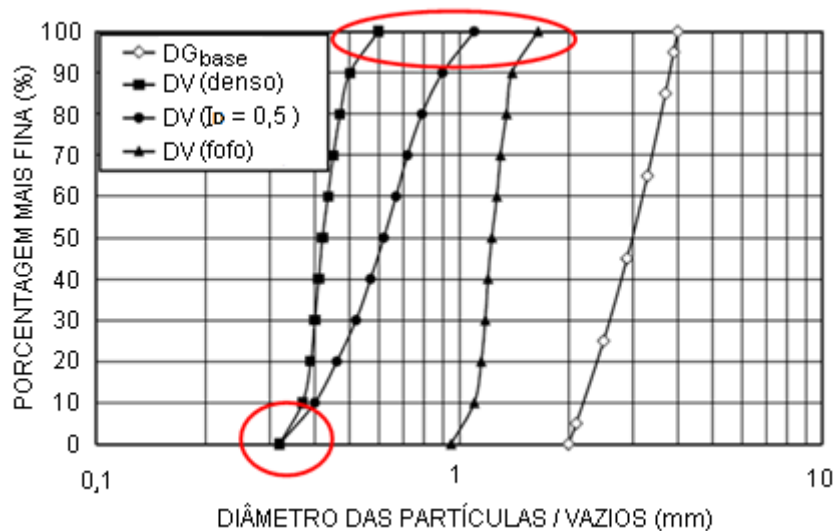


Figura 3.24 – Influência do índice de densidade, I_D , de determinado filtro na sua distribuição de vazios (adaptado de Raut e Indraratna, 2004)

3.9.5 Dimensões de Controle e Critérios de Dimensionamento de Filtros

No que tange à Teoria da Distribuição de Vazios, a revisão bibliográfica deste trabalho sumariou, até o momento, as propostas e trabalhos conduzidos pelo professor Araken Silveira, nas décadas de 60 e 70, bem como algumas contribuições relevantes na prática de tais metodologias, como as efetuadas por De Mello (1977), Musso e Federico (1983 e 1985), Schuler (1996), Humes (1996), Indraratna e Locke (2000) e Locke et al. (2001). Tais publicações constituem a base da metodologia a ser aplicada no estudo de caso deste trabalho.

Visando complementar a revisão bibliográfica desta dissertação, julgou-se relevante enriquecê-la com uma abordagem sobre alguns estudos mais recentemente realizados acerca do assunto discutido neste trabalho.

Neste sentido, destacam-se alguns trabalhos conduzidos por engenheiros da Universidade de Wollongong, em Wollongong, estado da Nova Gales do Sul, Austrália. Para apresentação de tais estudos, o autor desta dissertação julgou conveniente a separação dos mesmos em dois temas: “diâmetros de controle”; e “critérios de dimensionamento e avaliação de filtros”.

3.9.5.1 Diâmetros de controle

Abordagens do processo de filtração sob o ponto de vista da determinação de um diâmetro dominante dos vazios do filtro – “diâmetro de controle” – foram realizadas de forma indireta por Kenney et al. (1985) e Lafleur et al. (1989), em análises sobre a formação de camadas autofiltrantes para solos bem graduados internamente instáveis.

Mais recentemente, Locke et al. (2001) determinaram que a probabilidade de uma partícula do solo base maior que a dimensão dv_{95} – diâmetro do vazio do filtro correspondente à frequência de ocorrência de 95% – não penetrar um único vazio sequer de determinado filtro é de 95%, fato constatado também por Indraratna e Raut (2006) para vários tipos de filtros. Segundo estes autores, portanto, este grupo de partículas do solo não influencia o processo de filtração e pode ser desprezado no dimensionamento dos filtros. Em outras palavras, pode-se dizer que as granulometrias das camadas autoestabilizadoras são formadas pelas partículas do filtro e pelas partículas do solo base menores que dv_{95} , identificado por estes autores como o maior diâmetro dominante dos vazios de um filtro.

Em linha similar de estudos, Locke et al. (2001) determinaram, para um nível de confiança de 95%, que a probabilidade de uma partícula do solo base ser carregada através de um filtro de proteção cresce abruptamente, até o valor de 100%, à medida que suas dimensões tornam-se menores que a dimensão equivalente dos vazios dv_{35} , conforme ilustrado pela Figura 3.25.

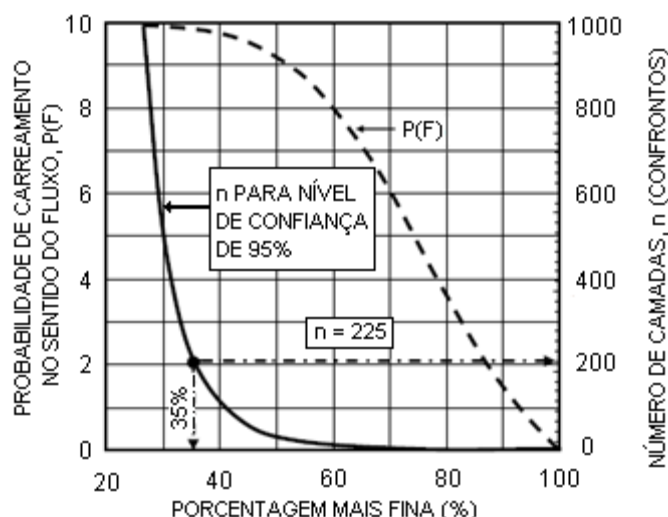


Figura 3.25 – Probabilidade de carreamento das partículas de determinado solo base através das camadas de um filtro granular (adaptado de Indraratna et al., 2007)

Ou seja, segundo relatado por estes autores, é improvável que uma partícula do solo base menor que d_{v35} seja retida por um filtro granular, a menos que este tenha seus vazios reduzidos progressivamente por meio de processo de autoestabilização. Em vista disso, Indraratna et al. (2007) propuseram que o controle dos vazios de um filtro granular pode ser dado pela dimensão de vazio d_{v35} .

Conforme relatado pelos referidos autores, análises realizadas indicaram considerável concordância entre tal proposta e os relatos de outros autores, como Sherard et al. (1984a), Kenney et al. (1985), Witt (1993) e Foster e Fell (2001).

3.9.5.2 Critérios de dimensionamento e avaliação de filtros

Como apresentado no item 3.8, os critérios para dimensionamento de filtros foram abordados, desde os primeiros estudos, sob o ponto de vista das razões de retenção das partículas dos solos e dos filtros.

Ressalta-se, novamente, que os critérios geralmente praticados foram determinados com base em análises de solos e/ou filtros uniformes. Conforme mostrado por Lafleur (1984), a estabilização do processo de filtração ocorre após maiores períodos de operação no caso de solos não uniformes, sendo que a perda de solo é excessiva nestes casos, para sistemas filtro-solo dimensionados pelo critério de Terzaghi.

Uma vez que os vazios de um filtro influenciam diretamente o processo de filtração das partículas do solo, faz-se mais adequada a abordagem deste processo em termos da distribuição destes vazios.

Conforme relatado no item 2.9.5.1, com base nos trabalhos conduzidos por Locke et al. (2001), Indraratna et al. (2007) propuseram que o controle dos vazios de um filtro granular pode ser dado pela dimensão de vazio dv_{35} .

Como também relatado anteriormente, Locke et al. (2001) concluíram que as partículas do solo maiores que dv_{95} não influenciam no processo de filtração e podem ser desprezadas no dimensionamento dos filtros, fato também constatado por Indraratna e Raut (2006) para vários tipos de filtros.

Em vista das dimensões características estabelecidas para os vazios de um filtro e para as partículas de um solo qualquer, e considerando-se que as partículas do solo maiores que dv_{95} não influenciam no processo de filtração, Raut e Indraratna (2008) estabeleceram que, para uma combinação solo-filtro eficaz, dv_{35} deve ser menor que d_{85}^* para assegurar que pelo menos 15% das partículas do solo sejam retidas no início do processo, de modo a permitir a estabilização do filtro (Equação 3.22).

$$\frac{dv_{35}}{d_{85}^*} \leq 1 \quad (3.22)$$

onde d_{85}^* é o diâmetro d_{85} da curva granulométrica do solo ajustada, desconsiderando-se as partículas maiores que dv_{95} .

Destaca-se, a favor do critério acima, o fato de este levar em consideração alguns parâmetros fundamentais no processo de filtração, como os diâmetros das partículas e o coeficiente de uniformidade C_u dos materiais, e a distribuição dos vazios e o índice de densidade do filtro.

Para validação do critério apresentado pela Equação 3.22, Raut e Indraratna (2008) conduziram uma série de ensaios e análises na Universidade de Wollongong, tendo por base dados provenientes de bibliografias, bem como dos estudos realizados pelos próprios autores. O critério proposto foi comparado com critérios usualmente aplicados na prática da engenharia – NRCS (1994) e ICOLD (1994) – e verificados em relação aos resultados dos ensaios realizados, de acordo com a eficácia ou ineficácia de cada sistema solo-filtro. A Tabela 3.16 apresenta um resumo dos resultados dos estudos comparativos realizados por Raut e Indraratna (2008) para validação do critério proposto (Equação 3.22).

Tabela 3.16 – Resumo dos resultados dos estudos comparativos realizados por Raut e Indraratna (2008) para validação do critério proposto

Nº do Ensaio	D ₁₅	d _{v35}	d ₈₅	d _{85R}	d _{5F}	d* ₈₅	C _u (solo)	Percent. mais fina (%)	D ₁₅ máx		RESULTADOS				Referências
									NRCS (1994)	ICOLD (1994)	NRCS (1994)	ICOLD (1994)	Proposta Raut e Indraratna (2008)	Ensaio de Laboratório	
1	0,26	0,03	7,00	0,70	0,28	0,06	8,9	24	2,04	1,12	√	√	√	√	Lafleur (1984)
2	1,00	0,17	7,00	0,70	0,28	0,35	8,9	24	2,04	1,12	√	√	√	√	
3	3,20	0,67	7,00	0,70	0,28	0,54	8,9	24	2,04	1,12	x	x	x	x	
4	7,30	1,59	7,00	0,70	0,28	0,58	8,9	24	2,04	1,12	x	x	x	x	
5	15,00	3,24	7,00	0,70	0,28	0,90	8,9	24	2,04	1,12	x	x	x	x	
6	0,26	0,05	19,00	0,06	0,10	0,07	625,0	70	0,70	0,40	√	√	√	√	Lafleur et al. (1989)
7	1,00	0,14	19,00	0,06	0,10	0,07	625,0	70	0,70	0,40	x	x	x	x	
8	3,20	0,61	19,00	0,06	0,10	0,08	625,0	70	0,70	0,40	x	x	x	x	
9	7,30	1,59	19,00	0,06	0,10	0,18	625,0	70	0,70	0,40	x	x	x	x	
10	15,00	2,74	19,00	0,06	0,10	0,18	625,0	70	0,70	0,40	x	x	x	x	
11	0,26	0,03	7,50	0,85	0,13	0,06	87,0	57	0,70	0,52	√	√	√	√	
12	1,00	0,21	7,50	0,85	0,13	0,28	87,0	57	0,70	0,52	x	x	√	√	
13	3,20	0,68	7,50	0,85	0,13	0,60	87,0	57	0,70	0,52	x	x	x	√	
14	7,30	1,50	7,50	0,85	0,13	0,92	87,0	57	0,70	0,52	x	x	x	x	
15	15,00	2,84	7,50	0,85	0,13	1,90	87,0	57	0,70	0,52	x	x	x	x	
16	0,26	0,03	1,50	0,60	0,09	0,08	39,1	52	0,70	0,36	√	√	√	√	
17	1,00	0,21	1,50	0,60	0,09	0,32	39,1	52	0,70	0,36	x	x	√	√	
18	3,20	0,84	1,50	0,60	0,09	0,42	39,1	52	0,70	0,36	x	x	x	x	
19	7,30	1,71	1,50	0,60	0,09	0,52	39,1	52	0,70	0,36	x	x	x	x	
20	15,00	3,45	1,50	0,60	0,09	0,62	39,1	52	0,70	0,36	x	x	x	x	
21	0,26	0,03	17,00	0,21	0,04	0,07	333,3	68	0,70	0,15	√	x	√	√	
22	1,00	0,17	17,00	0,21	0,04	0,30	333,3	68	0,70	0,15	x	x	√	√	
23	3,20	0,74	17,00	0,21	0,04	0,85	333,3	68	0,70	0,15	x	x	√	√	
24	7,30	1,74	17,00	0,21	0,04	0,85	333,3	68	0,70	0,15	x	x	x	x	
25	15,00	3,07	17,00	0,21	0,04	0,85	333,3	68	0,70	0,15	x	x	x	x	
26	0,26	0,03	11,00	1,80	0,47	0,08	100,0	39	0,96	1,88	√	√	√	√	
27	1,00	0,17	11,00	1,80	0,47	0,28	100,0	39	0,96	1,88	x	√	√	√	
28	3,20	0,68	11,00	1,80	0,47	0,85	100,0	39	0,96	1,88	x	x	√	√	
29	7,30	1,57	11,00	1,80	0,47	1,32	100,0	39	0,96	1,88	x	x	x	√	
30	15,00	3,17	11,00	1,80	0,47	1,90	100,0	39	0,96	1,88	x	x	x	x	
31	0,26	0,03	3,00	0,70	0,12	0,09	15,4	42	0,70	0,48	√	√	√	√	
32	1,00	0,20	3,00	0,70	0,12	0,28	15,4	42	0,70	0,48	x	x	√	√	
33	3,20	0,69	3,00	0,70	0,12	0,45	15,4	42	0,70	0,48	x	x	x	√	
34	7,30	1,79	3,00	0,70	0,12	0,60	15,4	42	0,70	0,48	x	x	x	x	
35	15,00	2,70	3,00	0,70	0,12	0,55	15,4	42	0,70	0,48	x	x	x	x	
36	0,26	0,03	20,00	2,80	1,80	0,07	100,0	23	7,84	7,20	√	√	√	√	
37	1,00	0,23	20,00	2,80	1,80	0,42	100,0	23	7,84	7,20	√	√	√	√	
38	3,20	0,81	20,00	2,80	1,80	0,85	100,0	23	7,84	7,20	√	√	√	√	
39	7,30	1,64	20,00	2,80	1,80	1,32	100,0	23	7,84	7,20	√	x	x	x	
40	15,00	3,31	20,00	2,80	1,80	1,90	100,0	23	7,84	7,20	x	x	x	x	
41	0,26	0,03	6,50	2,00	0,50	0,08	20,0	22	5,96	2,00	√	√	√	√	
42	1,00	0,23	6,50	2,00	0,50	0,60	20,0	22	5,96	2,00	√	√	√	√	
43	3,20	0,68	6,50	2,00	0,50	0,80	20,0	22	5,96	2,00	√	x	√	√	
44	7,30	1,77	6,50	2,00	0,50	1,50	20,0	22	5,96	2,00	x	x	x	√	
45	15,00	3,52	6,50	2,00	0,50	2,40	20,0	22	5,96	2,00	x	x	x	x	
46	0,26	0,04	1,20	0,70	0,21	0,14	8,0	22	2,21	0,84	√	√	√	√	
47	1,00	0,22	1,20	0,70	0,21	0,48	8,0	22	2,21	0,84	√	x	√	√	
48	3,20	0,91	1,20	0,70	0,21	0,80	8,0	22	2,21	0,84	x	x	x	x	
49	7,30	1,74	1,20	0,70	0,21	0,70	8,0	22	2,21	0,84	x	x	x	x	
50	15,00	3,64	1,20	0,70	0,21	0,78	8,0	22	2,21	0,84	x	x	x	x	
51	0,68	0,16	0,04	0,04	0,04	4,00	1,3	100	0,40	0,18	x	x	x	x	Indraratna et al. (1996)
52	0,23	0,05	0,04	0,04	0,04	4,00	1,3	100	0,40	0,18	√	x	x	√	
53	0,12	0,03	0,04	0,04	0,04	4,00	1,3	100	0,40	0,18	√	√	√	√	
54	0,75	0,15	0,42	0,42	0,42	0,32	2,9	0	1,68	1,68	√	√	√	√	Indraratna e Vafai (1997)
55	4,21	0,85	0,42	0,42	0,42	0,42	2,9	0	1,68	1,68	x	x	x	x	
56	5,10	1,07	1,18	1,18	1,18	0,50	11,4	13	4,72	4,72	x	x	x	x	Raut e Indraratna. (2008)
57	5,00	1,26	1,40	1,40	1,40	0,78	9,3	12	5,60	5,60	√	√	x	x	
58	1,40	0,05	1,40	1,40	1,40	0,19	9,3	12	5,60	5,60	√	√	√	√	
59	1,30	0,25	0,40	0,40	0,40	0,40	1,2	0	1,60	1,60	√	√	√	√	
60	2,50	0,45	0,40	0,40	0,40	0,40	1,2	0	1,60	1,60	x	x	x	√	
61	3,60	0,64	0,28	0,28	0,28	0,28	1,2	0	1,12	1,12	x	x	x	x	
62	0,47	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	1,3	0	0,46	0,46	x	x	√	√	

Nota: √ = Eficaz; x = ineficaz.

Tabela 3.16 – Resumo dos resultados dos estudos comparativos realizados por Raut e Indraratna (2008) para validação do critério proposto (continuação)

Nº do Ensaio	D ₁₅	d _{v35}	d ₈₅	d _{85R}	d _{5F}	d* ₈₅	C _u (solo)	Percent. mais fina (%)	D ₁₅ máx		RESULTADOS				Referências
									NRCS (1994)	ICOLD (1994)	NRCS (1994)	ICOLD (1994)	Proposta Raut e Indraratna (2008)	Ensaio de Laboratório	
63	0,58	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	1,3	0	0,46	0,46	x	x	x	√	
64	0,70	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12	1,3	0	0,46	0,46	x	x	x	√	
65	7,30	1,48	1,55	1,55	1,55	1,30	2,6	0	6,20	6,20	x	x	x	x	
66	1,40	0,31	1,55	1,55	1,55	0,67	2,6	0	6,20	6,20	√	√	√	√	
67	7,30	1,48	1,28	1,28	1,28	1,20	5,2	0	5,12	5,12	x	x	x	x	
68	0,78	0,16	1,28	1,28	1,28	0,37	5,2	0	5,12	5,12	√	√	√	√	
69	7,30	1,48	0,75	0,69	0,75	0,65	5,8	15	2,76	3,00	x	x	x	x	
70	1,40	0,31	0,75	0,69	0,75	0,51	5,8	15	2,76	3,00	√	√	√	√	
71	7,30	1,48	1,80	1,50	1,80	1,15	8,8	10	6,00	7,20	x	x	x	x	
72	1,40	0,31	1,80	1,50	1,80	0,50	8,8	10	6,00	7,20	√	√	√	√	
73	5,20	1,07	0,41	0,41	0,41	0,41	21,4	47	0,70	0,40	x	x	x	x	
74	2,50	0,49	0,42	0,41	0,41	0,36	21,4	47	0,70	0,40	x	x	x	x	
75	0,92	0,20	0,41	0,41	0,41	0,25	21,4	47	0,70	0,40	x	x	√	√	
76	0,92	0,19	0,26	0,26	0,26	0,22	33,5	47	0,70	0,40	x	x	√	√	
77	5,10	1,04	0,26	0,26	0,26	0,26	33,5	47	0,70	0,40	x	x	x	x	
78	2,10	0,43	0,26	0,26	0,26	0,26	33,5	47	0,70	0,40	x	x	x	x	
79	1,35	0,28	0,05	0,05	0,05	0,05	20,0	93	0,45	0,20	x	x	x	x	
80	0,75	0,17	0,05	0,05	0,05	0,04	20,0	93	0,45	0,20	x	x	x	x	
81	0,42	0,09	0,05	0,05	0,05	0,04	20,0	93	0,45	0,20	√	x	x	x	
82	0,23	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	20,0	93	0,45	0,20	√	x	x	x	
83	0,13	0,02	0,05	0,05	0,05	0,03	20,0	93	0,45	0,20	√	√	√	√	

Nota: √ = Eficaz; x = ineficaz.

Sobre os resultados obtidos, convém tecer os seguintes comentários, conforme observado pelos autores que conduziram a pesquisa.

- Foram conduzidos 83 ensaios;
- De 44 ensaios que concluíram pela eficácia dos filtros, o critério apresentado em ICOLD (1994) indicou que apenas 23 seriam eficazes, o que demonstra o conservadorismo associado a este critério. Destes mesmos 44, o critério apresentado por NRCS (1994) indicou 27 como eficazes, o que também indica, de forma similar, o conservadorismo deste critério.
- Ressalta-se que o referido conservadorismo não foi observado nos ensaios 39, 57 e 81, os quais indicaram uma conclusão desfavorável à segurança – os motivos de tais desvios são explicados em detalhes por Raut e Indraratna (2008);
- Em três casos (39, 57 e 81) ocorreu a condição na qual os ensaios indicaram a ineficácia dos filtros e os critérios de ICOLD (1994) e NRCS (1994) indicaram a eficácia dos mesmos – nestes casos, o critério proposto por Raut e Indraratna (2008) se mostrou concordante com os resultados dos ensaios;
- O critério proposto proposto por Raut e Indraratna (2008) apenas divergiu em relação aos resultados dos ensaios em casos nos quais indicou a ineficácia ao passo que os ensaios concluíram pela eficácia – fato notado em oito dos ensaios realizados. Ou seja, o critério não se mostrou desfavorável à segurança em nenhum caso avaliado.

Sobre o critério proposto, conclui-se, portanto, pela eficácia do método para diferentes combinações solo-filtro, independentemente de suas características granulométricas. Os autores de tal critério, no entanto, ressaltam que ele deve ser utilizado em conjunto – e não em substituição – com os critérios usualmente aplicados na prática da engenharia de solos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

Para a aplicação prática da teoria da distribuição dos vazios e das análises de carreamento apresentadas no Capítulo 3 desta dissertação, foi escolhido um caso real da engenharia de solos, ao qual tais proposições puderam ser aplicadas.

O caso de estudo apresentado se refere à Barragem de Balderhead, localizada na Inglaterra, na qual foi observada a ocorrência de processo de erosão interna, que culminou na formação de um *sinkhole* e abatimento da crista da barragem. O Capítulo 5 descreve com maiores detalhes a Barragem de Balderhead, bem como o evento de falha constatado.

Para a definição do referido caso de estudo, foram considerados especialmente os seguintes aspectos, os quais são descritos em maiores detalhes no Capítulo 5:

- Relevância do caso;
- Ocorrência de um evento de falha concreto passível de ser estudado;
- Disponibilidade de dados necessários para as análises.

Uma vez atendidas as condições requisitadas pelos aspectos supramencionados, fez-se necessário estabelecer uma metodologia de trabalho de modo a permitir a análise do caso.

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para aplicação do estudo de caso, bem como os materiais e dados utilizados para desenvolvimento das avaliações.

4.2 Metodologia

Neste item é apresentado o procedimento a ser cumprido de modo a permitir a eficácia da análise do problema e o direcionamento às conclusões acerca do caso em estudo.

Para avaliação do caso da Barragem de Balderhead, foram previstas as principais etapas listadas a seguir, as quais estão representadas em formato de fluxograma na Figura 4.1.

- Análise e tratamento dos dados;
- Avaliação da granulometria dos materiais e do projeto do filtro de Balderhead;
- Análise de susceptibilidade à instabilidade interna dos materiais;
- Análises de carreamento;
- Análise crítica dos resultados e conclusões.

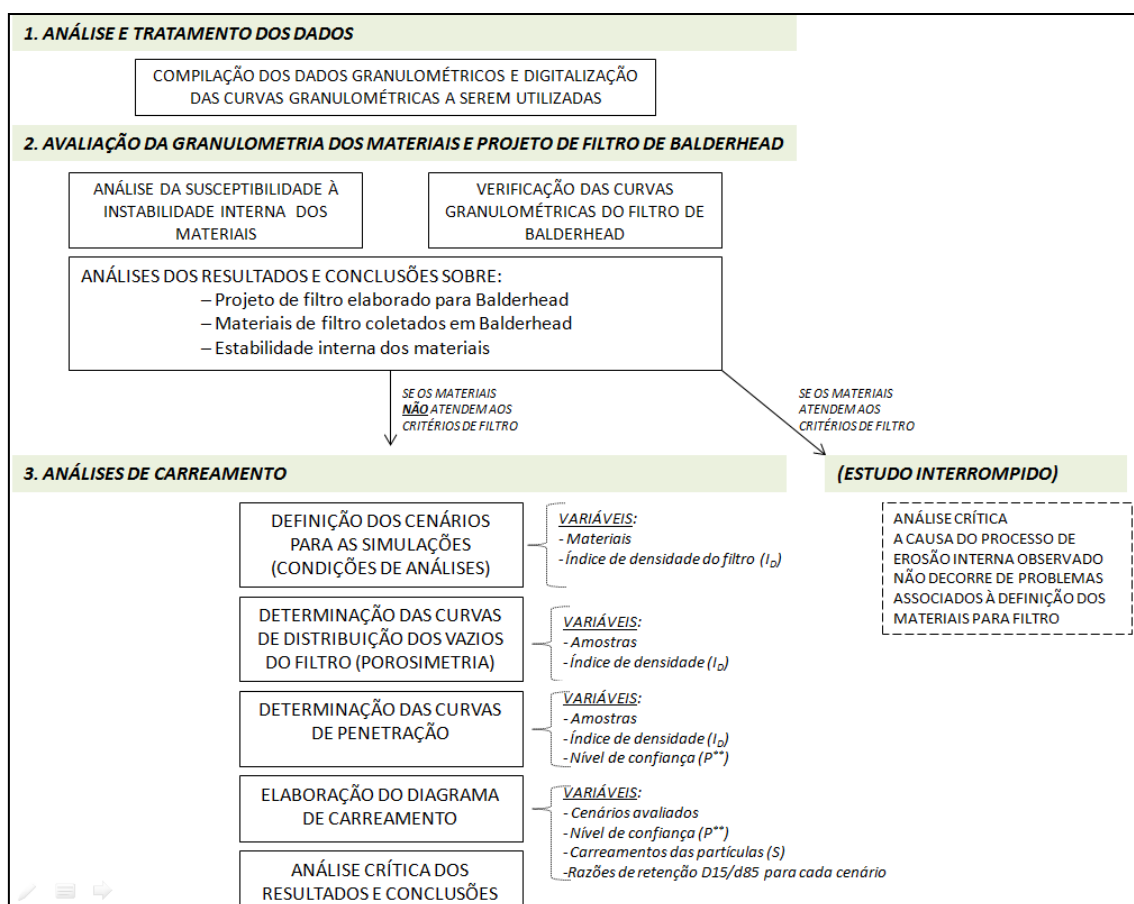


Figura 4.1 – Fluxograma das atividades

Os itens 4.2.1 ao 4.2.4 a seguir descrevem em detalhes as principais etapas do estudo de caso deste trabalho.

4.2.1 Análise e Tratamento dos Dados

Os dados utilizados no estudo de caso deste trabalho consistem basicamente nas informações provenientes dos resultados dos ensaios granulométricos realizados na ocasião do projeto, obra e fase pós-falha da Barragem de Balderhead, as quais foram apresentadas por Vaughan e Soares (1982). A Figura 4.3, no item 4.3, apresenta os dados originais apresentados por esses autores. A Tabela 5.1 e a Figura 5.4, no item 5.2, apresentam o resultado da compilação desses dados em planilha do programa Excel, com os valores em tabela e em formato de gráfico.

Foi parte da etapa de análise e tratamento dos dados uma avaliação das curvas granulométricas disponíveis, de modo a verificar quais materiais (e em que condições) seriam considerados para as análises de carreamento. Tal avaliação prévia contou basicamente com a verificação da uniformidade das curvas granulométricas e da susceptibilidade à instabilidade interna dos materiais.

4.2.2 Verificação do Projeto de Filtro

Na ocasião da elaboração do projeto da Barragem de Balderhead (1959/1960) não se dispunha de um critério reconhecidamente efetivo para o dimensionamento de filtros para materiais argilosos. Assim, para a construção da barragem, foram adotadas diretrizes inadequadas e critérios hoje sabidamente ineficazes para esses materiais base (Vaughan e Soares, 1982).

Em vista do exposto, de forma independente das demais análises realizadas neste trabalho, foi feita uma verificação dos limites granulométricos estabelecidos pelo projeto da Barragem de Balderhead. Esta verificação foi realizada por meio da aplicação de critérios apresentados em USDA SCS (1986) e revisado em NRCS (1994), em consonância com ICOLD (1994), os quais são considerados como critérios usuais da boa prática da engenharia para projetos de filtros em barragens. Tais procedimentos para dimensionamento de filtros estão relatados no item 3.8 desta dissertação.

Cabe ressaltar que, com a finalidade de testar a sensibilidade das análises de carreamento e de checar o dimensionamento feito neste trabalho – embora o critério utilizado seja satisfatório e praticado comumente na engenharia de barragens no mundo – foi simulado o carreamento das partículas do núcleo da barragem através de um filtro

com a granulometria equivalente à do limite grosso ($I_D = 50\%$) do dimensionamento feito neste trabalho.

Nota-se que foi considerada a condição crítica deste projeto, tanto em termos de granulometria como da condição de compactidade do material. Estas análises estão descritas nos itens dedicados às análises de carreamento.

4.2.3 Análise da Estabilidade Interna do Núcleo

Mesmo que um determinado material apresente granulometria compreendida dentro dos limites estabelecidos em projeto, este pode ser suscetível à instabilidade interna, de modo que suas partículas mais finas estejam sujeitas ao carreamento através dos vazios formados pelas mais grosseiras, propiciando a segregação do material em suas frações fina e grossa, conforme discutido no item 3.7.

Como observado na Tabela 5.1 e a Figura 5.4, no item 5.2, o material do núcleo da Barragem de Balderhead é muito bem graduado, apresentando frações de argila, silte, areia e pedregulho, o que o configura como um material com potencial à instabilidade interna.

Tal susceptibilidade foi comprovada após as investigações realizadas posteriormente ao evento de *piping* observado, uma vez que foram observados indícios de segregação do material do núcleo (Vaughan e Soares, 1982).

Em vista do exposto, julgou-se conveniente avaliar a estabilidade interna deste material de modo a permitir que fosse verificada a possibilidade de o fenômeno de *piping* ter ocorrido sob a condição de núcleo íntegro ou segregado. Em outras palavras, em se confirmando a instabilidade interna do material, o núcleo poderia ter seu carreamento analisado considerando-se uma granulometria mais fina que a originalmente determinada, a qual seria resultante de um processo de instabilização interna do mesmo.

Cabe ressaltar que, independentemente da ocorrência ou não da segregação, para análise do processo de filtragem, o material do núcleo deve ser avaliado desconsiderando-se sua fração mais grossa, a qual não participa de tal processo.

Convém mencionar que a instabilidade interna do filtro também pode acarretar um colapso da estrutura e um processo de erosão interna. No entanto, foi verificado que as amostras coletadas do filtro apresentavam coeficientes de

uniformidade, C_u , próximos ou menores que 10, o que sugere que o material é estável internamente.

O item 3.7 apresenta os procedimentos para avaliação da susceptibilidade à instabilidade interna, os quais foram aplicados à análise do material do núcleo da Barragem de Balderhead.

4.2.4 Análises de Carreamento

As atividades estabelecidas para esta etapa compreendem, em resumo, os procedimentos descritos nos tópicos seguintes:

- a) Seleção das combinações de granulometrias do núcleo e do filtro, bem como dos valores de índice de densidade do filtro a serem considerados nas análises;

NOTA: Para as análises de carreamento, foram adotados os índices de densidade, I_D , de 50% e 70% para os materiais do filtro da barragem de Balderhead. Tais condições de compactação foram adotadas pelo autor desta dissertação por corresponderem, com razoável representatividade, aos estados “denso e fofo reais”, ou seja, aos valores de I_D extremos entre os geralmente observados em obras de filtros em barragens.

Conforme mencionado no item 4.2.2, com a finalidade de testar a sensibilidade das análises de carreamento e de verificar o dimensionamento feito neste trabalho – embora o critério utilizado seja satisfatório e praticado comumente na engenharia de barragens no mundo – foi simulado o carreamento das partículas do núcleo da barragem através de um filtro com a granulometria equivalente à do limite grosso ($I_D = 50\%$), estabelecido no dimensionamento feito neste trabalho.

Nota-se que foi considerada a condição crítica deste projeto, tanto em termos de granulometria como da condição de compactação do material. Estas análises estão descritas nos itens dedicados às análises de carreamento, nos itens específicos dos Capítulos 6, 7 e 8.

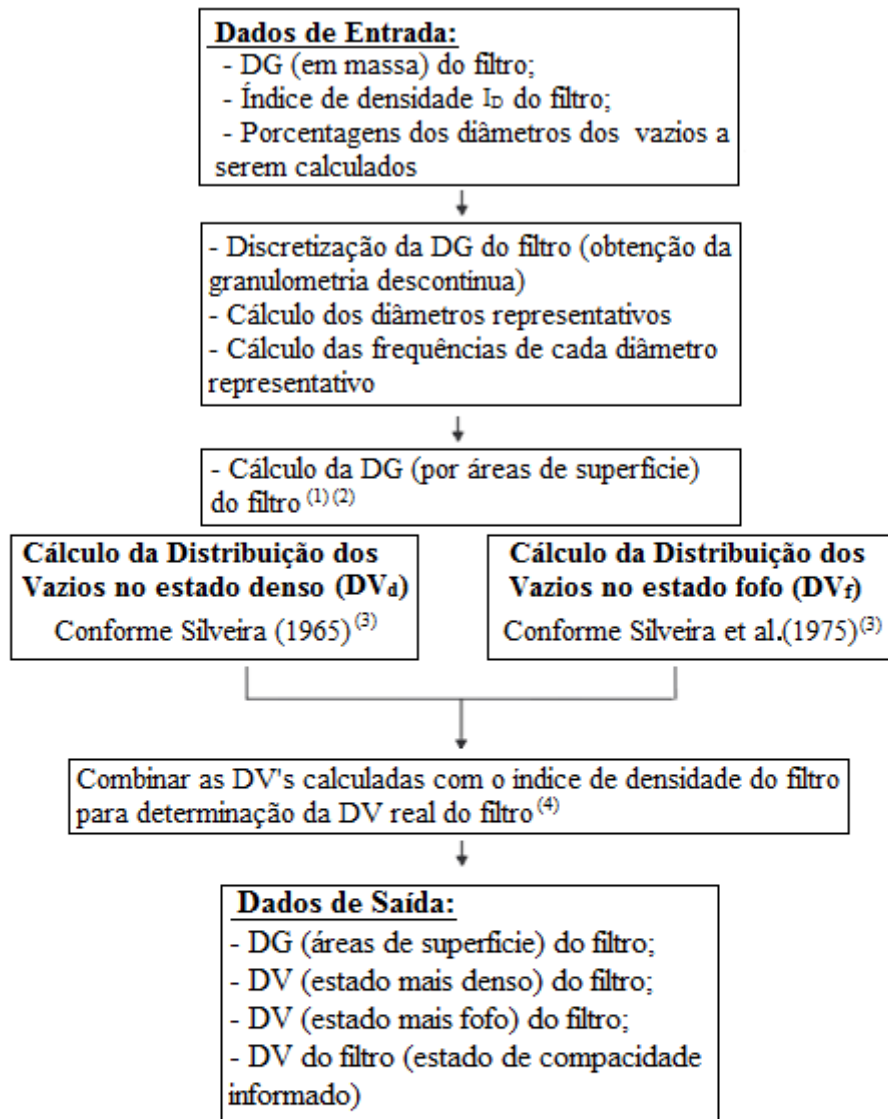
- b) Determinação da distribuição de vazios (porosimetria) dos materiais definidos como filtro na etapa anterior;
- c) Análise do carreamento e determinação da curva de penetração das partículas do núcleo através dos vazios do filtro;
- d) Elaboração do diagrama de carreamento abrangendo as análises realizadas;
- e) Análise dos resultados e conclusões;

Programa computacional para Determinação da Porosimetria

A determinação da curva de distribuição dos vazios (porosimetria) do filtro, a partir das curvas granulométricas apresentadas na Figura 5.4, foi efetuada de acordo com as diretrizes propostas pelos trabalhos relatados no item 3.9 desta dissertação.

Para maior eficiência e confiabilidade dos resultados, foi utilizado um programa desenvolvido por ocasião do desenvolvimento dos trabalhos de Raut (2006), na Universidade de Wollongong, da Austrália, que permite a determinação da distribuição dos vazios de um determinado material para dados valores de índice de densidade tendo por base sua distribuição granulométrica em massa, número ou áreas de superfície das partículas, sendo tais variações possíveis definidas de acordo com o interesse de cada estudo.

As hipóteses e etapas de cálculos realizadas pelo programa, desenvolvido em linguagem Fortran, estão em concordância com as diretrizes propostas pelos trabalhos relatados no item 3.9 desta dissertação. A Figura 4.2 apresenta um fluxograma que resume o procedimento incorporado à rotina do programa, fazendo referência aos autores das propostas utilizadas como base para a execução das principais etapas elencadas.



⁽¹⁾ A conversão da DG_m para a DG_s foi feita de acordo com a proposição de Humes (1996), conforme apresentado no item 3.9.3.

⁽²⁾ Embora a rotina apresente a determinação da DG por área de superfície, o programa permite o cálculo da mesma em termos de massa e números de partículas. Conforme mencionado na revisão bibliográfica desta dissertação, a DGsa é a que permite a determinação da distribuição dos vazios com maior eficácia.

⁽³⁾ As formulações para determinação dos diâmetros equivalentes dos vazios nos estados denso e fofo foram propostas por Silveira (1965) e Silveira et al. (1975) e estão apresentadas no item 3.9.2.1.

⁽⁴⁾ A formulação para o cálculo das dimensões dos vazios para diferentes valores de índice de densidade, I_D , foi proposta por Locke et al. (2001) e está apresentada no item 3.9.4.

Figura 4.2 – Fluxograma resumido do procedimento de cálculos incorporado à rotina do programa para determinação da curva de distribuição dos vazios

(Adaptado de Raut, 2006)

Faz-se importante ressaltar, referente à nota (3) da Figura 4.2, que, independentemente da formulação considerada no programa utilizado, os diâmetros dos vazios do filtro no estado mais denso podem ser calculados tanto pelo método gráfico

(com o auxílio de tabelas) ou formulação apresentada por Silveira (1965) (Equação 3.13), quanto a partir da equação proposta por Musso e Federico (1983) (Equação 3.14), conforme mencionado no item 3.9.2.

Curvas de Penetração

Para determinação das distâncias percorridas pelas partículas do solo base no interior do filtro, bem como para elaboração das curvas de penetração, foram seguidas as diretrizes apresentadas no item 3.9.2, as quais podem ser resumidas de acordo com as etapas seguintes:

- a) Cálculo do número de confrontos para diferentes níveis de confiança (Equação 3.18).
- b) Determinação do percurso unitário – ou seja, percurso por confronto – o qual foi definido como sendo equivalente ao D_{50} da curva granulométrica do filtro avaliado, conforme sugerido por Silveira (1964).
- c) Cálculo do percurso total (Equação 3.19).
- d) Plotagem dos pares “log d x S” – curvas de penetração.
- e) Elaboração do diagrama de carreamento.

O diagrama de carreamento consiste em uma ferramenta criada pelo autor desta dissertação para uma representação esquemática dos carreamentos simulados, mostrando, para cada cenário avaliado, os percursos obtidos – para os níveis de confiança considerados – e os diâmetros das partículas que percorreram as maiores distâncias, bem como suas frequências de ocorrência no material do núcleo antes de iniciado o carreamento.

O diagrama de carreamento também apresenta os valores da razão D_{15}/d_{85} para cada combinação núcleo-filtro avaliada. O objetivo de tal consideração é relacionar os percursos determinados nas análises de carreamento aos valores da razão de retenção estabelecida pelo Critério Clássico de Terzaghi.

Com relação ao nível de confiança, P^{**} , incorporado às análises, foram considerados os valores de 90%, 95% e 99,99%. Destaca-se que a adoção do valor $P^{**}=95\%$ é considerada razoável para a simulação do carreamento provável nas avaliações realizadas, uma vez que a maioria dos intervalos de confiança adotados na prática moderna aplicada situam-se neste nível (Zar, 1984). O nível de confiança

$P^{**}=99,99\%$ foi estabelecido como representativo de uma condição conservadora, sendo este nível associado à probabilidade de determinada partícula do solo encontrar um vazio de diâmetro igual ou menor que o seu próprio – quanto maior é o nível de confiança adotado, maiores serão os carregamentos calculados. O nível de confiança $P^{**}=90\%$ está associado a carregamentos menores e foi incorporado às análises apenas com a finalidade de prover uma melhor sensibilidade da variação dos carregamentos em função deste parâmetro.

4.3 Materiais

Todas as informações necessárias para aplicação da metodologia proposta no item 4.2 foram obtidas de publicações dos trabalhos conduzidos por Peter Vaughan, em Vaughan et al. (1970) e Vaughan e Soares (1982).

Estes trabalhos descrevem em detalhes a Barragem de Balderhead e o evento de falha observado e estas informações foram utilizadas para as análises realizadas, mesmo que de forma indireta ou para fins de interpretação dos resultados.

Os dados indispensáveis para a aplicação da metodologia proposta consistem nas distribuições granulométricas de amostras dos materiais da barragem (núcleo e filtro), bem como das especificações do projeto de Balderhead, conforme apresentados na Figura 4.3.

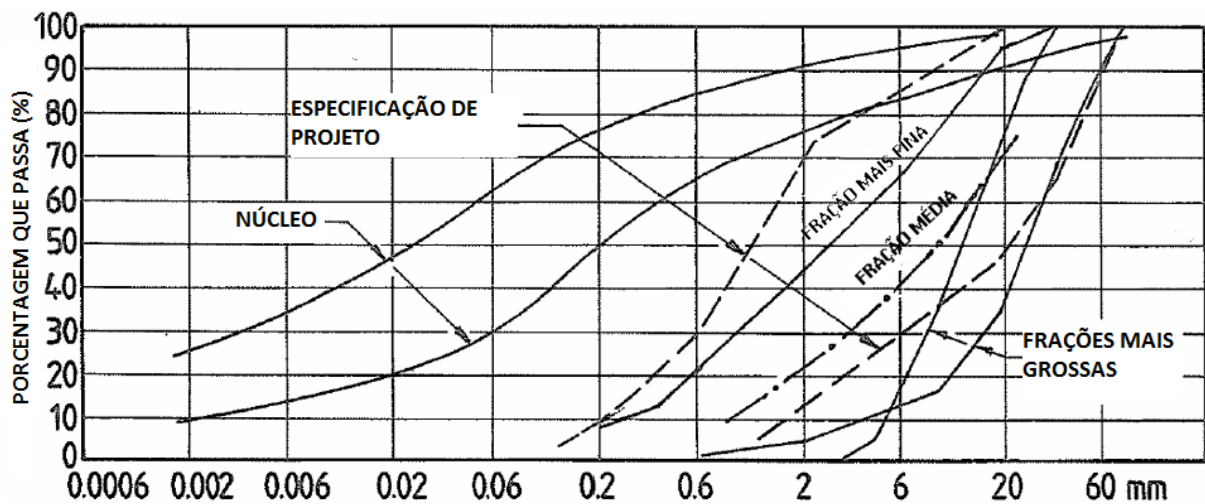


Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos materiais da Barragem de Balderhead (Adaptado de Vaughan e Soares, 1982)

Visando avaliar as condições extremas relacionadas às dimensões dos vazios do filtro – maiores e menores vazios possíveis – as análises apresentadas no

estudo de caso desta dissertação consideraram os materiais caracterizados pelas curvas das frações mais fina (uma amostra) e mais grossas (duas amostras), tendo sido desconsiderada a amostra descrita como “fração média” (Figura 4.3).

Conforme apresentado no Capítulo 5, as amostras dos materiais do núcleo e filtro, consideradas para os diferentes cenários das análises realizadas neste trabalho, foram identificadas por: Núcleo Fino; Núcleo Grosso; Filtro Fino; Filtro Grosso 1; e Filtro Grosso 2 (Figura 5.4).

O Capítulo 5 apresenta uma breve análise dos materiais representados na Figura 4.3, bem como o enquadramento dos mesmos em relação à classificação estabelecida pela NBR 6502/95 (ABNT, 1995).

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Para a aplicação da teoria estudada e da metodologia apresentada no Capítulo 4, foram elencados três possíveis casos reais.

Após uma avaliação sobre estes possíveis casos a serem estudados, foi definido que os trabalhos teriam continuidade por meio da simulação do caso real da Barragem de Balderhead (*Balderhead Dam*), na qual foi constatada a ocorrência do processo de *piping*, por meio do qual as partículas finas do núcleo foram carregadas por entre as partículas granulares do filtro da barragem, acarretando a formação de um *sinkhole* na crista da barragem.

Os aspectos elencados a seguir foram considerados para a escolha da Barragem de Balderhead como o caso a ser estudado neste trabalho.

- Relevância da estrutura e do evento de *piping* ocorrido, os quais foram objeto de estudos importantes acerca desse tipo de fenômeno (Vaughan et al., 1970; e Vaughan e Soares, 1982), inclusive subsidiando a elaboração de diretrizes para critérios de dimensionamento de filtros para argilas (Vaughan e Soares, 1982).
- O caso escolhido se refere a uma falha concreta observada, tendo o evento de *piping* em questão passado por todas as etapas que um fenômeno desta natureza pode experimentar, desde sua iniciação, até a abertura da brecha (ver estágios da erosão interna no item 3.2.2).
- Os dados necessários para as análises foram obtidos de publicações, permitindo fácil acesso às informações e evitando dificuldades relacionadas a eventuais restrições quanto à publicação de informações sobre casos de falhas de barragens.

O item 5.2 apresenta um breve descritivo da Barragem de Balderhead, bem como do evento de *piping* observado. As informações apresentadas foram extraídas, basicamente, dos trabalhos apresentados por Vaughan et al. (1970) e Vaughan e Soares (1982).

5.2 Barragem de Balderhead

A Barragem de Balderhead foi implantada no Rio Balder, na Bacia do Rio Tees, no norte da Inglaterra. Seu projeto foi iniciado em 1959, e sua construção se deu entre março de 1961 e outubro de 1965.

A Figura 5.1 apresenta a localização da Barragem de Balderhead.

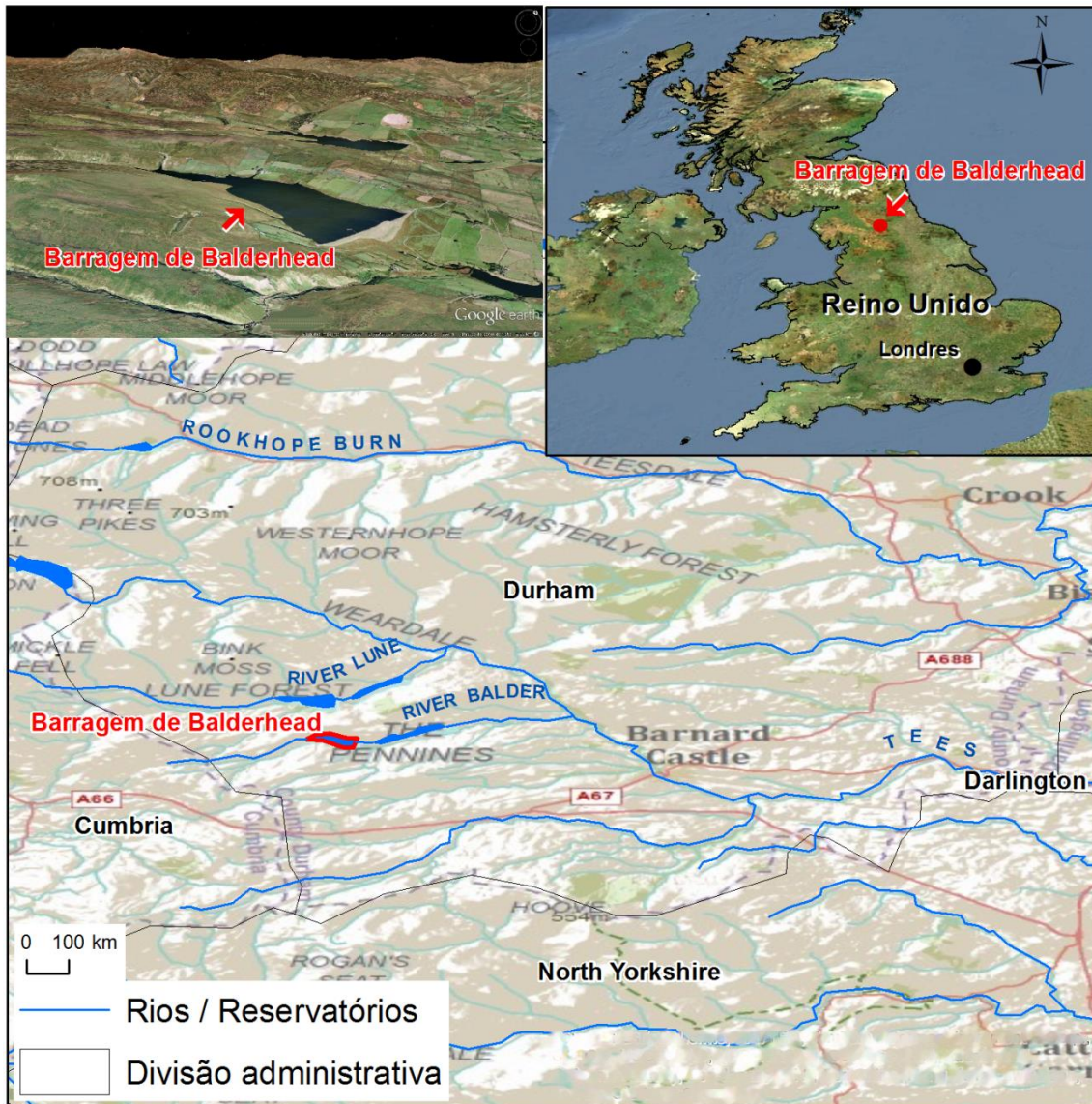


Figura 5.1 – Localização da Barragem de Balderhead
(Imagens orbitais Spot e Orbview de maio de 2005 a setembro de 2012, Digital Globe;
Google Earth, data das imagens: 9 de novembro de 2009 e acesso em 12 de junho de
2013)

A crista da Barragem de Balderhead tem 925 m de comprimento, largura de aproximadamente 8 m e coroamento na elevação 334,7 m, com cerca de 45 m de altura máxima.

Sua fundação é composta por xisto carbonífero com ocorrência de depósito de argila na região do fundo do vale, conforme pode ser observado na seção longitudinal apresentada na Figura 5.3.

A barragem foi concebida em seção mista, contando com um núcleo esbelto composto por frações desde argila até seixos e pedregulhos com dimensões maiores que 0,15 m. Os espaldares são compostos por solo residual de xisto escarificado das áreas de empréstimo e compactado em camadas. Na porção de montante de sua seção transversal, um trecho de transição entre este material e o núcleo de argila foi implantado, sendo este composto por solo residual de xisto fino compactado. Os materiais que constituem ambos os espaldares da Barragem de Balderhead possuem permeabilidades consideravelmente mais altas que o núcleo da barragem.

A jusante do núcleo da barragem foi implantado um filtro granular de espessura aproximada entre 1,85 m e 2,00 m, conforme verificado nas figuras apresentadas, em escala, nos trabalhos de Vaughan et al. (1970) e Vaughan e Soares (1982). O material implantado no núcleo da barragem é bem graduado e foi implantado em camadas lançadas com 0,18 m, atingindo a espessura de 0,15 m após a compactação.

Na fundação do núcleo da barragem, no trecho central de sua seção transversal, foi implantado um cut-off em concreto, a partir do qual foi posicionada uma cortina de injeção de espessura de 1,8 m.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam a seção transversal típica da Barragem de Balderhead e a seção longitudinal da mesma, com a representação da área mais afetada pelo processo de *piping*, bem como componentes da fundação e da estrutura da barragem.

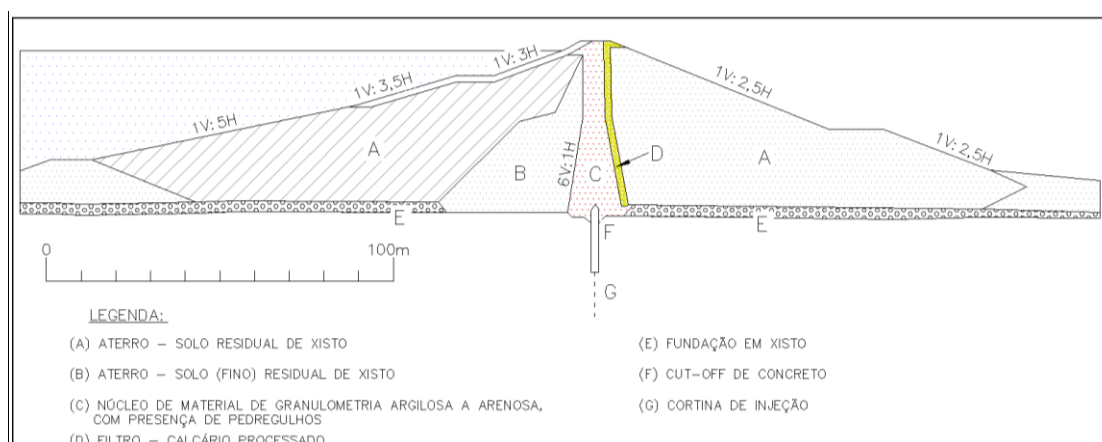


Figura 5.2 – Seção típica da Barragem de Balderhead

(Adaptado de Vaughan et al., 1970)

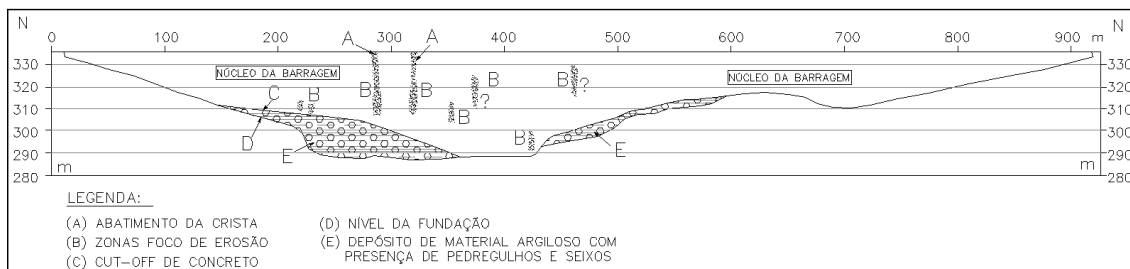


Figura 5.3 – Seção longitudinal da Barragem de Balderhead
(Adaptado de Vaughan et al., 1970)

5.2.1 Caracterização Granulométrica dos Materiais – Núcleo e Filtro

Uma vez que o problema verificado na Barragem de Balderhead está diretamente relacionado aos materiais constituintes do núcleo e de seu sistema de drenagem interna, faz-se importante abordar neste item o contexto no qual se inseriu o projeto e a construção da barragem sob o ponto de vista da caracterização destes materiais.

A Tabela 5.1 apresenta uma compilação dos dados granulométricos obtidos das curvas dos materiais envolvidos diretamente nas análises realizadas neste trabalho, e a Figura 5.4 apresenta os referidos dados plotados em formato de gráfico, incluindo os limites granulométricos estabelecidos para o filtro, na ocasião do projeto da Barragem de Balderhead. A Figura 4.3, no item 4.3, apresenta os dados originais apresentados por Vaughan e Soares (1982).

Tabela 5.1 – Dados da granulometria dos materiais da Barragem de Balderhead

Material/ Amostra		Fração argila (%)	Fração silte (%)	Fração areia (%)			Fração pedregulho (%)
				Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	
Núcleo	Amostra 1 - Fino	25,4	37	28,8			7,6
				13,7	8,8	6,4	
Núcleo	Amostra 2 - Grosso	9,1	20,9	46,1			20,9
				20	15,5	10,6	
Filtro	Amostra 1 - Fino	-	-	44			56
				7	13	24	
	Amostra 2 - Grosso 1	-	-	-			100
Filtro	Amostra 3 - Grosso 2	-	-	4,2			95,8
				-	1	3,2	

Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995):

Argila: $\varnothing < 0,002$ mm
 Silte: $0,002 < \varnothing < 0,06$ mm
 Areia: $0,06 < \varnothing < 2,0$ mm
 - Areia fina: $0,06 < \varnothing < 0,2$ mm;
 - Areia média: $0,2 < \varnothing < 0,6$ mm;
 - Areia grossa: $0,6 < \varnothing < 2,0$ mm

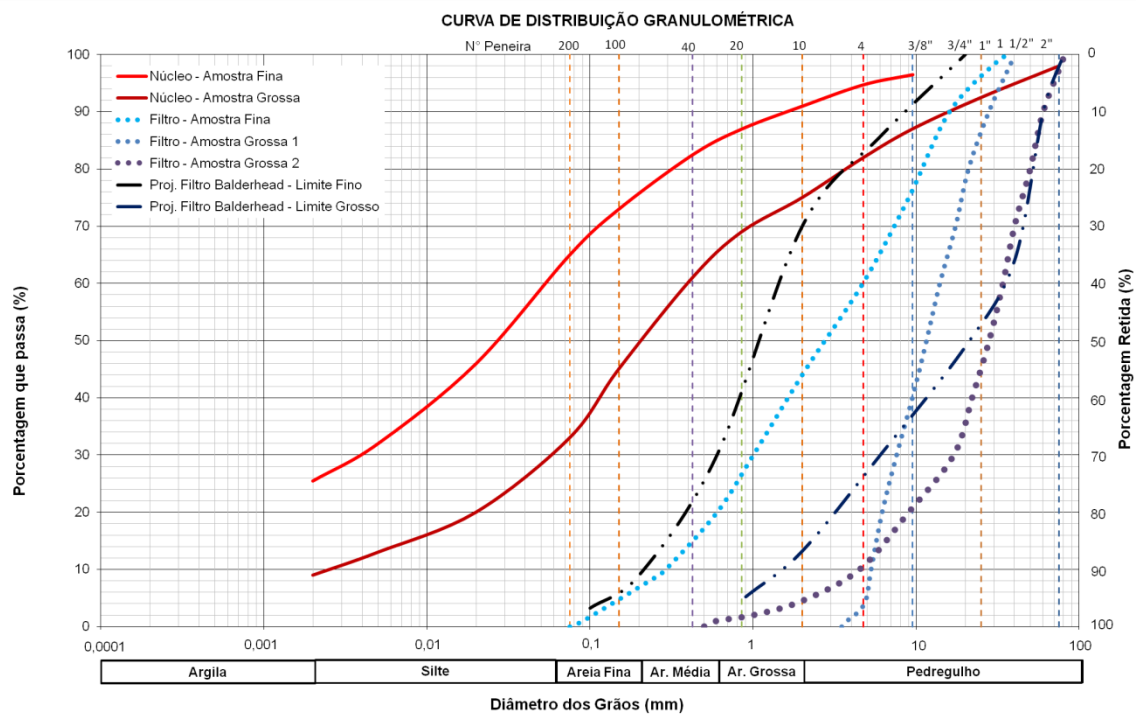


Figura 5.4 – Curvas granulométricas plotadas após tratamento das informações obtidas de Vaughan e Soares (1982)

Núcleo

Quanto à granulometria, o material implantado no núcleo da barragem é muito bem graduado e, embora seja descrito nas bibliografias como uma argila, apresenta predominância das frações silte e areia em sua composição – conforme classificação estabelecida na NBR 6502/95 (ABNT, 1995) – de acordo com as distribuições granulométricas em massa, conforme apresentado na Tabela 5.1 e na Figura 5.4. A Figura 5.5 mostra as curvas granulométricas das amostras do núcleo de forma separada em relação às das demais amostras.

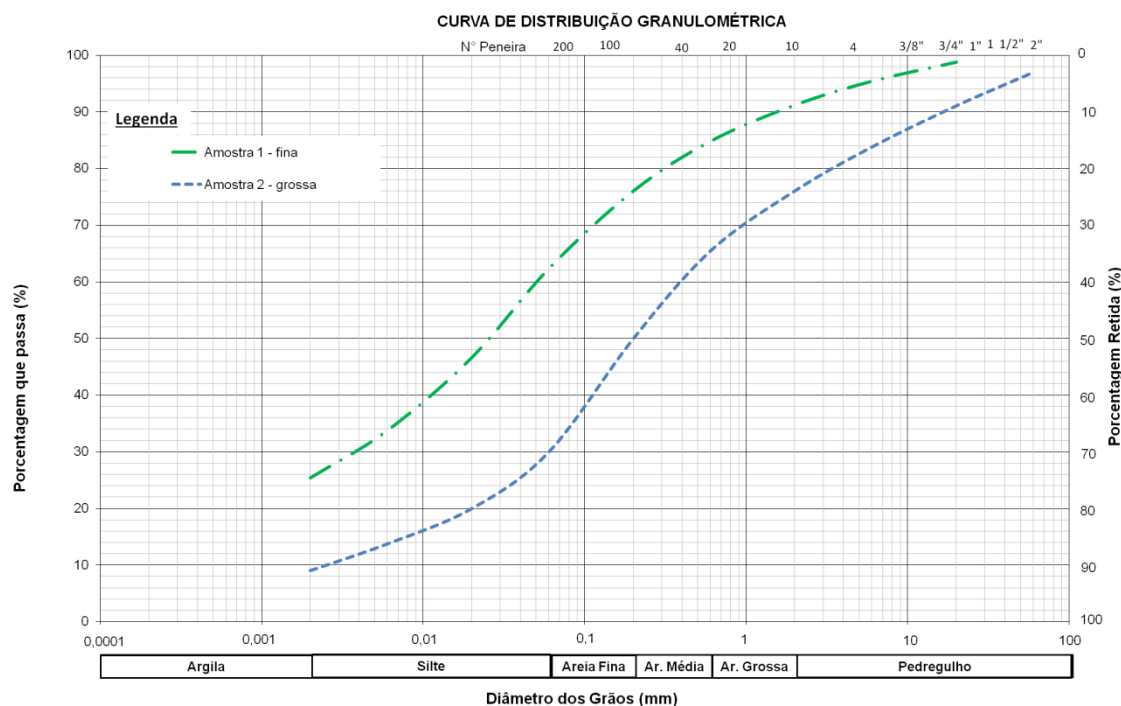


Figura 5.5 – Curvas granulométricas em massa das duas amostras do núcleo da Barragem de Balderhead

Filtro

O filtro da Barragem de Balderhead era composto por calcário duro britado.

Conforme mencionado no item 4.2.2, na ocasião da elaboração do projeto da Barragem de Balderhead (1959/ 1960) não se dispunha de um método reconhecidamente efetivo para dimensionamento de filtros para materiais argilosos. Para definição dos materiais utilizados como filtro foram consideradas as granulometrias de materiais utilizados para a Barragem de Selset, implantada entre 1955

e 1960 cerca de 3 km a norte do reservatório de Balderhead, no rio Tees, tendo esta sido construída com o mesmo material de núcleo que a Barragem de Balderhead.

Segundo Vaughan et al. (1970), o critério de projeto do filtro considerou a necessidade de atendimento da razão de retenção “ $D_{15}/d_{85} = 3$ ”, considerando-se a dimensão máxima de partículas do núcleo de 2 cm. No entanto, na construção da barragem, por motivos de segregação ou variações nos materiais, a referida razão de retenção se apresentou com valores de até 6 em trechos localizados (Figura 5.4).

Além da falta de um critério reconhecidamente seguro, as investigações realizadas após o evento de falha observado mostraram a presença de materiais de granulometrias mais grossas que as especificadas pelo projeto (Figura 5.4), não tendo sido possível concluir se o material grosseiro encontrado era decorrente de falha do controle de obra ou se o material sofreu segregação.

A Figura 5.6 apresenta as curvas granulométricas dos materiais do filtro da Barragem de Balderhead de forma separada, os quais são provenientes de amostras coletadas em campanha de investigações realizada em período pós-falha.

Cabe mencionar que este trabalho não contou com informações sobre a compactação do filtro da Barragem de Balderhead, tendo sido estes dados inferidos para realização das análises sobre este estudo de caso.

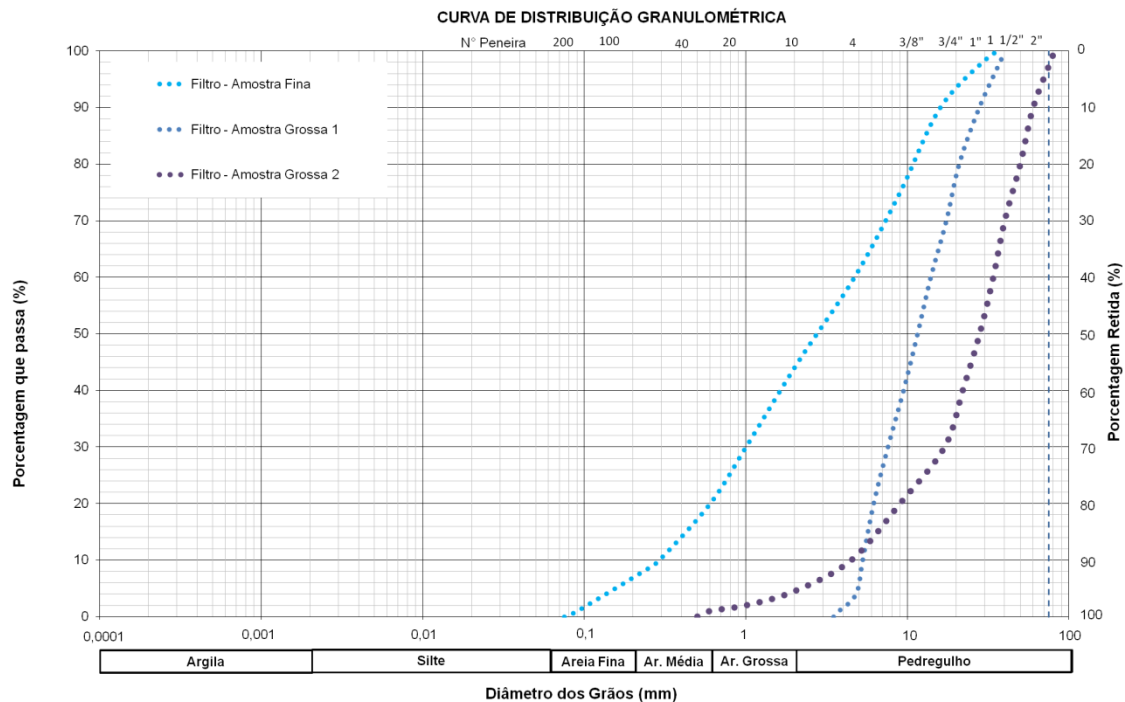


Figura 5.6 – Curvas granulométricas em massa de três amostras do filtro da Barragem de Balderhead

5.2.2 Evento de falha

A construção da Barragem de Balderhead foi concluída em outubro de 1965, tendo o primeiro enchimento de seu reservatório ocorrido entre outubro de 1964 e fevereiro de 1966.

Em abril de 1967 foi constatado o surgimento de uma fenda de grandes dimensões na crista da barragem – 3 m de largura e 2,5 m de profundidade. Uma vez detectada a falha, o reservatório da barragem foi rebaixado em 9 m, durante o qual observou-se a ocorrência de um segundo evento. A partir de então, uma campanha de investigação foi iniciada com o intuito de se verificar a causa do problema observado e de se recuperar a estrutura da barragem.

O local onde se estabeleceu o foco do *sinkhole* foi investigado por meio de sondagens rotativas, entre outras investigações. A partir dos resultados de tal campanha, foi possível inferir a configuração apresentada na Figura 5.7 (Vaughan e Soares, 1982).

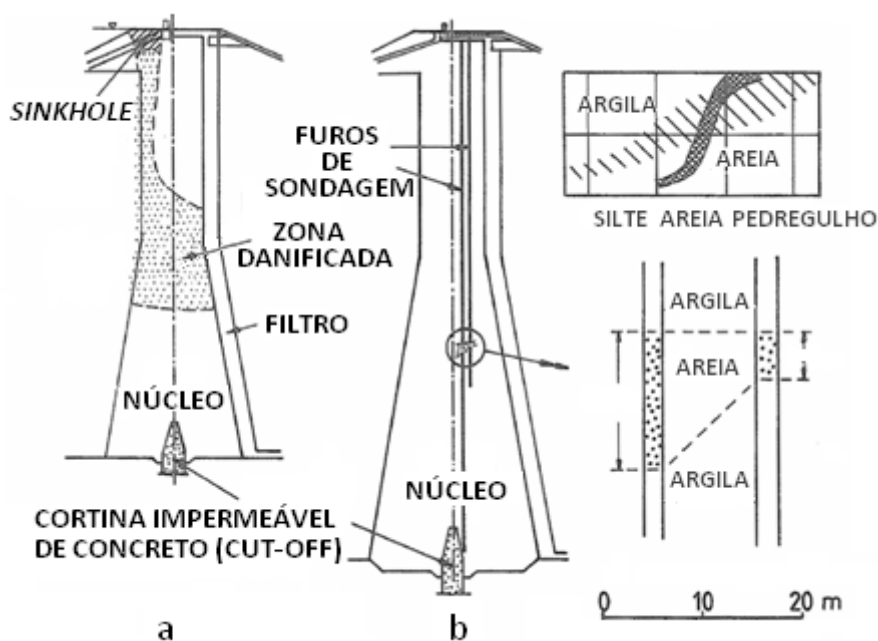


Figura 5.7 – Núcleo da Barragem de Balderhead com representação do *sinkhole*, na região afetada pelo evento de *piping* ocorrido (adaptado de Vaughan e Soares, 1982)

Conforme relatado por Vaughan e Soares (1982), a área onde se desenvolveu o *sinkhole* foi preenchida por diferentes camadas de materiais – argila mole, torrões rijos de argila, lentes de areia lavada, indicando segregação do material do

núcleo. Outro indício da ocorrência de segregação do material do núcleo são as amostras de areia encontradas em região fora da área de influência do processo de *piping* observado (Figura 5.7.b), já que a única forma com a qual tal fração de areia poderia ser encontrada separadamente naquele local seria por meio da segregação do material do núcleo.

Conforme relatado por Vaughan e Soares (1982), ficou evidente que o núcleo da barragem entrou em colapso por fratura hidráulica pouco antes do completo enchimento do reservatório e que a perda de material fino do núcleo, por erosão interna, ocorreu de forma gradual, ao longo dos quatorze meses de enchimento do mesmo. Ficou notório que a ineficiência do filtro implantado a jusante do núcleo da barragem permitiu que o carreamento destas partículas ocorresse e o problema se agravasse até que o *sinkhole* se estabelecesse.

A Figura 5.3, na introdução do item 5.2, apresenta um perfil longitudinal da Barragem de Balderhead com a representação da área mais afetada pelo processo de *piping*, bem como dos componentes da fundação e da estrutura da barragem.

6 RESULTADOS

Os resultados das análises realizadas estão apresentados de acordo com as seguintes etapas de estudo:

- a) Verificação do projeto de filtro
- b) Análise da estabilidade interna do núcleo
- c) Análises de carreamento

6.1 Verificação do Projeto de Filtro

Conforme mencionado no item 4.2, o dimensionamento para o filtro da Barragem de Balderhead foi realizado de acordo com o procedimento apresentado em USDA SCS (1986) e revisado em NRCS (1994), em consonância com ICOLD (1994). Este procedimento está apresentado de forma detalhada no item 3.8 desta dissertação.

Tendo em vista estes critérios, e com base nas curvas granulométricas do núcleo da Barragem de Balderhead, foram determinados os pontos principais que definem as curvas limites admissíveis para a granulometria do filtro da barragem, conforme apresentado na Tabela 6.1 e na Figura 6.1, a qual mostra as curvas granulométricas das amostras “Fina” e “Grossa” do núcleo da Barragem de Balderhead, bem como os limites granulométricos obtidos do dimensionamento do filtro.

As curvas reclassificadas indicadas representam a granulometria das amostras do núcleo após desconsideração das partículas maiores que 4,75 mm, conforme recomendação de NRCS (1994). Como pode ser observado, esta etapa de reclassificação resultou na “aproximação” da granulometria destas amostras. De fato, destaca-se, como apresentado na Figura 6.1, que o dimensionamento realizado para as duas amostras do núcleo da barragem determinou os mesmos limites granulométricos.

A Figura 6.2 apresenta, para efeito de comparações com o dimensionamento efetuado neste trabalho – curvas identificadas por “Pimenta (2013)” – as curvas granulométricas das amostras de filtro coletadas e os limites estabelecidos para o filtro na ocasião do projeto da Barragem de Balderhead (1959/ 1960). Por esta figura, observa-se que as curvas limites do projeto original diferem significativamente das curvas limites estabelecidas conforme os critério indicados em NRCS (1994). Além

disso, verifica-se que as curvas das três amostras do filtro, que já não atendiam aos limites estabelecidos no projeto original, encontram-se totalmente fora da faixa definida pelos limites estabelecidos segundo os critérios de NRCS (1994).

Tabela 6.1 – Limites granulométricos obtidos para o filtro do núcleo da Barragem de Balderhead (conforme critérios do NRCS, 1994)

Limite fino			Limite Grosso		
Pontos	D (mm)	P (%)	Pontos	D (mm)	P (%)
x ⁽¹⁾	2,000	100	6	75,000	100
4	0,500	60	7	20,000	90
2	0,100	15	3	2,500	60
5	0,075	5	1	0,500	15

⁽¹⁾ Ponto para extrapolação da curva granulométrica

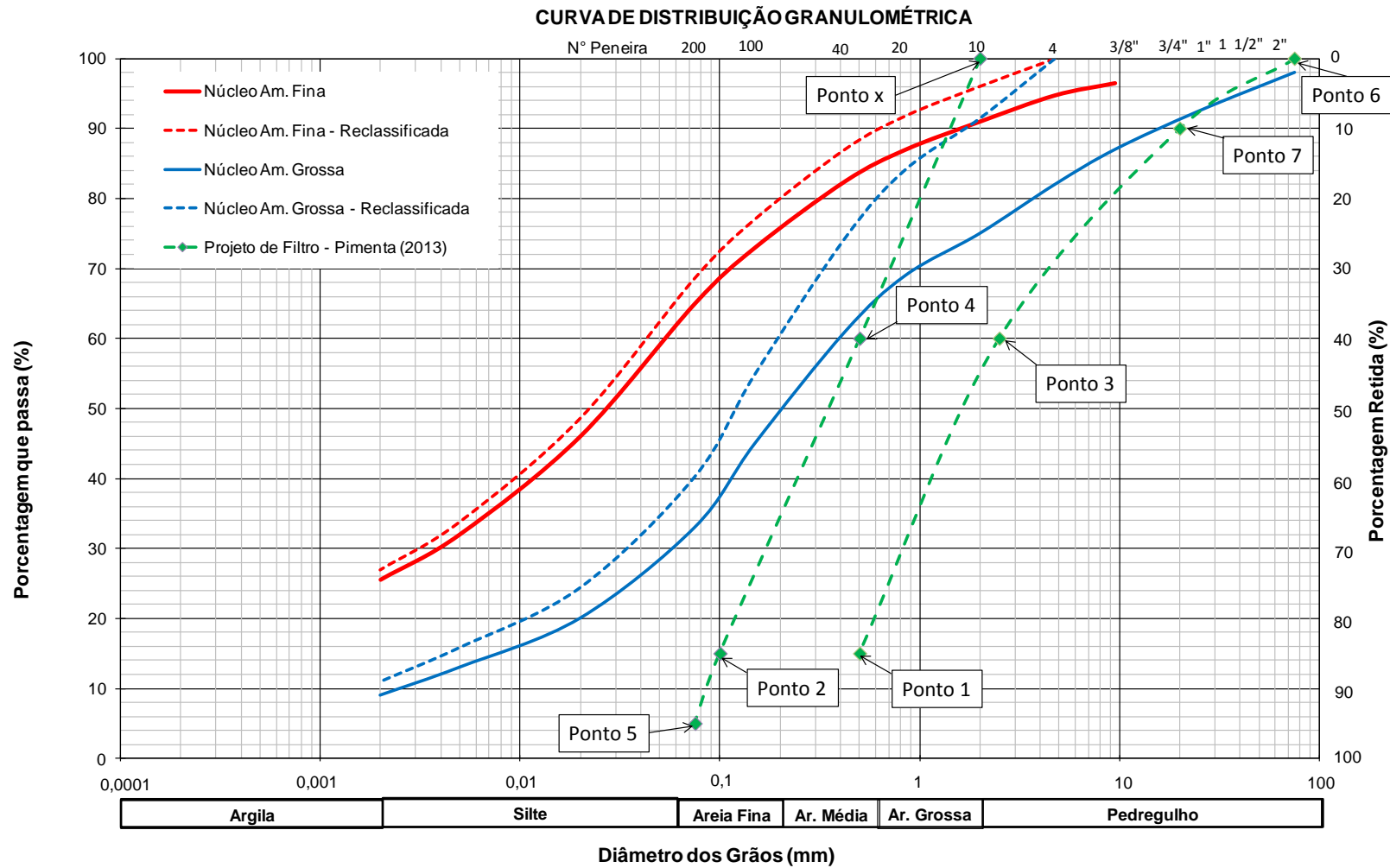


Figura 6.1 – Dimensionamento de filtro para o núcleo (amostras “Fina” e “Grossa”) da Barragem de Balderhead – pontos e limites granulométricos determinados

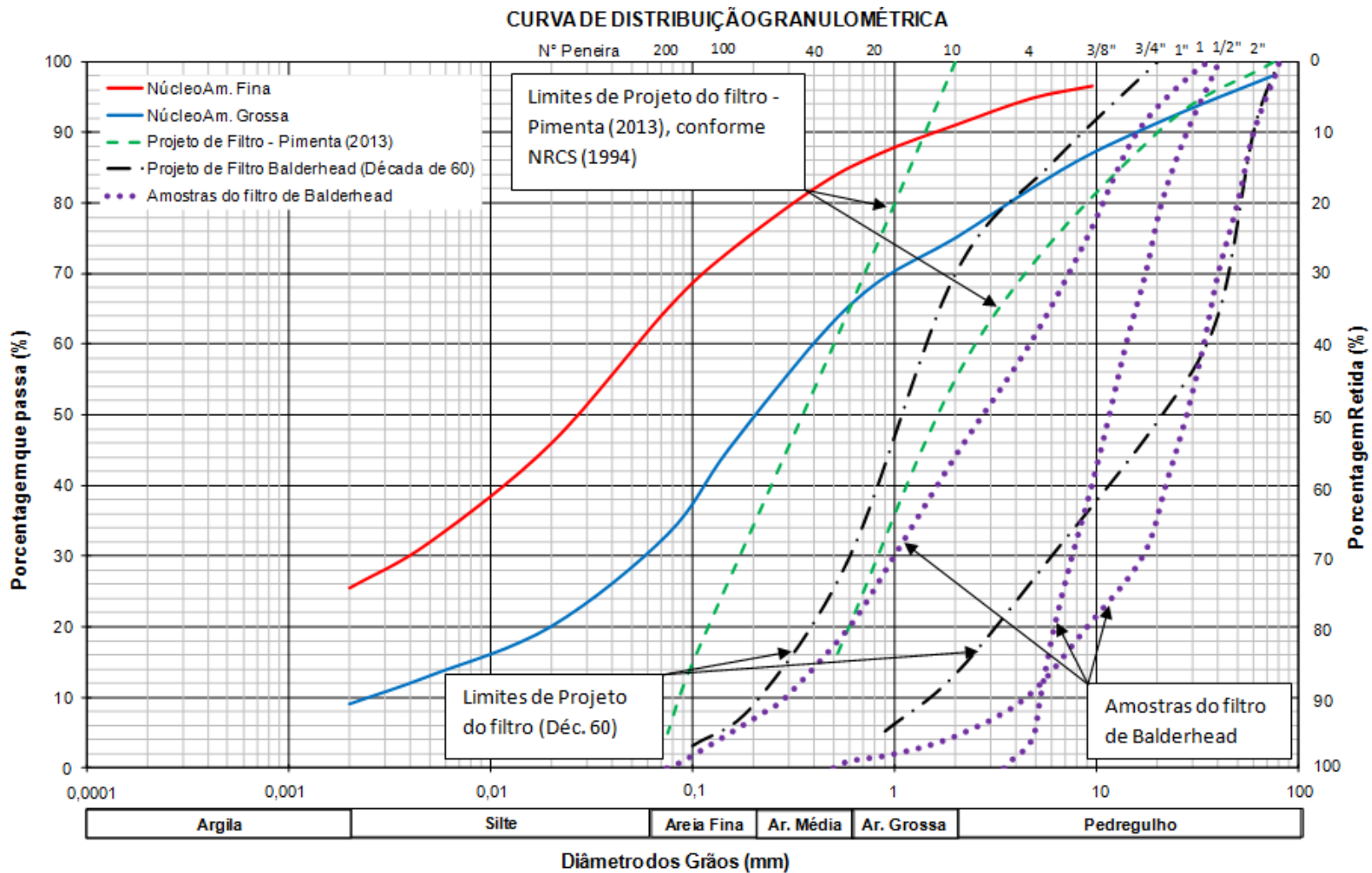


Figura 6.2 – Curvas granulométricas do núcleo e filtro da Barragem de Balderhead e dos dimensionamentos feitos no projeto da barragem e no presente trabalho

6.2 Análise da Estabilidade Interna do Núcleo

As amostras do núcleo da Barragem de Balderhead apresentam curvas granulométricas muito bem graduadas (C_u com valores da ordem de 130 e 280 para as amostras fina e grossa, respectivamente) e com concavidade para baixo. Em vista destas condições, a estabilidade interna das mesmas foram avaliadas pelo método de De Mello (1975)/ Sherard (1979), conforme orientações apresentadas no item 3.7.

Primeiramente, foram definidos pontos sobre as curvas granulométricas das amostras grossa e fina do núcleo (Figura 5.5), levando em consideração os trechos onde as mesmas apresentam descontinuidades.

A partir desses pontos, identificados neste estudo de caso como “pontos de ajuste”, a curva original de cada amostra do núcleo foi separada, obtendo-se duas novas curvas, identificadas como “curvas ajustadas”, as quais correspondem às frações grossa e fina de cada amostra.

Uma vez determinadas as curvas ajustadas, o problema da instabilidade interna se resume à avaliação da condição $D_{15g}/d_{85f} \leq 5$, que deve ser atendida para que o material seja considerado estável internamente.

A Figuras 6.3 e 6.4 apresentam, respectivamente para as amostras grossa e fina, os pontos de ajuste e as curvas ajustadas estabelecidas para cada amostra do núcleo, bem como os valores calculados para as razões D_{15g}/d_{85f} . As análises realizadas indicam, portanto, que as amostras fina e grossa do núcleo de Balderhead são instável e estável internamente, respectivamente.

É importante ressaltar que a análise realizada está associada a um grau de incerteza e que, considerando que os valores calculados para a razão D_{15g}/d_{85f} são próximos de 5, é possível que ambas as amostras em questão se comportem de forma inesperada em campo, podendo se mostrar instáveis internamente.

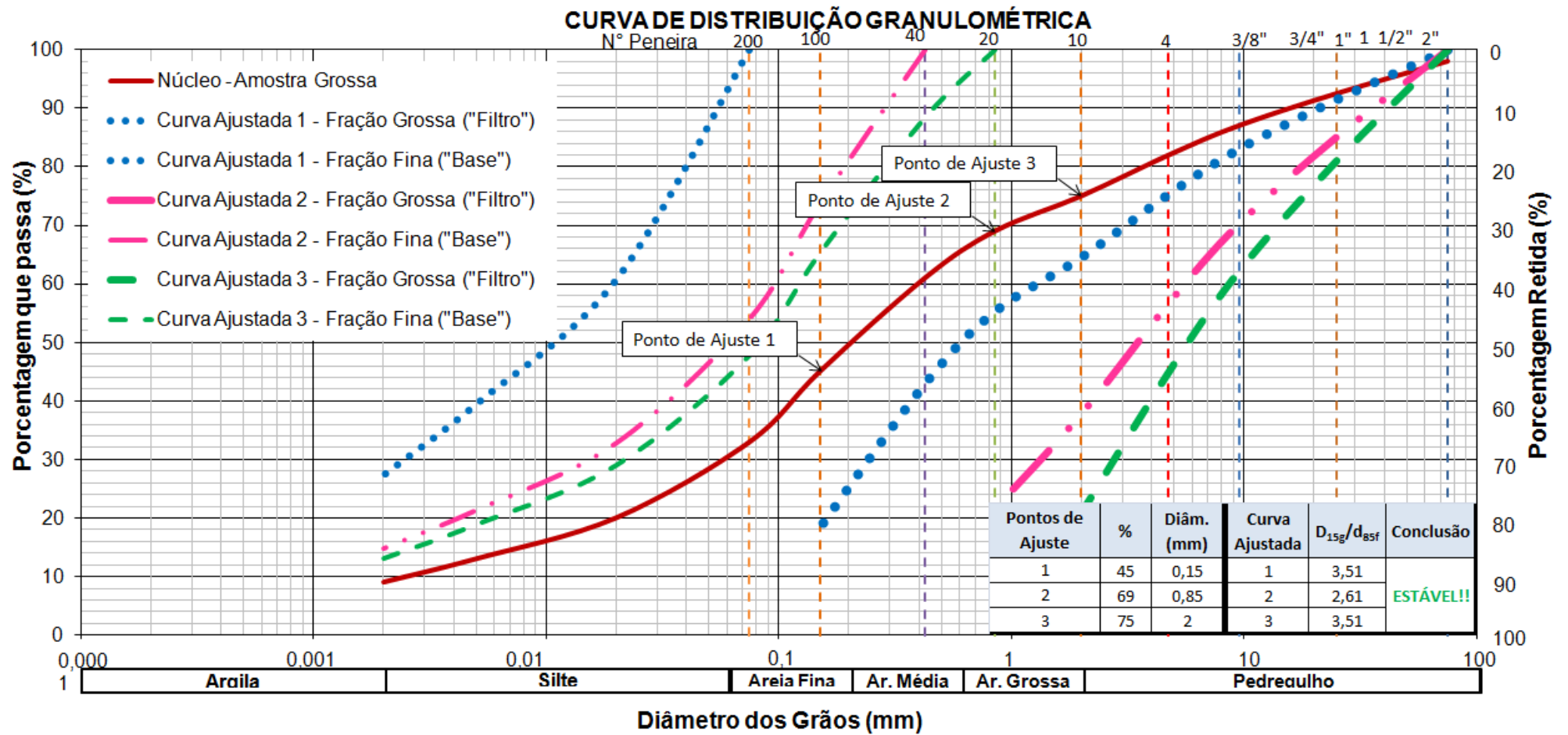


Figura 6.3 – Análise da estabilidade interna do núcleo (Núcleo Grosso)

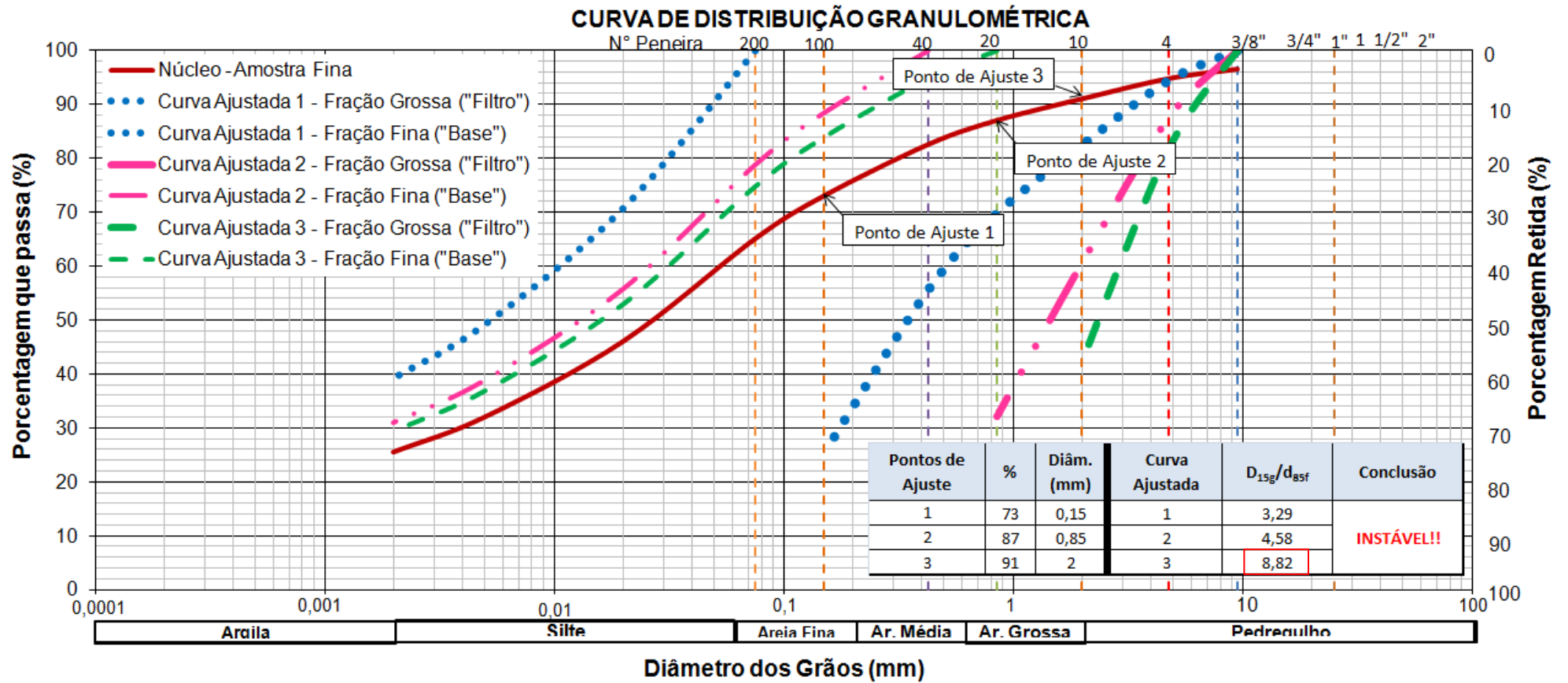


Figura 6.4 – Análise da estabilidade interna do núcleo (Núcleo Fino)

6.3 Análises de Carreamento

Os resultados apresentados neste item foram obtidos a partir das análises realizadas em consonância com a metodologia apresentada no Capítulo 4 (item 4.2.4) deste trabalho.

Cabe ressaltar que, como já mencionado no item 4.2.4, para as análises de carreamento, foram adotados os índices de densidade, I_D , de 50% e 70% para os materiais do filtro da barragem de Balderhead. Tais condições de compacidade foram adotadas pelo autor desta dissertação por corresponderem, com razoável representatividade, aos estados “denso e fofo reais”, ou seja, aos valores de I_D extremos entre os geralmente observados em obras de filtros em barragens.

Conforme mencionado no item 4.2.2, com a finalidade de testar a sensibilidade das análises de carreamento e de checar o dimensionamento feito neste trabalho – embora o critério utilizado seja satisfatório e praticado comumente na engenharia de barragens no mundo – foi simulado o carreamento das partículas do núcleo da barragem através de um filtro com a granulometria equivalente à do limite grosso ($I_D = 50%$) estabelecido no dimensionamento feito neste trabalho.

Nota-se que foi considerada a condição crítica deste projeto, tanto em termos de granulometria como da condição de compacidade do material.

A Tabela 6.2 apresenta os cenários considerados nas análises de carreamento realizadas, e a Tabela 6.3 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

As Figuras 6.5 a 6.15 apresentam, para cada cenário avaliado, as curvas granulométricas dos solos base e filtros e as curvas de distribuição dos vazios dos filtros. As Figuras 6.16 a 6.22 apresentam as curvas de penetração para cada amostra de filtro avaliada para os diferentes estados de compacidade considerados.

Tabela 6.2 – Análises de carreamento realizadas – cenários avaliados

Cenários Avaliados	Materiais/ Granulometrias Consideradas		Índice de Densidade do filtro, I_D (%)
	Filtro	Núcleo	
1	Fino	Grosso	70%
2	Fino	Grosso	50%
3	Grosso2	Fino	70%
4	Grosso2	Fino	50%
5	Grosso1	Fino	70%
6	Grosso1	Fino	50%
7	Grosso2	Grosso	70%
8	Grosso2	Grosso	50%
9	Grosso1	Grosso	70%
10	Grosso1	Grosso	50%
11	Fino	Fino	70%
12	Fino	Fino	50%
13	Grosso2	Fino sem fração pedregulho	70%
14	Grosso1	Fino sem fração pedregulho	70%
15	Fino	Fino sem fração pedregulho	70%
16	Projeto de Filtro Pimenta 2013 - Limite Grosso	Fino	50%
17	Projeto de Filtro Pimenta 2013 - Limite Grosso	Grosso	50%

A Figura 6.23 apresenta o diagrama de carreamento, criado pelo autor desta dissertação, para uma representação esquemática dos carreamentos simulados, mostrando, para cada cenário avaliado, os percursos obtidos – para níveis de confiança de 95% e 99,99% – e os diâmetros das partículas que apresentaram os maiores carreamentos, bem como as porcentagens passantes (em massa) dessas partículas do núcleo íntegro, ou seja, antes de iniciado o processo de carreamento.

Como mencionado no item 4.2.4, além da determinação dos percursos das partículas, o diagrama de carreamento também apresenta os valores da razão D_{15}/d_{85} para cada combinação núcleo-filtro avaliada. O objetivo de tal consideração é relacionar os percursos observados nas análises de carreamento aos valores da razão de retenção estabelecida no critério clássico de Terzaghi.

Tabela 6.3 – Resumo dos resultados para as análises realizadas – Análises de carreamento

Cenários Avaliados	Materiais/ Granulometrias Consideradas		Índice de Densidade do filtro, I_D (%)	Resultados das Análises de Carreamento			
	Filtro	Núcleo		Percorso máximo percorrido para $P^{**}=99,9\%$ (cm)	Percorso máximo percorrido para $P^{**}=95\%$ (cm)	Diâmetro d da partícula que percorreu tal percurso (mm)	% passante (em massa) das partículas de diâmetro d do solo base
1	Fino	Grosso	70%	11,3	3,69	0,075	33%
2	Fino	Grosso	50%	14,5	4,73	0,075	33%
3	Grosso2	Fino	70%	601,0	195,5	0,15	73%
4	Grosso2	Fino	50%	616,0	200,4	0,15	73%
5	Grosso1	Fino	70%	147,2	47,9	0,85	87%
6	Grosso1	Fino	50%	159,0	51,7	0,85	87%
7	Grosso2	Grosso	70%	601,0	195,5	0,15	42%
8	Grosso2	Grosso	50%	616,0	200,4	0,15	42%
9	Grosso1	Grosso	70%	147,2	47,9	0,85	69%
10	Grosso1	Grosso	50%	159,0	51,7	0,85	69%
11	Fino	Fino	70%	11,3	3,69	0,075	65%
12	Fino	Fino	50%	14,5	4,73	0,075	65%
13	Grosso2	Fino sem fração pedregulho	70%	601,0	195,5	0,15	84%
14	Grosso1	Fino sem fração pedregulho	70%	147,2	47,9	0,85	100%
15	Fino	Fino sem fração pedregulho	70%	11,3	3,69	0,075	45%
16	Projeto de Filtro Pimenta 2013 - Limite Grosso	Fino	50%	5,0	1,6	0,075	65%
17	Projeto de Filtro Pimenta 2013 - Limite Grosso	Grosso	50%	5,0	1,6	0,075	33%

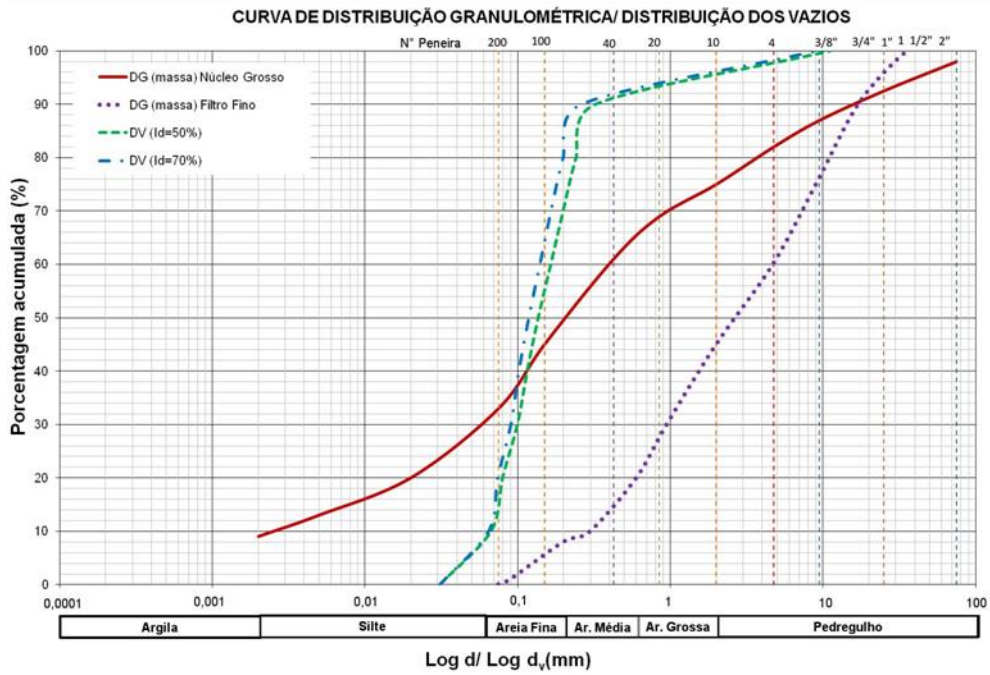


Figura 6.5 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 1 e 2 (amostras “Filtro Fino” e “Núcleo Grosso”)

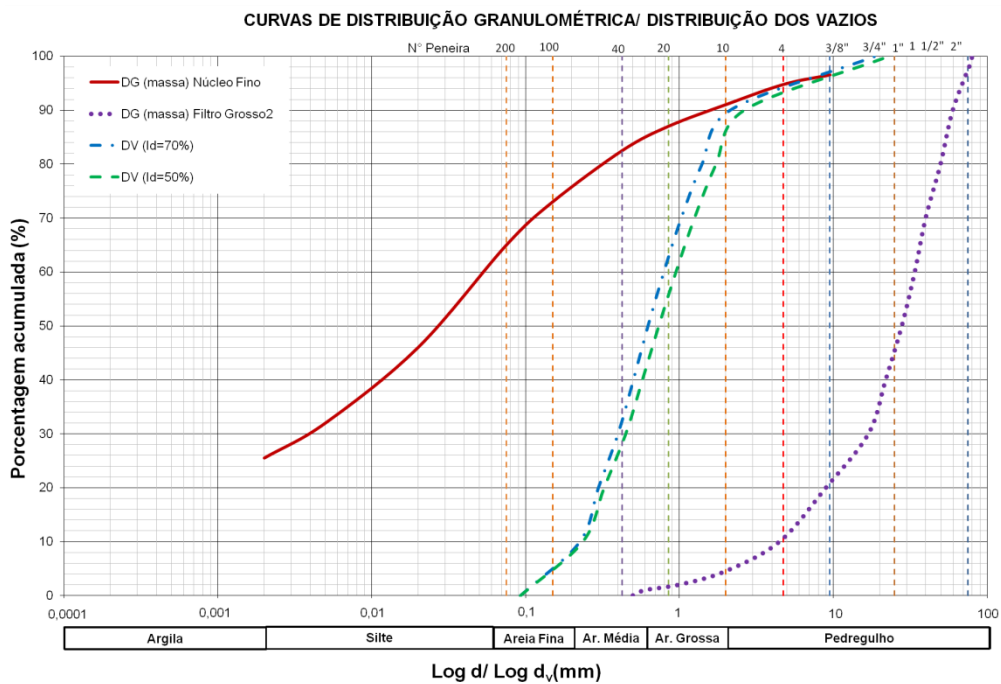


Figura 6.6 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 3 e 4 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Fino”)

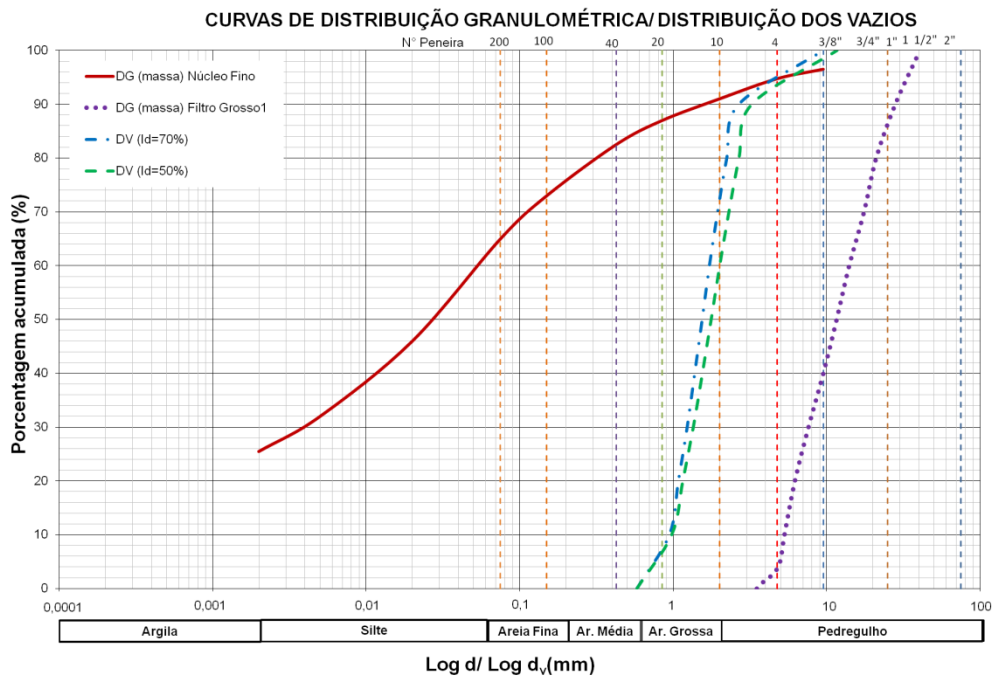


Figura 6.7 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 5 e 6 (amostras “Filtro Grosso1” e “Núcleo Fino”)

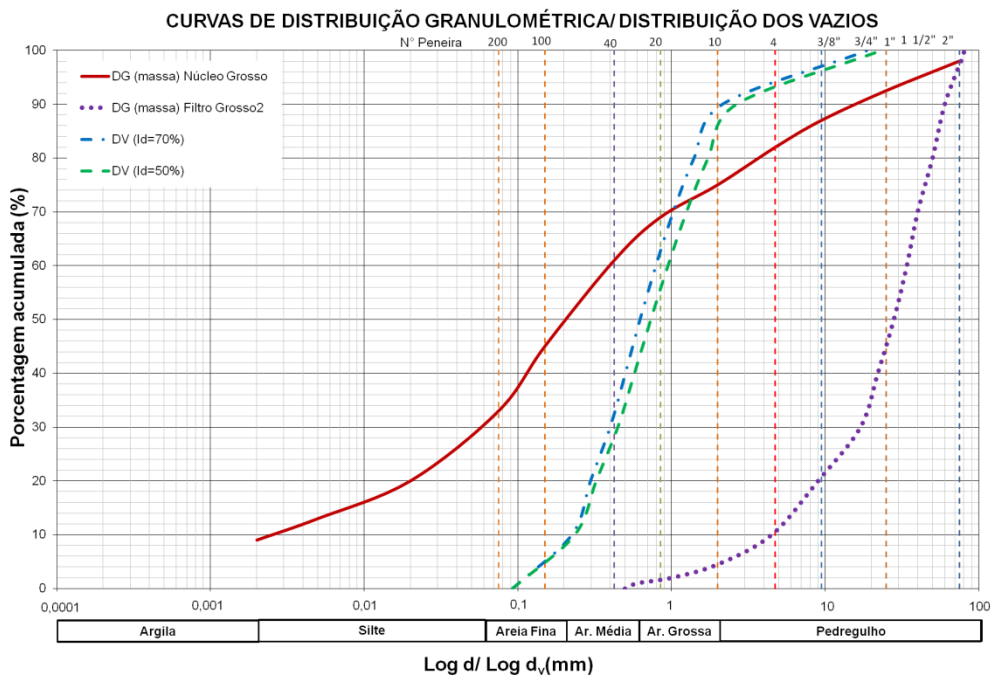


Figura 6.8 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 7 e 8 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Grosso”)

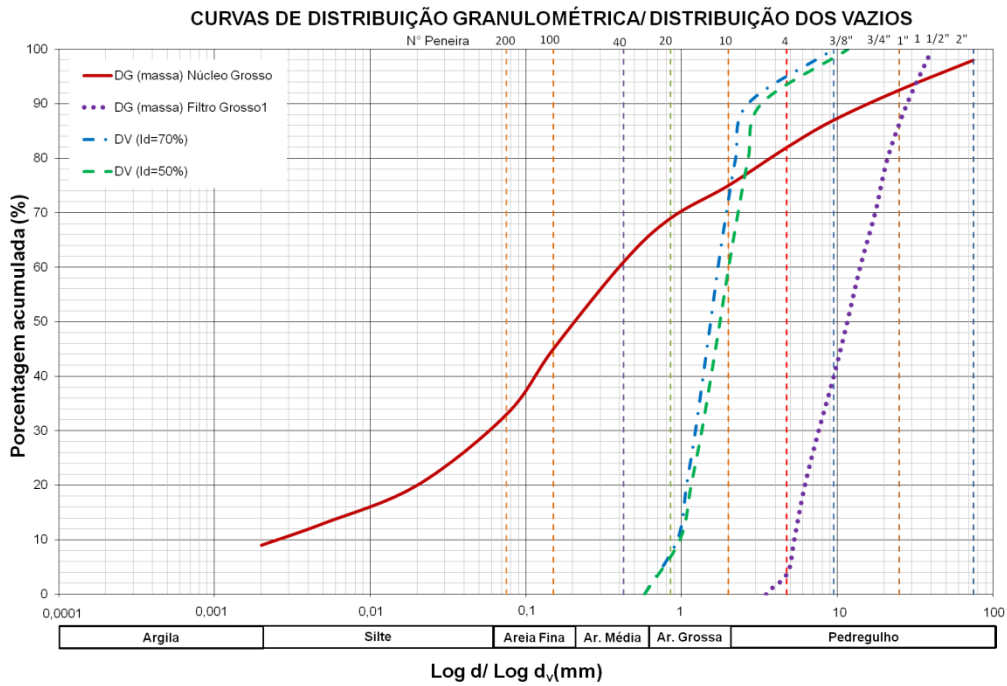


Figura 6.9 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 9 e 10 (amostras “Filtro Grosso1” e “Núcleo Grosso”)

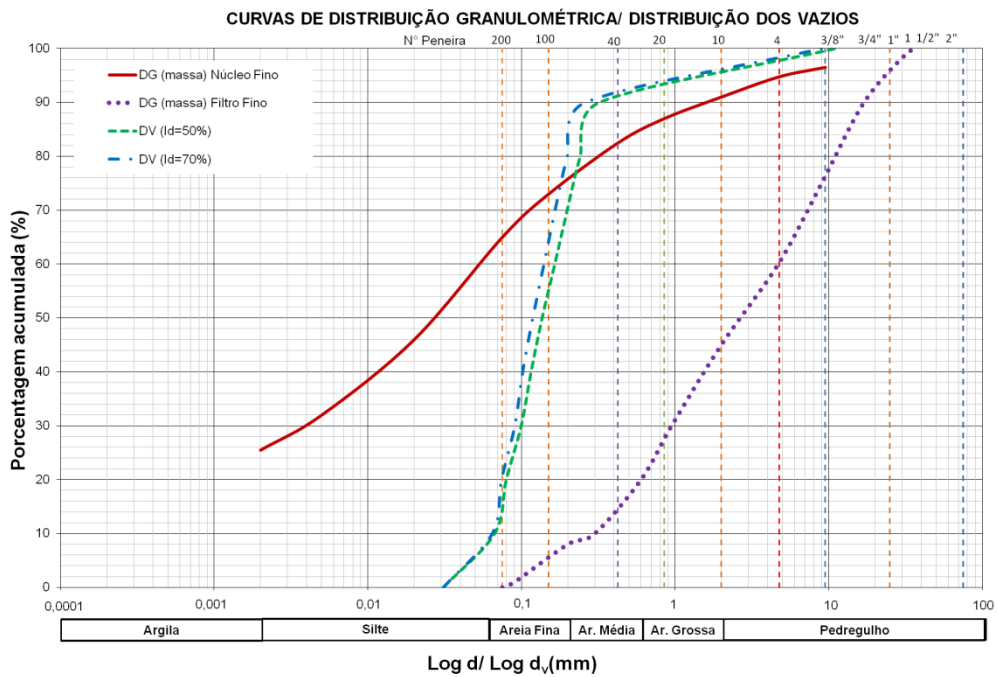


Figura 6.10 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenários 11 e 12 (amostras “Filtro Fino” e “Núcleo Fino”)

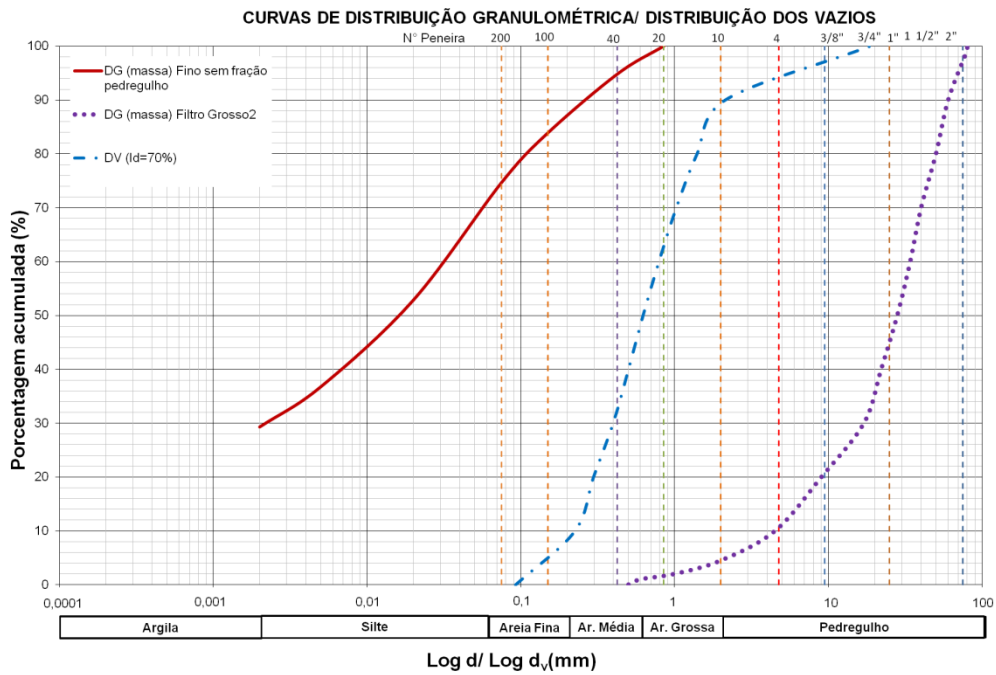


Figura 6.11 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 13 (amostras “Filtro Grosso2” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)

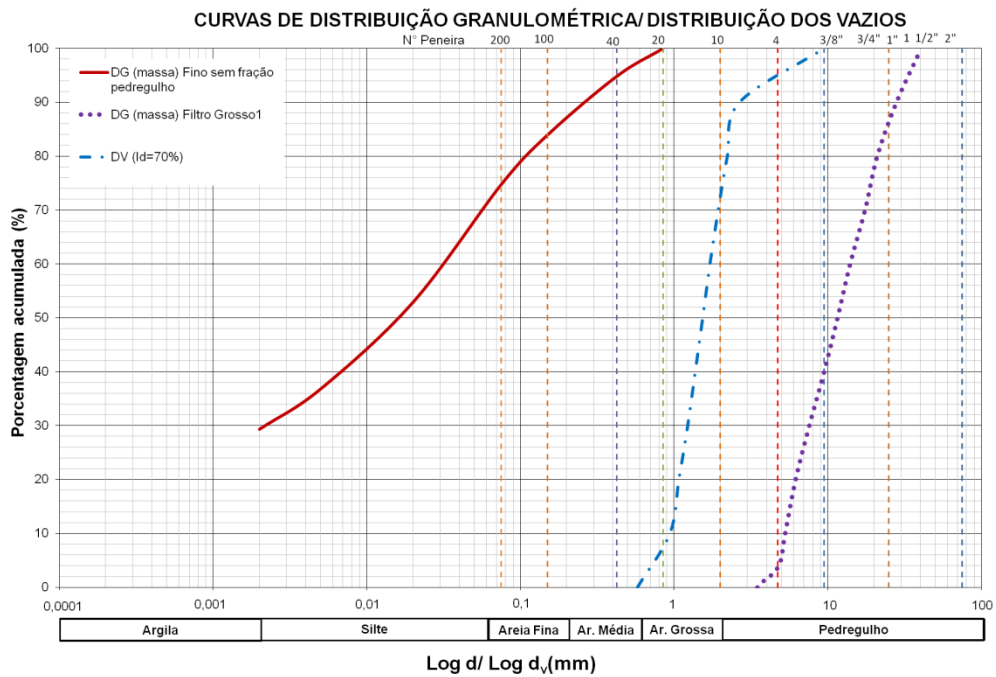


Figura 6.12 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 14 (amostras “Filtro Grosso1” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)

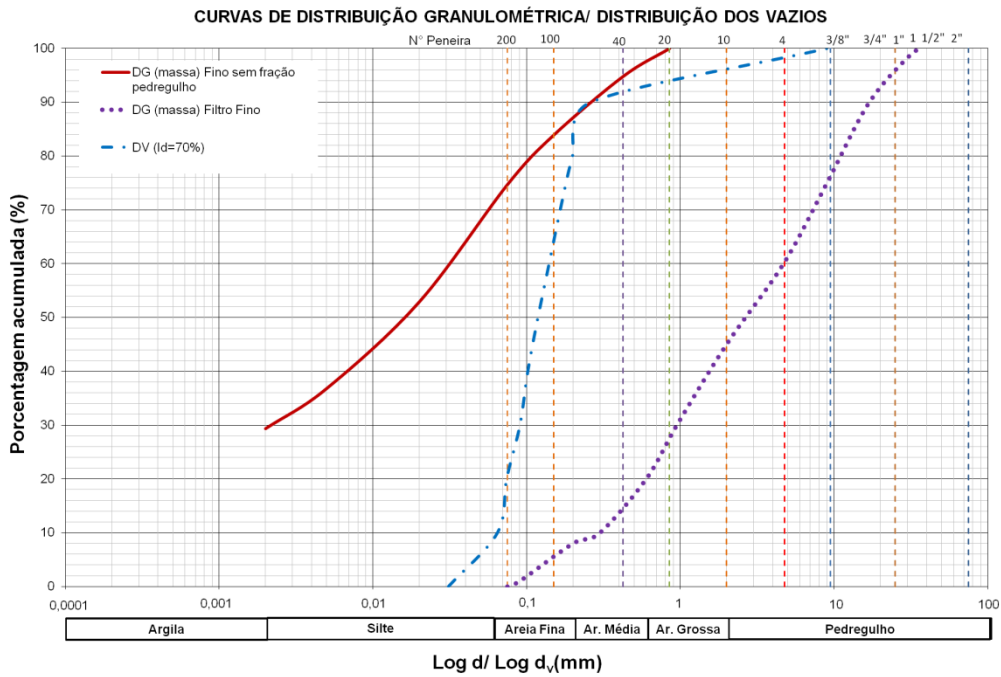


Figura 6.13 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 15 (amostras “Filtro Fino” e “Núcleo Fino sem fração pedregulho”)

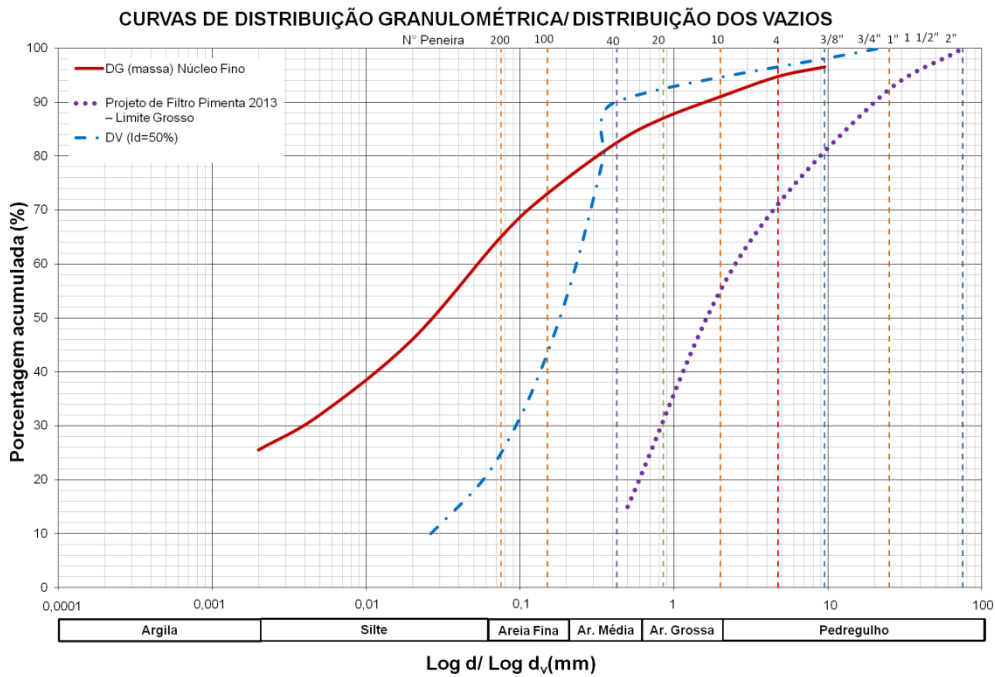


Figura 6.14 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 16 (amostras “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso” e “Núcleo Fino”)

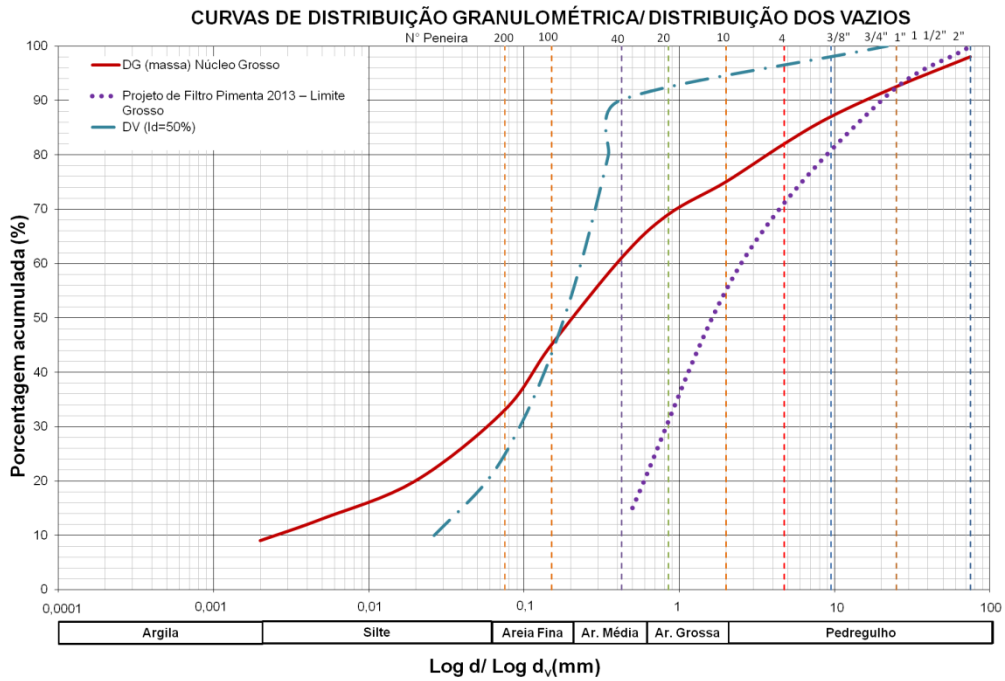


Figura 6.15 – Curvas granulométricas e porosimétricas – Cenário 17 (amostras “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso” e “Núcleo Grosso”)

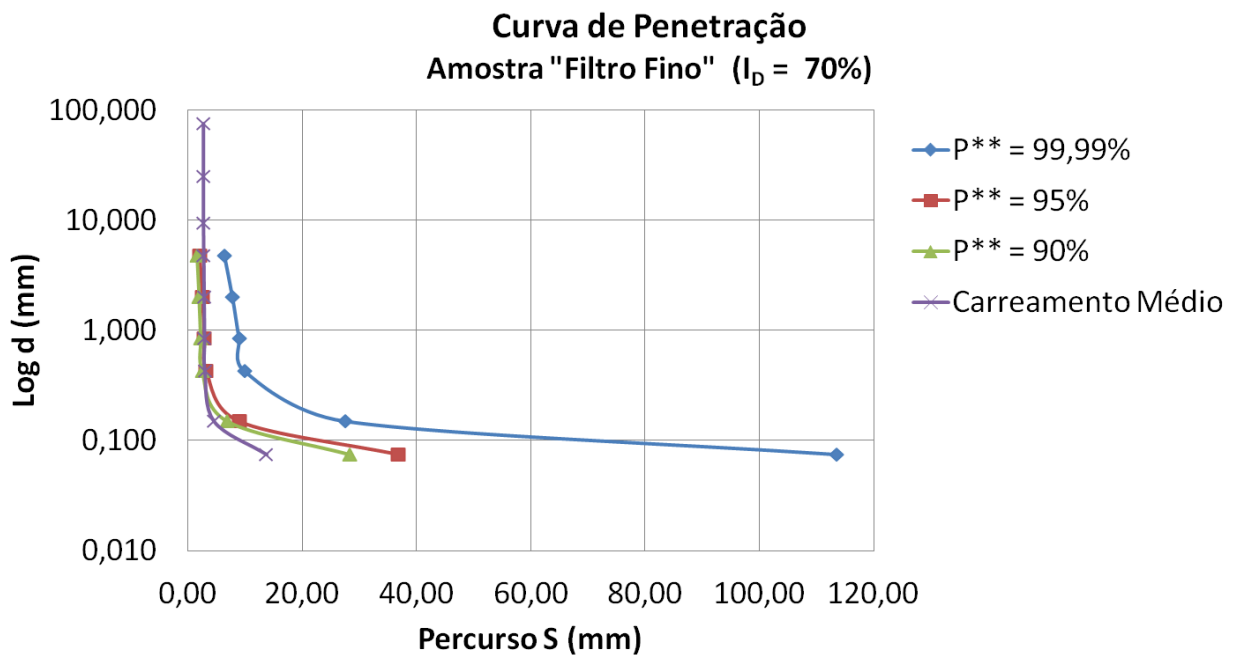


Figura 6.16 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Fino”, I_D = 70%

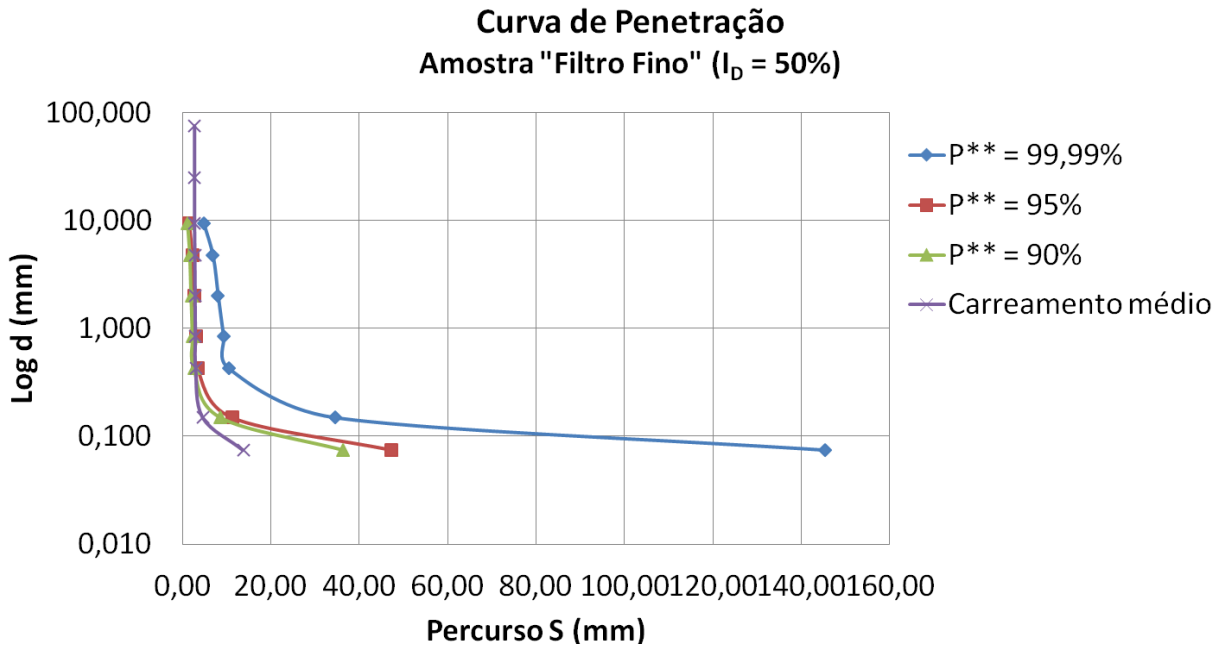


Figura 6.17 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Fino”, $I_D = 50\%$

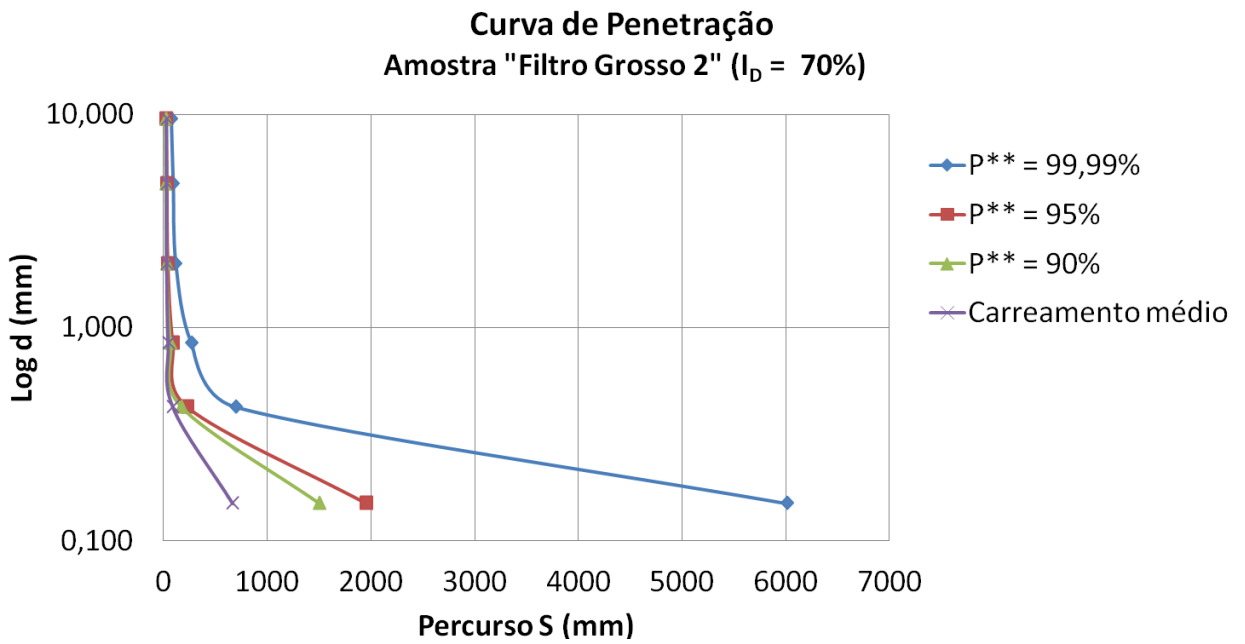


Figura 6.18 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso2”, $I_D = 70\%$

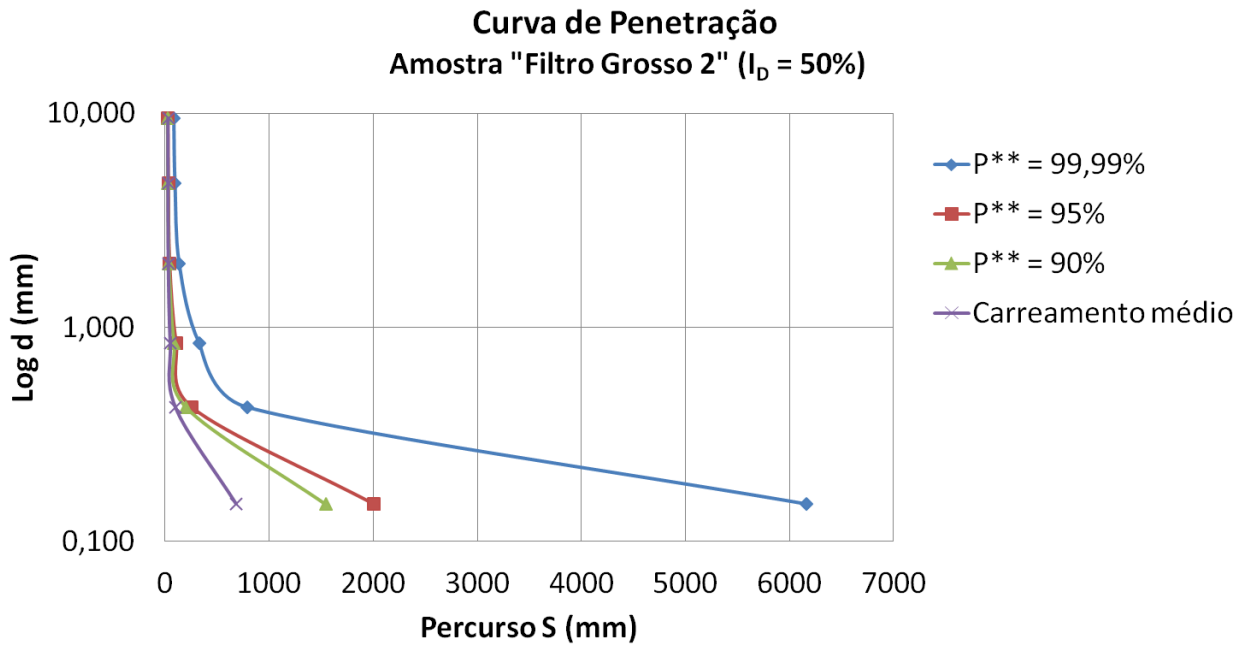


Figura 6.19 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso2”, $I_D = 50\%$

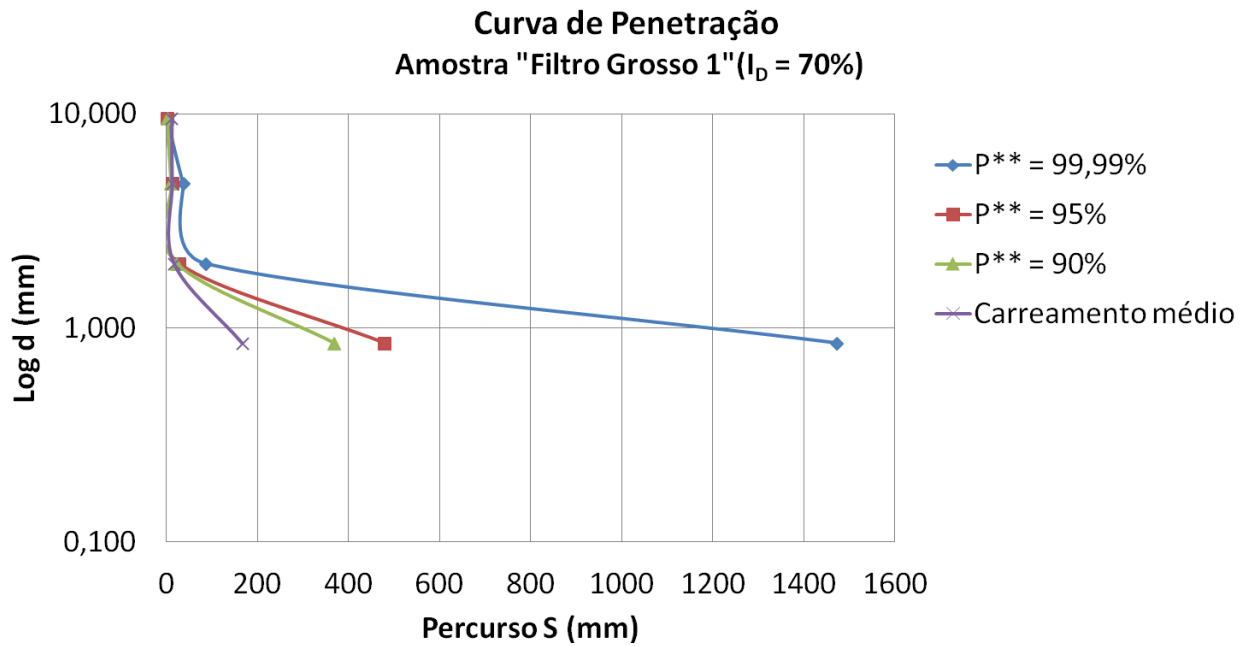


Figura 6.20 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso1”, $I_D = 70\%$

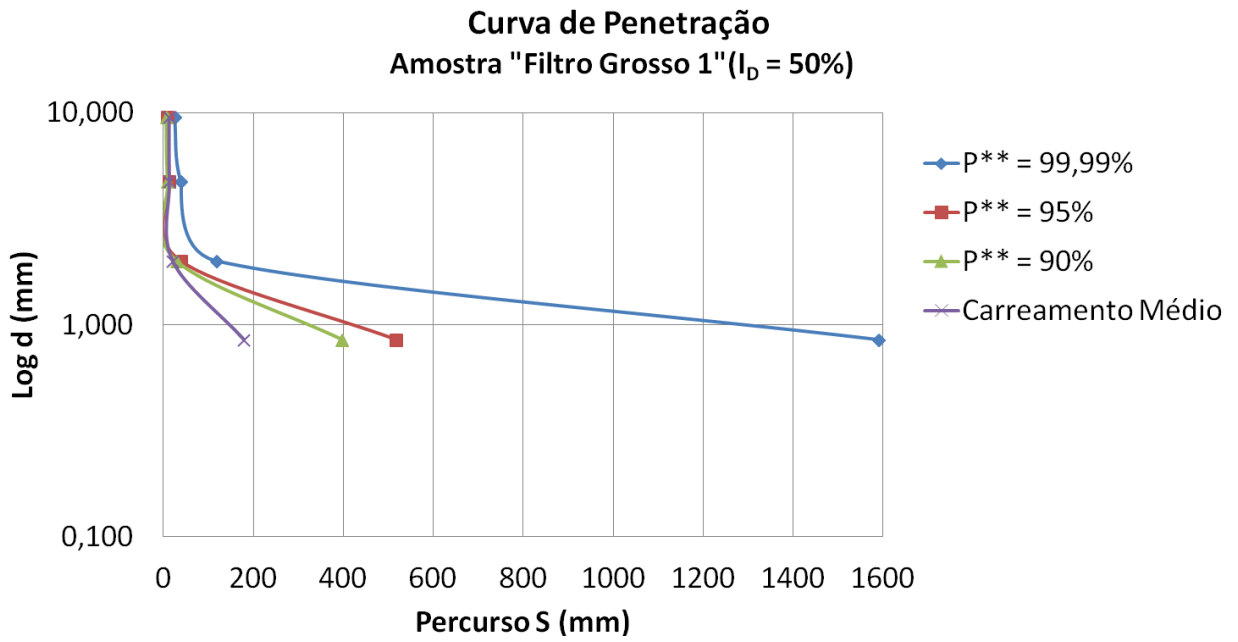


Figura 6.21 – Curvas de penetração – Amostra “Filtro Grosso1”, $I_D = 50\%$

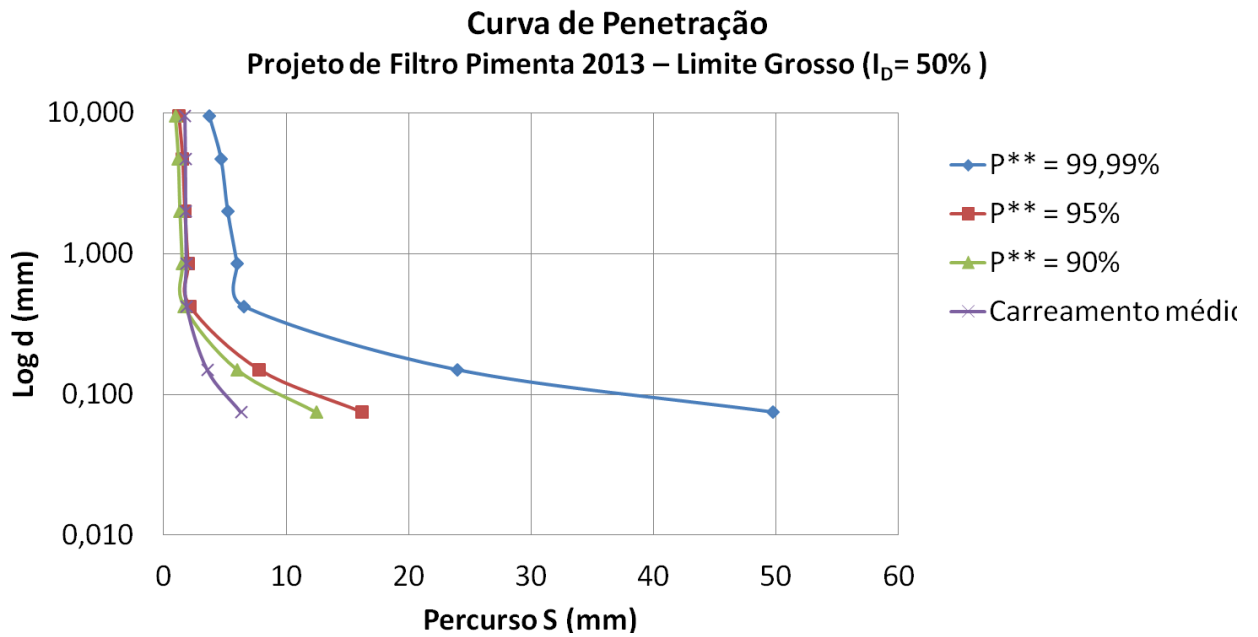


Figura 6.22 – Curvas de penetração – Amostra “Projeto de Filtro Pimenta 2013 – Limite Grosso”, $I_D = 50\%$

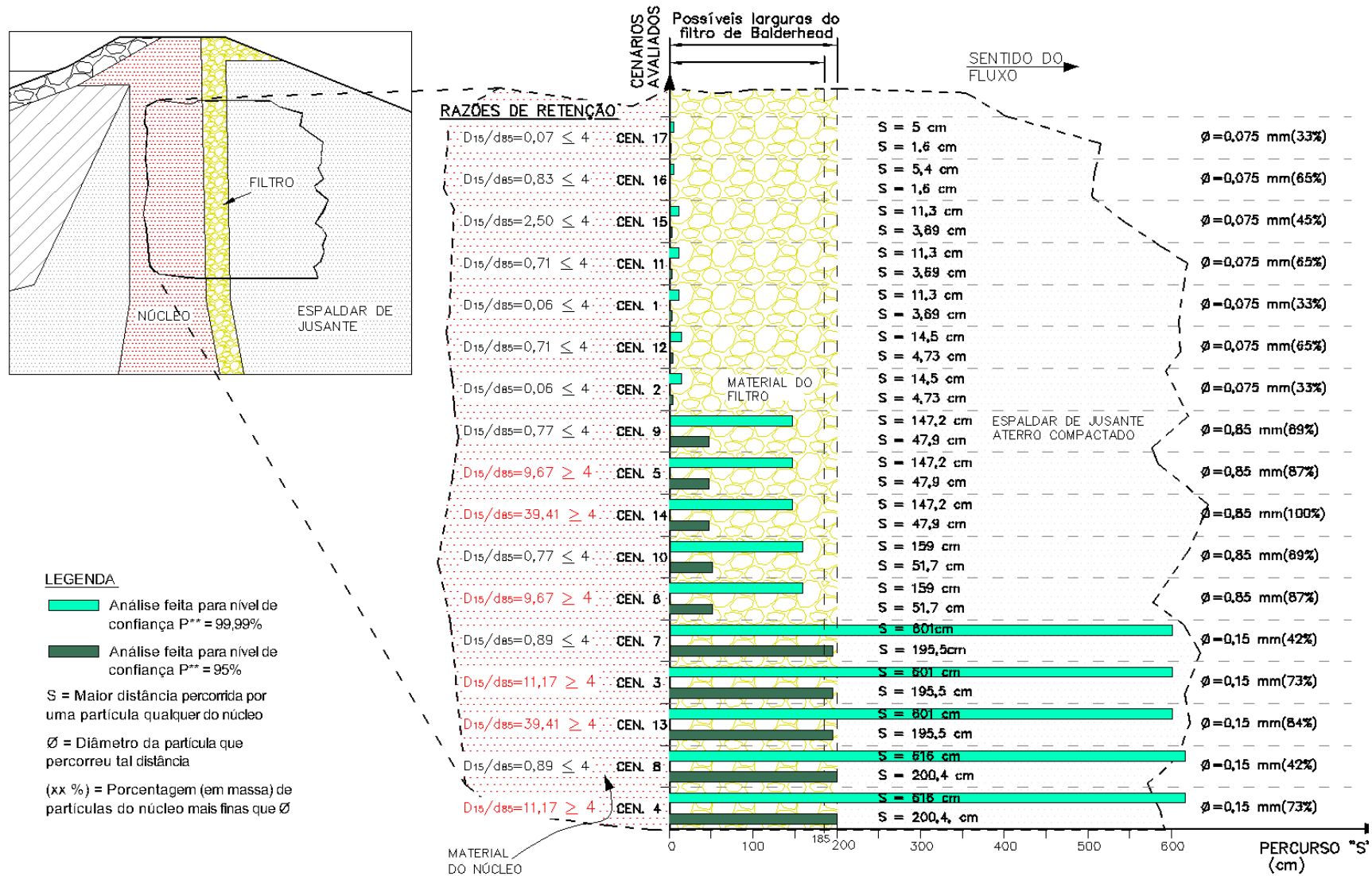


Figura 6.23 – Diagrama de Carreamento – representação gráfica dos carreamentos simulados e razões de retenção D_{15}/d_{85} para cada cenário

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados no Capítulo 6 permitem que sejam feitas as análises apresentadas nos itens 7.1 ao 7.3.

7.1 Verificação do Projeto de Filtro

A partir da Figura 6.2, pode-se fazer as análises sobre o material coletado do filtro da Barragem de Balderhead, bem como sobre o dimensionamento realizado para o mesmo na ocasião da elaboração do projeto da barragem, conforme apresentado nos tópicos a seguir.

- As amostras mais grosseiras do filtro de Balderhead (amostras “Grosso 1” e “Grosso 2”) apresentam granulometrias fora do limite estabelecido pelo projeto da barragem. Este fato indica que na obra da barragem foram utilizados materiais com granulometrias diferentes (e mais grosseiras) que as especificadas em projeto.
- Os limites estabelecidos pelo projeto original da Barragem de Balderhead correspondem a granulometrias mais grosseiras que os limites estabelecidos pelo dimensionamento feito neste trabalho, com base nas diretrizes apresentadas em NRCS (1994). Este fato sugere que, mesmo que fossem utilizados, na construção da barragem, materiais em conformidade com a faixa granulométrica especificada pelo projeto – ao contrário do que foi relatado no tópico anterior – o filtro de Belderhead poderia não ser eficaz frente aos materiais implantados do núcleo.
- Todas as amostras do filtro de Balderhead consideradas neste trabalho (amostras “Fino”, “Grosso 1” e “Grosso 2”) apresentam granulometrias fora da faixa estabelecida pelo dimensionamento feito neste trabalho (segundo critérios de NRCS, 1994), sendo estes materiais mais grosseiros que os recomendados.

Sobre o dimensionamento do filtro realizado neste trabalho, os critérios considerados (NRCS, 1994) foram verificados por meio de análises de carreamento, as quais indicaram boa eficácia da filtragem frente aos materiais do núcleo da Barragem, conforme apresentado no item 7.3. Para estas análises, foi considerada a curva granulométrica mais grossa dentre os limites estabelecidos neste dimensionamento, e um índice de densidade, I_D ,

igual a 50%. Nota-se que foi considerada a condição crítica deste projeto, tanto em termos de granulometria como da condição de compactação do material.

7.2 Análise da Estabilidade Interna do Núcleo

A Figuras 6.3 e 6.4 apresentam os valores calculados para as razões D_{15g}/d_{85f} para as amostras do núcleo da Barragem de Balderhead.

A partir dos resultados apresentados, pode-se dizer que as amostras fina e grossa do núcleo de Balderhead são instável e estável internamente, respectivamente, de acordo com a avaliação realizada por meio do critério de De Mello (1975)/ Sherard (1979).

Este fato indica que as partículas mais finas do núcleo da barragem de Balderhead estariam sujeitas a serem carregadas através das partículas mais grosseiras deste mesmo material, conforme constatação relatada por Vaughan e Soares (1982), fato que se configura como um processo de erosão interna e que possivelmente contribuiu para a ocorrência do *sinkhole* na crista da barragem.

7.3 Análises de Carreamento

A partir dos resultados apresentados no item 6.3, podem ser feitas as avaliações apresentadas nos itens 7.3.1 ao 7.3.4, a respeito das análises de carreamento realizadas para os diversos cenários considerados.

7.3.1 Condições Críticas – Cenários 3, 4, 7, 8 e 13

Para um nível de confiança $P^{**}=95\%$, as avaliações dos cenários 3, 4, 7, 8 e 13 indicaram carreamentos da ordem de 195 a 200 cm para a partícula mais fina do núcleo cujo percurso pôde ser calculado, conforme representado no diagrama de carreamento mostrado na Figura 6.23. Dentre estes resultados, destacam-se os obtidos para os cenários 3, 4 e 13, para os quais 73% a 84% das partículas do núcleo são mais finas que as partículas que apresentaram os carreamentos mencionados. Para estas partículas, as análises indicam carreamento “infinito”.

É importante destacar que o cenário 13, para o qual foi observada a situação mais desfavorável, corresponde a uma condição provável, haja vista a susceptibilidade do material do núcleo “Núcleo Fino” à instabilidade interna e o fato de que as partículas que compõem a fração pedregulho não participam do processo de filtragem.

Portanto, pode-se dizer que, para estes cenários, grande parte (aproximadamente 75% a 85%) das partículas do núcleo localizadas na interface solo-filtro seriam carreadas por percursos iguais ou maiores que a espessura do filtro de Balderhead, o que sugere uma elevada probabilidade de ocorrência de *piping* para tais cenários, independentemente da possibilidade de ocorrência de fratura hidráulica no núcleo da barragem, fato constatado nos trabalhos de Vaughan et al. (1970) e Vaughan e Soares (1982).

Cabe ressaltar que tal conclusão não indica que não houve fratura hidráulica, e sim que o evento de erosão interna poderia ter ocorrido independentemente da ocorrência desse tipo de fenômeno.

Com relação à eficácia do sistema de drenagem, de modo geral, é importante destacar que, uma vez que os carreamentos observados têm valores próximos aos da espessura do filtro, é possível que, mesmo que ocorresse a estabilização do carreamento, a capacidade drenante do mesmo fosse comprometida, o que provavelmente conduziria a problemas de aumento de proressão no maciço da barragem, podendo levar à instabilização da mesma num segundo momento.

7.3.2 Avaliação do Projeto de Filtro – Cenários 16 e 17

De forma independente das análises feitas para o filtro da Barragem de Balderhead, visando apenas uma verificação dos critérios utilizados para dimensionamento do filtro neste trabalho (NRSC, 1994), o limite mais grosso ($I_D = 50\%$), definido nesta etapa como filtro para as amostras do núcleo da barragem, foi avaliado sob a ótica da distribuição de vazios e do carreamento passível de ocorrer através do mesmos.

Conforme observado na Tabela 6.3 e na Figura 6.23, foram calculados carreamentos máximos pequenos, da ordem de 2 a 5 cm (para níveis de confiança de 95% e 99,99%, respectivamente), para estes cenários, o que se faz coerente, visto que tais metodologias de dimensionamento de filtros apresentam boa aceitação na engenharia geotécnica desde os trabalhos de Terzaghi (1926).

7.3.3 Influência da compactação do filtro (Índice de Densidade I_D)

Este trabalho não contou com informações sobre a compactação do filtro da Barragem de Balderhead, tendo sido os valores de índice de densidade inferidos. Conforme mencionado no item 4.2.4, para as análises de carreamento, foram adotados os índices de densidade, I_D , de 50% e 70% para os materiais do filtro da barragem de Balderhead. Tais condições de compactação foram adotadas pelo autor desta dissertação por corresponderem, com razoável representatividade, aos estados “denso e fofo reais”, ou seja, aos valores de I_D extremos entre os geralmente observados em obras de filtros em barragens.

Para estes valores adotados, notou-se que a variação deste aspecto não acarreta grandes variações nos percursos das partículas do núcleo, sendo a ordem de grandeza mantida. Cabe ressaltar que esta conclusão não deve ser estendida para as demais situações da engenharia de barragens, devendo ser associada ao caso específico da Barragem de Balderhead. Análises devem ser realizadas para cada situação e projeto específico.

Embora tal ressalva deva ser feita, a conclusão sobre a eventual baixa influência do índice de densidade sobre as curvas de penetração, em uma análise de carreamento, apresenta razoável convergência em relação aos relatos de Schuler (1996) e Giroud (1996), conforme apresentado nos itens 3.9.4 desta dissertação.

7.3.4 Razão de retenção D_{15}/d_{85} e influência da fração pedregulho no processo de filtragem

Pela análise do diagrama de carreamento (Figura 6.23), pode-se observar, de um modo geral, uma boa correlação entre os carreamentos determinados e os valores da razão de retenção D_{15}/d_{85} , para cada cenário avaliado.

Para as análises 1, 2, 11, 12, 15, 16, 17, as combinações núcleo-filtro apresentaram carreamentos pequenos (ou seja, rápida estabilização do filtro) e valores para a razão de retenção D_{15}/d_{85} menores ou iguais a quatro, indicando a eficácia do filtro;

Para as análises 3, 4 e 13, as combinações núcleo-filtro apresentaram carreamentos próximos ou maiores que a largura do filtro de Balderhead (ou seja, não houve estabilização do filtro) e valores para a razão de retenção D_{15}/d_{85} maiores que quatro, indicando que o filtro não é eficaz;

Para as análises 7 e 8, as combinações núcleo-filtro apresentaram carreamentos próximos ou maiores que a largura do filtro de Balderhead (ou seja, não houve estabilização

do filtro) e valores para a razão de retenção D_{15}/d_{85} menores que quatro, sugerindo que o filtro fosse eficaz. Esta incoerência se justifica pela presença de pedregulhos na granulometria do “Núcleo Grosso”, as quais não participam do processo de filtragem e, portanto, não devem ser consideradas na curva granulométrica a partir da qual será calculado o d_{85} – conforme recomendado no procedimento apresentado por NRCS (1994), no item 3.8.2, para materiais que contenham partículas maiores que 4,75 mm.

A importância da consideração deste aspecto se mostra evidente ao se avaliar os carregamentos e razões de retenção calculados para as análises 3 e 4 (combinações “Núcleo Fino x Filtro Grosso 2”); e 13 (combinação “Núcleo Fino sem pedregulho x Filtro Grosso 2”). As análises indicam carregamentos similares para estes cenários, no entanto valores da razão D_{15}/d_{85} bem distintas, embora ambas com valores maiores que quatro.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

8.1 Conclusões

8.1.1 Revisão Bibliográfica

- Processos de erosão interna são causa de cerca de metade das rupturas de barragens observadas no mundo. Em vista do exposto, problemas relacionados a estes fenômenos devem ser tratados com especial cautela, tanto nas etapas de projeto, quanto durante a execução das obras e a operação das barragens.
- É de extrema importância, sobretudo no monitoramento das barragens, seja em inspeções de rotina ou em auditorias de segurança, o conhecimento sobre os mecanismos e as fases de um processo de erosão interna. O bom entendimento desses aspectos facilita a constatação e a classificação de eventuais anomalias, bem como permite que sejam tomadas as ações adequadas para a mitigação do problema e/ou prevenção de outros maiores.
- O dimensionamento de filtros, em um projeto, não deve ser realizado de modo automático, com base apenas nos procedimentos estabelecidos pelos critérios praticados na engenharia. É necessária uma análise crítica sobre as etapas do projeto, devendo ser levados em consideração aspectos como: a disponibilidade de materiais no sítio das obras e a sua seleção após análises técnicas criteriosas; a forma das curvas granulométricas e a eventual susceptibilidade à instabilidade interna dos materiais; as características mineralógicas dos materiais.
Além destes aspectos, destaca-se a importância de cuidados especiais durante a execução das obras, tanto no que se refere aos procedimentos executivos nas atividades de preparação, lançamento e compactação dos materiais, quanto no controle tecnológico dos materiais e serviços.
- O problema da filtragem, seja quanto ao dimensionamento ou quanto à avaliação de desempenho, é geralmente abordado em termos de diâmetros característicos dos materiais do solo base e do filtro. Embora os critérios usualmente aplicados para o dimensionamento de filtros com base em tal premissa sejam considerados satisfatórios, estes foram estabelecidos com base em resultados de ensaios de

laboratórios e não contam com base teórica que permita avaliar qual é o carreamento das partículas do solo base através dos vazios formados entre os grãos de um filtro.

- A partir da metodologia geométrico-probabilística proposta por Silveira (1964), é possível uma análise teórica mais racional sobre o carreamento de partículas de um solo base através de vazios formados entre os grãos de um filtro. Esta metodologia geométrico-probabilística permite determinar os percursos percorridos pelas partículas do solo base até encontrar um vazio no filtro com dimensão tal que restrinja seu transporte.
- Silveira (1964) relatou que as análises em termos das distribuições de vazios podem ser aplicadas até mesmo para materiais de base com a parte fina muito fina (estado coloidal).
- Conforme proposto por Humes (1995), a consideração da distribuição granulométrica em termos das áreas superficiais das partículas é a forma mais adequada de se determinar a distribuição dos vazios de um material. Tal hipótese confere bons resultados inclusive para materiais bem graduados, para os quais a hipótese de Silveira (1964) apresenta limitações.
- A partir da formulação proposta por Locke et al. (2001), é possível determinar a distribuição de vazios de um material para diferentes estados de compactação do mesmo, ou seja, para quaisquer índices de densidade, I_D , e não apenas para os estados extremos fofo e denso, conforme metodologia de Silveira (1964).
- Raut e Indraratna (2008) estabeleceram o critério de dimensionamento de filtro $d_{v35}/d_{85}^* \leq 1$, o qual se baseia nos seguintes parâmetros fundamentais em um

processo de filtragem: diâmetros das partículas; coeficiente de uniformidade, C_u ; e a distribuição de vazios e índice de densidade, I_D , do filtro. Tal critério foi validado por meio da realização de uma série de ensaios de laboratório e análises, tendo sido considerado eficaz para diferentes combinações solo-filtro. Apesar da eficiência verificada, os autores ressaltaram que este critério deve ser utilizado em conjunto – e não em substituição – com os critérios usualmente aplicados na prática da engenharia de solos.

8.1.2 Estudo de Caso

- O critério utilizado para o dimensionamento do filtro da Barragem de Balderhead foi inadequado, resultando em curvas limites mais grosseiras que as determinadas de acordo com os critérios praticados pela engenharia nos dias atuais.
- Pode-se dizer que o critério de dimensionamento / avaliação de filtros utilizado neste trabalho – procedimento apresentado em NRCS (1994), referenciado em ICOLD (1994) como um dos critérios recomendados para o projeto de filtros de barragens – é adequado para o caso da Barragem de Balderhead, haja vista os resultados das análises de carreamento realizadas sobre o limite mais grosseiro da faixa granulométrica determinada no dimensionamento. Estas análises indicaram carreamentos reduzidos das partículas do núcleo da barragem.
- As análises de carreamento realizadas indicaram carreamentos excessivos das partículas do núcleo da Barragem de Balderhead para os cenários mais críticos avaliados, podendo-se considerar a ocorrência de processos de erosão interna como provável para esses casos, condição que se mostra em concordância com o evento de *piping* observado na barragem.
- Embora os relatos feitos em trabalhos que avaliaram o caso da Barragem de Balderhead indiquem a ocorrência de fratura hidráulica no núcleo da mesma, as análises apresentadas neste trabalho indicam que se poderia esperar a ocorrência do processo de *piping* na barragem independentemente da ocorrência da fratura hidráulica.
- Em se considerando as razões de retenção D_{15}/d_{85} determinadas para os diversos cenários avaliados, pode-se verificar a boa correlação do Critério Clássico de Terzaghi com os resultados obtidos nas análises de carreamento realizadas. Desta avaliação, pode-se concluir também sobre o fato de que as partículas mais grosseiras do solo base não participam do processo de filtração e que é imprescindível que esta fração seja desconsiderada da curva granulométrica deste material quando das análises para a elaboração de projetos de filtros.
- Quanto à influência da compactação do filtro sobre os percursos percorridos pelas partículas do núcleo, notou-se que a variação deste aspecto não acarreta grandes variações nos percursos das partículas do núcleo, sendo a ordem de grandeza mantida. Cabe ressaltar que esta conclusão não deve ser estendida para as demais situações da engenharia de barragens, devendo ser associada ao caso específico da Barragem de

Balderhead. Embora tal ressalva deva ser feita, a conclusão sobre a eventual baixa influência do índice de densidade sobre as curvas de penetração, em uma análise de carreamento, apresenta razoável convergência em relação aos relatos de Schuler (1996) e Giroud (1996), conforme apresentado nos itens 3.9.4 desta dissertação.

8.2 Sugestões para Estudos Futuros

A seguir estão apresentadas algumas sugestões para estudos futuros relacionados ao tema discutido neste trabalho:

- Realizar análises de carreamento com base na distribuição de vazios para outros casos reais que apresentaram ou não problemas relacionadas à erosão interna.
- Realizar análises de carreamentos que levem em consideração as mudanças das características granulométricas do solo base e do filtro ao longo do processo de filtragem e comparar com resultados de ensaios de laboratório.
- Verificar, a partir de análises de carreamentos e ensaios de laboratório, a viabilidade de utilização de materiais de filtro considerados inadequados de acordo com o critério de retenção de Terzaghi. Estes filtros podem se mostrar eficientes quando se adota uma espessura maior que as convencionalmente praticadas. Tal análise deverá ser feita em etapas, considerando-se a variação progressiva da granulometria e da distribuição dos vazios dos materiais de filtro, em função dos carreamentos calculados, de modo a se determinar a espessura do filtro para a qual se obtém estabilização do transporte de partículas do material base e uma quantidade aceitável de material base carreado, indicando a viabilidade do filtro.
- Avaliar a influência do índice de densidade, I_D , de filtros sobre o processo de filtragem para outros casos de estudo, inclusive os de barragens cujos sistemas de filtros estejam dimensionados de forma adequada.
- Avaliar a influência da variação do estado de tensões sobre as dimensões dos vazios de um filtro, visando verificar a condição real de tensões às quais os filtros de barragens de grande porte estão submetidos e a possível redução de carreamentos e da permeabilidade dos materiais em função da profundidade em que os mesmos se localizam na barragem.
- De modo similar ao realizado por Raut e Indraratna (2008), determinar curvas de penetração e realizar ensaios de carreamento em laboratório para diversas

combinações de solo e filtro, com materiais de variados coeficientes de uniformidade. Com base na curva de penetração aferida pelos ensaios, determinar critério de filtro alternativo em função dos trechos das curvas a partir dos quais se observam grandes aumentos de carreamento para pequenas reduções no diâmetro das partículas do solo base.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro, 1990. 6 p.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro, 1991. 14 p.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502: Terminologia – Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.
- 5 CEDERGREN, H. R. *Seepage requirements of filters and pervious bases*. ASCE – Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. vol. 86. SM 5. out. 1960.
- 6 CEDERGREN, H. R. *Seepage, drainage and Flow Nets*. John Wiley & Sons, New York, 2nd Ed. 1977.
- 7 BERTRAM, G. E. *An experimental investigation of protective filters*. Soil Mechanics, Series No. 7, Publication No. 267, Graduate School of Engineering, Harvard University. Cambridge, MA, 1940. 1-21 p.
- 8 DAS, B. M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Editora Thomson, 2007.
- 9 DE MELLO, V. F. B. *Some lessons from unsuspected, real, and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil*. 6th African CSMFE, Durban, 2. 1975. 285-302 p.
- 10 DE MELLO, V. F. B. *Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams*. Geotechnique, vol. 27, no.3, 1977. 279-355 p.
- 11 ESPÓSITO, T. J. *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico*. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília: UnB, 2000. 363 p.
- 12 FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. *Geotechnical engineering of dams*. Balkema Publishers, Leiden, Netherlands, 2005.
- 13 FELL, R.; FRY, J.J. *The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations*. In: Internal Erosion of Dams and their Foundations. London. 2007. 1-24 p.
- 14 FELL, R.; FOSTER, M.; CYGANIEWICZ, J.; SILLS, G.; VROMAN. N.; DAVIDSON, R. *A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. Draft Guidance Document. aug. 2008.
- 15 FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). *Filters for embankment dams – best practices for design and construction*. 2011.
- 16 FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. *Analysis of embankment dam incidents UNICIV*. Report n°. R-374, September 1998.. The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia. 282 p. 1998.
- 17 FOSTER, M.; FELL, R. *A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods*. UNICIV Report n°. R377. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. 1999.
- 18 FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. *The statistics of embankment dam*

- failures and accidents*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, No.5, National Research Council Canada, Ottawa, out. 2000. 1000-1024 p.
- 19 FOSTER, M.; FELL, R. *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 127(5), 2001. 398-407 p.
 - 20 FULLER, W. B.; THOMPSON, W. E. *The laws of proportioning concrete*. Transactions on American Society of Civil Engineers. Vol. 59. 1907.
 - 21 GARDONI, M. G. A. *Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão*. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D-003A/2000. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000. 313 p.
 - 22 GIROUD, J. *Granular filters and geotextile filters*. Proceedings of Geofilters '96, LAFLEUR, J. & ROLIN, AL. (editors), Bitech Publications, Montreal, 1996. 565-680 p.
 - 23 HONJO, Y.; VENEZIANO, D. *Improved filter criterion for cohesionless soils*. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 115, no. 1, 1989. 75-94 p.
 - 24 HUMES, C. *Considerações sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção de obras geotécnicas*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1995. 209 p.
 - 25 HUMES, C. *A new approach to compute the void-size distribution curves of protective filters*, Proceedings of Geofilters'96. LAFLEUR, J. & ROLIN, AL. (editors). Bitech Publications: Montreal, 1996. 21-34 p.
 - 26 INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Embankment Dams – Granular Filters and Drains*. Bulletin N° 95, 1994.
 - 27 INDRARATNA, B.; VAFAI, F.; DILEMA, E. *An experimental study of the filtration of a lateritic clay slurry by sand filters*. Proceedings of the Institution of Civil Engineering - Geotechnical Engineering, vol. 119, no 2. 1996. 75-83 p.
 - 28 INDRARATNA, B.; VAFAI, F. *Analytical model for particle migration within base soil – filter system*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 123, no.2, 1997. 100-109 p.
 - 29 INDRARATNA, B.; Locke, M. *'Analytical modelling and experimental verification of granular filter behaviour', keynote paper, filter and drainage in geotechnical and geoenvironmental engineering*. WOLSKI, W. & MLYNAREK, J. (editors): Balkema, Rotterdam, 2000. 3-26 p.
 - 30 INDRARATNA, B.; RAUT, A. K. *Enhanced criterion for base soil retention in embankment dam filters*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 132, no.12, 2006. 1621-1627 p.
 - 31 INDRARATNA, B.; RAUT, A. K.; KHABBAZ, H. *Constriction-based retention criterion for granular filter design*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 2007. 266-276 p.
 - 32 ISTOMINA, V. S. *Filtration stability of soils*. Gostroizdat, Moscow, 1957.
 - 33 KENNEY, T. C.; LAU, D. *Stability of particle grading of compacted granular filters*. Dept. of Civil Eng. , University of Toronto. 1984. 23p.
 - 34 KENNEY, T. C.; LAU, D. *Internal stability of granular filters*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, no.2, 1985. 215-255 p.
 - 35 KENNEY, T. C.; CHAHAL, R.; CHIU, E.; OFOEGBU, G. I. *Controlling constriction sizes of granular filters*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, no.1, 1985. 32-43 p.
 - 36 KENNEY, T. C.; LAU, D. *Closure to internal stability of granular filters*. Canadian Geotech. J., Vol. 23, 1986. 420-423 p.

- 37 LAFLEUR, J. *Filter testing of broadly graded cohesionless tills*. Canadian. Geotech. J., 21, 1984. 634-643 p.
- 38 LAFLEUR, J.; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. *Filtration of broadly graded cohesionless soils*. J. Geotech. Engrg., 115(12), 1989. 1747-1768 p.
- 39 LOCKE, M.; INDRARATNA, B.; ADIKARI, G. *Time-dependent particle transport through granular filters*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127, 2001. 521 p.
- 40 LUBOCHKOV, E. A. *The calculation of suffosion properties of noncohesive soils when using*. Czechoslovakia, 1969. 135-148 p.
- 41 MIDDLEBROOKS, T. A. *Earth-dam Practice in United States*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Centennial Volume, 1953. 697-721 p.
- 42 MUSSO, A. ; FEDERICO, F. *Un método geométrico-probabilístico per la verifica dei filtri*. Rivista Italiana di Geotecnica, anno XVII, 4, 1983. 177-193, p.
- 43 MUSSO, A. ; FEDERICO, F. *Pore size distribution in filtration analysis*. XI ICSMFE, San Francisco, III. 1985. 1207-1212, p.
- 44 NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICES. *Gradation design of sand and gravel filters*. Part 633 National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture, Washington, DC, 1994.
- 45 RAUT, A. K.; INDRARATNA, B. *Constriction size distribution of a non-uniform granular filter*. Proceedings of the 15th South East Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand, 2004. 409-414 p.
- 46 RAUT, A. K.; INDRARATNA, B. *Further advancement in filtration criteria through constriction-based techniques*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, vol. 134, n. 6, 2008. 883-887 p.
- 47 RAUT, A. K. *Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design criteria*. PhD thesis, University of Wollongong, 2006.
- 48 SCHULER, U.; BRAUNS, J. *Behavior of coarse and well-graded filters*. in: Brauns, Heibaum, Schuler (Hrsg): Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 49 SCHULER, U. *Scattering of the composition of soils: an aspect for the stability of granular filters*. Proceedings of Geofilters '96. Lafleur, J. & Rolin, AL. (editors): Bitech Publications, Montreal, 1996. 21-34 p.
- 50 SHERARD, J. L. *Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils*. In: 113th Int. Congress on Large Dams, New Delhi. Q47, R2. International Commission on Large Dams, Paris, 1979. 325-334 p.
- 51 SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. *Basic properties of sand and gravel filters*. In: Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 110, 1984. 684-700 p.
- 52 SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. *Filters for silts and clays*. In: Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 110, 1984. 701-718 p.
- 53 SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P. *Critical filters for impervious soils*. In: Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol.115, No.7, 1989. 927-947 p.
- 54 SILVEIRA, A. *Algumas considerações sobre filtros de proteção - Uma Análise do Carreamento*. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 1964.
- 55 SILVEIRA, A. *An analysis of the problem of washing through in protective filters*. Proc. Of 6th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., Montreal, Canada, 1965. 551-555 p.
- 56 SILVEIRA, A. *Considerações sobre a distribuição dos vazios em solos granulares*.

- III COBRANSEF, Belo Horizonte. 1966.
- 57 SILVEIRA, A.: *A method for determining the void size distribution curve for filter materials*. Proc. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Rotterdam, 1993. 71-73 p.
- 58 SILVEIRA, A.; PEIXOTO, J. T. L.; NOGUEIRA, J. B. *On void-size distribution of granular materials*. Proc. Of the 5th Pan American Conf. On Soil Mech. And Found. Eng., Buenos Aires, Argentina, 1975. 160-167 p.
- 59 SÓRIA, M.; ARAMAKI, R.; VIVIANI, E. *Experimental determination of void sizes curves*. Proc. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Rotterdam, 1993. 42-48 p.
- 60 TAVENAS, F.; ROCHELLE, P. *Accuracy of relative density measurements*. Géotechnique, 22: 1972. 549-562 p.
- 61 TERZAGHI, K. *Soil physical basis of mechanics of earth structures*. F. Deuticke, Wien. 1926.
- 62 TRANI, L. D. *Application of constriction size based filtration criteria for railway subballast under cyclic conditions*. Tese de Doutorado, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2009.
- 63 TSUTYIA, A. M. *Estudo da distribuição de vazios de materiais granulares bem graduados e a sua aplicação a filtros de proteção*. Tese de doutoramento. EESC-USP. 1987. 240 p.
- 64 UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. *The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters*. Earth Laboratory Report nº EM-425. 1955. 12 p.
- 65 UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Investigation of filter requirements for underdrains*, US Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Technical Memorandum. No. 183-1. 1941.
- 66 UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Filter experiments and design criteria*. Waterways Experiment Station United States Corps of Engineers, Vicksburg, Technical Memorandum nº. 3-360, 1953. 52 p.
- 67 UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Engineering and design - seepage analysis and control for dams*. EM-1110-2-1901, set, 1986.
- 68 UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Soil mechanics*. Note nº. 1. Soil Conservation Service. Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters, jan, 1986.
- 69 UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION. *Design standards, embankment dams*. nº 13, Chapter 5, Protective Filters. 1987.
- 70 UNIVERSIDADE DE BRASILIA. *Terminologia, simbologia e unidades*. 24 p. 1998.
- 71 VAUGHAN, P. R.; SOARES, H.F. *Design of filters for clay cores of dams*. In: Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers. Vol. 108, GT1, 1982. 17-32 p.
- 72 VAUGHAN, P. R.; KLUTH, D. J.; LEONARD, M. W.; PRADOURA, H. H. M. *Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead Dam and the remedial works adopted from its repair*. Transactions, 10th International Congress on Large Dams, Montreal, Canada. Vol. 23. 1970. 122-124 p.
- 73 WITT, K. *Reliability study of granular filters*. Proc., Filters in Geotech., and Hydraul. Eng., BRAUNS, J.; HEIBAUM, M. & SCHULER, U. (editors): Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1993. 35-41 p.

- 74 WITTMAND, L. *The process of soil-filtration - its Physics and the approach in engineering practice*. Proceedings of the 7th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton, UK, vol. 1. 1979. p. 303-310.
- 75 ZAR, J.H. *Biostatistical analysis*. New Jersey: Prentice Hall International, 1984 (pp. 43-45)