



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO ANDERSON FONTENELE ARAUJO

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA SEGURANÇA DE FILTROS DE
BARRAGENS DE TERRA À EROSÃO INTERNA**

FORTALEZA

2019

ANTONIO ANDERSON FONTENELE ARAUJO

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA SEGURANÇA DE FILTROS DE
BARRAGENS DE TERRA À EROÇÃO INTERNA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

Coorientadora: Prof. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A687e Araújo, Antonio Anderson Fontenele.
Estudo teórico e experimental da segurança de filtros de barragens de terra à erosão interna / Antonio Anderson Fontenele Araújo. – 2019.
150 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.
Coorientação: Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira.

1. Barragem de terra. 2. Erosão interna. 3. Filtros granulares. 4. Constrições. 5. Método analítico. I. Título.
CDD 388

ANTONIO ANDERSON FONTENELE ARAUJO

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA SEGURANÇA DE FILTROS DE
BARRAGENS DE TERRA À EROSÃO INTERNA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 25/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira (Coorientadora)
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar (Examinador Externo)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

À Deus.

Aos meus pais, a minha tia Aucir Araújo, a minha falecida prima Larissa Araújo e a todos da minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus, por todas as maravilhas e bênçãos que venho recebendo de Ti, por me dares muito mais do que eu preciso, e por me abençoares muito mais do que eu mereço. A Ele sou eternamente grato, pela vida que me proporcionou, pelas pessoas que foram colocadas em minha vida, por tudo que me moldou a ser hoje.

Aos meus pais, Antonio Ribeiro Araújo e Maria Angela Fontenele Araújo, que não mediram esforços em me proporcionar a melhor educação e oportunidades, por acreditar no meu potencial e me apoiar durante toda minha caminhada.

À minha tia, Aucir Araújo, por estar sempre presente em minha vida, por toda a dedicação, apoio e incentivo que recebo a cada dia. Nunca conseguirei compensar, devidamente, o amor que sempre manifestou.

Aos meus amigos de infância, serei grato pela amizade, parceria e irmandade, que sempre estiveram presentes em minha vida. Em especial, quero agradecer minha prima Larissa Araújo, por ter dado a vida ao pequeno Lorenzo, minha fonte de amor e esperança. Doeu muito ter que lhe dar adeus, prima, mas você jamais desaparecerá do meu coração.

Aos meus grandes amigos que conheci durante minha vida acadêmica, Erlane Martins, Jennifer Rodrigues, Helena Moura, Michel Albuquerque e David Sousa, obrigado por todo o companheirismo e suporte em vários momentos da minha vida.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou, Hiago Gomes, Ana Raquel, Paulo Rossy, Giorgia Moecke, Daniel Gurgel, Caio Scipião, Konstantinos e Edno Cerqueira, obrigado pelo apoio, convívio e amizade.

Aos meus amigos do laboratório, que me ajudaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e construção dos modelos experimentais em todas as etapas, obrigado por todo o esforço e dedicação, em especial Túlio Ramos, Otávio Rodrigo, Elias Júnior e Ana Raina.

Ao Pedro Lucas, amigo que tive a imensa felicidade de conhecer durante as etapas finais da pesquisa, a quem eu tenho a maior admiração. Nunca terei como lhe agradecer pelo apoio que você me ofereceu em um momento em que eu tanto precisei.

A todos os professores do curso de mestrado, Alfran Sampaio, Silvrano Dantas Neto, Francisco Chagas Filho, por todas as aulas ministradas e pela grande contribuição na minha formação.

Ao meu orientador, professor Anderson Borghetti, quero agradecer por toda a sua paciência, disponibilidade, dedicação e sua incansável vontade de ajudar na realização deste trabalho.

Agradecer, especialmente, a minha coorientadora, professora Vanda Tereza Costa Malveira, pela sua disponibilidade e dedicação, que foram fundamentais para realização e prosseguimento deste estudo. Ressalto todo o apoio ofertado e o acompanhamento excepcional que levou a realização deste trabalho. Não posso esquecer a sua grande contribuição no meu crescimento desde os tempos da graduação.

À Universidade Federal do Ceará – UFC e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realizar meus estudos em geotecnia.

À Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA por todo o suporte à pesquisa.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos de Mestrado.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

A erosão interna é um processo de remoção e carreamento de partículas de solo devido à ação do fluxo de água. Tal fenômeno representa uma das principais causas de rupturas de barragens de terra em todo o mundo, estando, normalmente, associada à inexistência ou à falha no dimensionamento do sistema de drenagem interna. Os filtros granulares são estruturas utilizadas para controlar e estabilizar a perda de grãos suscetíveis à erosão interna, capturando-os entre suas constrições. Para tanto, é necessário que o filtro apresente uma adequada granulometria para garantir este processo eficiente de filtração. Esse problema torna-se mais relevante na região do semiárido do nordeste brasileiro, onde os processos cíclicos de enchimento e secagem de reservatório auxiliam no gatilho da erosão interna. Critérios empíricos foram desenvolvidos para projetos de filtros, baseados na distribuição de partículas, que consistem em relacionar diâmetros característicos dos grãos do filtro com grãos do solo que se deseja proteger. Estudos mais recentes têm apresentado uma nova abordagem analítica relacionada à determinação da distribuição das constrições internas do filtro granular, que têm provado ser mais realistas em avaliar o comportamento filtrante dessas estruturas. Esta dissertação, portanto, tem por objetivo apresentar um estudo metodológico desses critérios de filtros granulares em barragens de terra. A metodologia consta de desenvolvimento de dois modelos experimentais de barragem de terra, dimensionadas segundo a abordagem de distribuição de constrições, com os resultados experimentais comparados com os critérios empíricos de distribuição de partículas. Por fim, foi proposto uma metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna, baseada na abordagem da distribuição de constrições e aplicada em duas barragens do estado do Ceará, as barragens Benguê e Itaúna. Os resultados revelaram que a abordagem dos critérios baseados na distribuição das constrições internas de filtros granulares é mais realista, adequada e segura para identificar a eficiência de granulometrias quanto a capacidade de interromper processos de erosão interna.

Palavras-chave: Barragem de terra. Erosão interna. Filtros granulares. Constrições. Método analítico.

ABSTRACT

Internal erosion is a process of removing and carrying soil particles due to the action of water flow. This phenomenon represents one of the main causes of ruptures of earth dams around the world and is usually associated with the inexistence or failure in the design of the internal drainage system. Granular filters are structures used to control and stabilize the loss of grains susceptible to internal erosion, capturing them among their constriction. For this, it is necessary that the filter presents an adequate granulometry to guarantee this efficient filtration process. This problem becomes more relevant in the semi-arid region of northeastern Brazil, where the cyclic processes of filling and drying the reservoir assist in triggering internal erosion. Empirical criteria were developed for filter design, based on the particles size distribution, which consist in relating characteristic diameters of the filter with the soil to be protected. More recent studies have presented a new analytical approach related to the determination of the constriction size distribution of the granular filter, which have showed to be more realistic in evaluating the filtering behavior of these structures. This dissertation, therefore, aims to present a methodological study of these criteria of granular filters. The methodology consists of the development of two experimental models of embankment dams, dimensioned according to the constriction size distribution approach and the experimental results compared with the empirical criteria of particle size distribution. Finally, a methodology for evaluating internal drainage systems was proposed, based on the constriction size distribution approach and applied to two dams in the state of Ceara, the Bengue and Itauna dams. The results revealed that the approach to the criteria based on the constriction size distribution of granular filters is more realistic, adequate and safe to identify the efficiency of grading in terms of the ability to interrupt internal erosion processes.

Keywords: Embankment Dam. Internal erosion. Granular filter. Constrictions. Analytical method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Critério de Terzaghi	27
Figura 2	– Modelo do experimento de Bertram (1940).....	28
Figura 3	– Aparelho de ensaio de filtração para areias e pedregulhos	30
Figura 4	– Detalhes do equipamento de Slot Test	31
Figura 5	– Detalhes do equipamento Slurry Test	32
Figura 6	– Detalhes do equipamento do ensaio NEF	34
Figura 7	– Método de De Mello (1975).....	37
Figura 8	– Método de Kézdi (1979)	38
Figura 9	– Obtenção dos pontos para a curva de forma H-F	39
Figura 10	– Exemplos de curvas de solos estáveis e instáveis internamente segundo o método de Kenney e Lau (1985, 1986).....	40
Figura 11	– Agrupamento característico do estado denso de Silveira (1965).....	42
Figura 12	– Determinação dos diâmetros médios e frequências de ocorrências	43
Figura 13	– Exemplos de curva de infiltração de partículas versus diâmetro da partícula	44
Figura 14	– Agrupamento característico do estado	45
Figura 15	– Influência do coeficiente de uniformidade na formação das constrições.....	46
Figura 16	– Redução das constrições com a hipótese de área superficial	48
Figura 17	– Curvas de distribuição granulométrica e de constrições para as hipóteses de frequências em massa, área superficial e número de grãos.....	49
Figura 18	– Curvas de distribuição de constrições para ID iguais a 100%, 70%, 50% e 0%. 51	
Figura 19	– Modelo de rede cúbica regular de poros e constrições.....	51
Figura 20	– Curvas de movimento de partículas e dos confrontos sofridos.....	52
Figura 21	– Resultados experimentais do estudo de Raut e Indraratna (2008)	54
Figura 22	– Ilustração do método de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015).....	55
Figura 23	– Fluxograma da etapa de obtenção da entrada de dados granulométricos	59
Figura 24	– Fluxograma para a curva de distribuição de constrições para o estado denso	61
Figura 25	– Configuração geométrica para o ângulo α_{min}	62
Figura 26	– Configuração geométrica para o ângulo α_{max}	62
Figura 27	– Modelo geométrico para o cálculo dos ângulos internos para o estado fofo	63
Figura 28	– Fluxograma para a curva de distribuição de constrições para o estado fofo.....	65
Figura 29	– Fluxograma para a curva de distribuição de constrições para o estado intermediário	66

Figura 30 – Comparação entre as curvas de constrição determinadas em Raut (2006) com a modelagem usada	67
Figura 31 – Comparação entre curvas de distribuição de constrições determinadas experimentalmente para ID de 90%	68
Figura 32 – Comparação entre a curva de distribuição de constrição do estado denso de Silveira (1965) e da modelagem empregada	69
Figura 33 – Análise das granulometrias dos materiais	71
Figura 34 – Granulometria das britas da calha de percolação	72
Figura 35 – Configurações geométricas da calha de percolação	73
Figura 36 – Estrutura externa para a calha de percolação	73
Figura 37 – Esquema da calha de percolação	74
Figura 38 – Modelo da calha de percolação construído	75
Figura 39 – Modelos de (a) enscadeira, (b) cortina de retenção e (c) barragem de aterro desenvolvidos por Ferreira (2008)	76
Figura 40 – Modelo reduzido de barragem de Vazquez (2014)	77
Figura 41 – Esquema do tanque de percolação utilizado	78
Figura 42 – Tanque de percolação e suporte metálico	79
Figura 43 – Granulometrias dos materiais para o modelo experimental da barragem de terra	80
Figura 44 – Distribuição das partículas e das constrições dos materiais refinados	81
Figura 45 – Seção da barragem experimental inicial.....	81
Figura 46 – Etapas iniciais da construção do modelo experimental de barragem de terra.....	82
Figura 47 – Material compactado nas proximidades da interface	83
Figura 48 – Modelo experimental (a) após o primeiro enchimento e (b) detalhe do filtro vertical.....	83
Figura 49 – Curvas granulométricas das areias utilizadas no aumento da espessura do filtro	84
Figura 50 – Aumento da espessura do filtro vertical.....	85
Figura 51 – Execução do lançamento das areias para construção do filtro vertical	86
Figura 52 – Modelo experimental de barragem de terra (a) finalizado com (b) os detalhes do coroamento e (c) o dispositivo de controle do nível de água.....	86
Figura 53 – Local de verificação de partículas erodidas pelo dreno	88
Figura 54 – Curva de infiltração de partículas para a granulometria do filtro da calha de percolação.....	89

Figura 55 – Análise granulométrica das partículas de solo suscetíveis a serem capturadas pelo filtro.....	90
Figura 56 – Filtro vertical com partículas de solo base retidas	91
Figura 57 – Análise granulométrica da areia do filtro antes e após operação inicial de 30 dias	91
Figura 58 – Curva de infiltração de partículas para a granulometria do filtro da modelo experimental de barragem de terra.....	93
Figura 59 – Partículas finas “soltas” invadindo os piezômetros instalados.....	94
Figura 60 – Partículas de solo carregadas pelo fluxo de água.....	95
Figura 61 – Seção tipo da barragem Benguê.....	97
Figura 62 – Curvas granulométricas de Benguê para solo tipo SM	98
Figura 63 – Curvas granulométricas de Benguê para solo tipo ML	98
Figura 64 – Curvas granulométricas de Benguê das areias para o filtro vertical	99
Figura 65 – Curvas de distribuição granulométricas finas e grossas do solo base de Benguê	100
Figura 66 – Curva de distribuição de partículas e constrições das areias selecionadas para análise de Benguê.....	101
Figura 67 – Seção tipo da barragem Itaúna	101
Figura 68 – Curvas granulométricas de Itaúna para solo tipo CL	102
Figura 69 – Curvas granulométricas de Itaúna para solo tipo SM	103
Figura 70 – Curvas granulométricas de Itaúna para solo tipo SC	103
Figura 71 – Curvas granulométricas de Itaúna das areias para o filtro vertical	104
Figura 72 – Curvas de distribuição granulométricas finas e grossas do solo base de Itaúna.....	104
Figura 73 – Curva de distribuição de partículas e constrições das areias selecionadas para análise de Itaúna.....	106
Figura 74 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_fino de Benguê	108
Figura 75 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_grosso de Benguê	108
Figura 76 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_fino de Itaúna	111
Figura 77 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_grosso de Itaúna	111
Figura 78 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_fino da barragem Benguê.....	112
Figura 79 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_grosso da barragem Benguê.....	113

Figura 80 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_fino da barragem Itaúna	115
Figura 81 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_grosso da barragem Itaúna	115
Figura 82 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_fino de Benguê.....	117
Figura 83 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_grosso de Benguê.	118
Figura 84 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_fino de Itaúna	120
Figura 85 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_grosso de Itaúna ...	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Estatística geral de rupturas de barragens de terra	24
Tabela 2	– Relações granulométricas segundo Sherard e Dunnigan (1989).....	35
Tabela 3	– Comparação entre métodos de estimativa dos dc's de controle de filtração.....	53
Tabela 4	– Validação do critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) “continua”	56
Tabela 5	– Resultados das constrições determinadas no modelo de Raut (2006) e a modelagem usada	67
Tabela 6	– Porcentagem de solo capturada pelo filtro em função do intervalo de tamanho dos grãos	92
Tabela 7	– Resumo dos diâmetros mínimos de captura em função da espessura do filtro para o modelo experimental	94
Tabela 8	– Dados granulométricos selecionados para as análises do solo base de Benguê..	99
Tabela 9	– Parâmetros de filtração das areias do filtro de Benguê	100
Tabela 10	– Dados granulométricos selecionados para as análises do solo base de Itaúna..	105
Tabela 11	– Parâmetros de filtração das areias do filtro de Itaúna	105
Tabela 12	– Resultado da aplicação do método de Kenney e Lau (1985) para $F \leq 30\%$ para a barragem Benguê.....	107
Tabela 13	– Resultado da instabilidade interna do filtro doo açude Benguê.....	109
Tabela 14	– Resultado da aplicação do método de Kenney e Lau (1985) para $F \leq 30\%$ para a barragem Itaúna.....	110
Tabela 15	– Resultado da instabilidade interna do filtro doo açude Itaúna	110
Tabela 16	– Resultados do critério de Raut e Indraratna (2008) do açude Benguê.....	113
Tabela 17	– Resultados para os critérios de Terzaghi e NRCS (1994) de Benguê.....	114
Tabela 18	– Resultados do critério de Raut e Indraratna (2008) do açude Itaúna	116
Tabela 19	– Resultados para os critérios de Terzaghi e NRCS (1994) de Itaúna	116
Tabela 20	– Porcentagem de partículas em massa que podem ser capturadas pelo filtro granular da barragem Benguê.....	118
Tabela 21	– Porcentagem de partículas em massa que podem ser capturadas pelo filtro granular da barragem Itaúna	121
Tabela 22	– Ensaio de peneiramento do material Solo A1	130
Tabela 23	– Ensaio de limite de liquidez do material Solo A1	130
Tabela 24	– Ensaio de limite de plasticidade do material Solo A1.....	130
Tabela 25	– Resultado do ensaio de compactação do material Solo A1.....	131

Tabela 26 – Ensaio de peneiramento da Areia B1	131
Tabela 27 – Dimensionamento do filtro granular segundo o NRCS (1994).....	131
Tabela 28 – Granulometria das britas	131
Tabela 29 – Determinação da distribuição de restrições da Areia B1 “continua”	132
Tabela 30 – Granulometria dos solos utilizados no modelo	134
Tabela 31 – Granulometria ajustada do Solo A3’	134
Tabela 32 – Granulometria das areias ajustadas	134
Tabela 33 – Determinação da distribuição de restrições da Areia B2’ “continua”	135
Tabela 34 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro_fino “continua”	137
Tabela 35 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro_grosso “continua”	139
Tabela 36 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro_fino “continua”	141
Tabela 37 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro_grosso “continua”	143
Tabela 38 – Dados da análise comparativa de Raut e Indraratna (2008) “continua”	145
Tabela 39 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento do solo tipo SM	147
Tabela 40 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento do solo tipo ML	147
Tabela 41 – Dados granulométricos do ensaio de sedimentação do solo tipo SM	148
Tabela 42 – Dados granulométricos do ensaio de sedimentação do solo tipo ML	148
Tabela 43 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento e sedimentação do solo tipo CL.....	149
Tabela 44 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento e sedimentação do solo tipo SM.....	149
Tabela 45 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento e sedimentação do solo tipo SC	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDC	Curva de Distribuição de Condições
CDG	Curva de Distribuição Granulométrica
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
ICOLD	International Commission on Large Dams
Labsolos	Laboratório de Solos da Universidade Estadual Vale do Acaraú
NRCS	Natural Resources Conservation Service
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
UVA	Universidade Estadual Vale do Acaraú
USBR	United State Bureau of Reclamation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação da pesquisa	19
1.2	Objetivos.....	20
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
1.3	Metodologia para desenvolvimento do trabalho	21
1.4	Estrutura do trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Introdução.....	23
2.2	Critérios de retenção baseados na distribuição de partículas.....	26
<i>2.2.1</i>	<i>Terzaghi.....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Bertram (1940).....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Karpoff (1955)</i>	<i>29</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Sherard et al. (1984a).....</i>	<i>29</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Sherard et al. (1984b).....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.6</i>	<i>Honjo e Veneziano (1989).....</i>	<i>33</i>
<i>2.2.7</i>	<i>Sherard e Dunnigan (1989).....</i>	<i>34</i>
<i>2.2.8</i>	<i>Lafleur et al. (1989).....</i>	<i>35</i>
2.3	Critérios de instabilidade interna baseados na distribuição de partículas.....	36
<i>2.3.1</i>	<i>De Mello (1975).....</i>	<i>37</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Kézdi (1979).....</i>	<i>37</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Kenney e Lau (1985, 1986)</i>	<i>38</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Moffat (2002).....</i>	<i>40</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Li (2008).....</i>	<i>41</i>
2.4	Critérios baseados na distribuição das constrições.....	41
<i>2.4.1</i>	<i>Silveira (1965).....</i>	<i>41</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Silveira et al. (1975).....</i>	<i>45</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Musso e Federico (1982).....</i>	<i>46</i>
<i>2.4.4</i>	<i>Humes (1998).....</i>	<i>47</i>
<i>2.4.5</i>	<i>Locke et al. (2001)</i>	<i>49</i>
<i>2.4.6</i>	<i>Raut e Indraratna (2008)</i>	<i>51</i>
<i>2.4.7</i>	<i>Indraratna et al. (2015).....</i>	<i>54</i>

3	MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DAS CONSTRIÇÕES INTERNAS	58
3.1	Dados de entrada: diâmetros médios das partículas e frequência de ocorrência	58
3.2	Cálculo das constrições internas para o agrupamento do estado denso	59
3.3	Cálculo das constrições internas para o agrupamento do estado fofo.....	60
3.4	Cálculo das constrições internas para o estado intermediário.....	65
3.5	Comparação da modelagem matemática empregada com resultados publicados na literatura	66
4	MODELO EXPERIMENTAL DE BARRAGEM DE TERRA	70
4.1	Modelo de calha de percolação.....	70
4.1.1	<i>Análise granulométrica dos materiais</i>	<i>70</i>
4.1.2	<i>Configurações geométricas do modelo de calha de percolação</i>	<i>72</i>
4.1.3	<i>Processo construtivo.....</i>	<i>74</i>
4.2	Modelo experimental da barragem de terra.....	75
4.2.1	<i>Configurações geométricas do reservatório</i>	<i>77</i>
4.2.2	<i>Análise granulométrica dos materiais e geometria da barragem de terra.....</i>	<i>79</i>
4.2.3	<i>Processo construtivo.....</i>	<i>81</i>
4.3	Resultados e discussões	87
4.3.1	<i>Modelo de calha de percolação.....</i>	<i>87</i>
4.3.2	<i>Modelo experimental de barragem de terra</i>	<i>90</i>
5	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM INTERNA EM BARRAGENS DE TERRA: ESTUDO DE CASO NAS BARRAGENS BENGUÊ E ITAÚNA	96
5.1	Introdução.....	96
5.2	Barragem Benguê.....	97
5.2.1	<i>Análise granulométrica.....</i>	<i>97</i>
5.3	Barragem Itaúna	101
5.3.1	<i>Análise granulométrica.....</i>	<i>102</i>
5.4	Resultados e discussões	106
5.4.1	<i>Instabilidade interna dos filtros granulares</i>	<i>106</i>
5.4.1.1	<i>Barragem Benguê.....</i>	<i>107</i>
5.4.1.2	<i>Barragem Itaúna</i>	<i>109</i>
5.4.2	<i>Eficiência da capacidade filtrante</i>	<i>111</i>

5.4.2.1	<i>Barragem Bengué</i>	112
5.4.2.2	<i>Barragem Itaúna</i>	114
5.4.3	<i>Análise do comprimento de infiltração</i>	117
5.4.3.1	<i>Barragem Bengué</i>	117
5.4.3.2	<i>Barragem Itaúna</i>	119
5.4.4	<i>Comparação dos resultados com o comportamento real das barragens</i>	121
6	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122
6.1	Modelagem matemática de curvas de distribuição de constrições	122
6.2	Modelos experimentais	122
6.3	Metodologia de avaliação de sistema de drenagem interna	124
6.4	Sugestão para pesquisas futuras	125
	REFERÊNCIAS	126
	APÊNDICE A – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLOS UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO DO MODELO EXPERIMENTAL DE CALHA DE PERCOLAÇÃO	130
	APÊNDICE B – DADOS GRANULOMÉTRICOS DOS SOLOS UTILIZADOS NO MODELO EXPERIMENTAL DE BARRAGEM DE TERRA	134
	APÊNDICE C – DADOS DOS DIÂMETROS DAS CONSTRICÕES DAS GRANULOMETRIAS DOS FILTROS GRANULARES DA BARRAGEM BENGUÊ	137
	APÊNDICE D – DADOS DOS DIÂMETROS DAS CONSTRICÕES DAS GRANULOMETRIAS DOS FILTROS GRANULARES DA BARRAGEM ITAÚNA	141
	ANEXO A – DADOS DA ANÁLISE COMPARATIVA DOS CRITÉRIOS NRCS (1994), ICOLD (1994) E RAUT E INDRARATNA (2008)	145
	ANEXO B – DADOS GRANULOMÉTRICOS DOS SOLOS DA BARRAGEM BENGUÊ	147
	ANEXO C – DADOS GRANULOMÉTRICOS DOS SOLOS DA BARRAGEM ITAÚNA	149

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a motivação da pesquisa realizada, a descrição dos objetivos geral e específicos da pesquisa, a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa e a organização da estrutura da dissertação.

1.1 Motivação da pesquisa

Em barragens de terra, um dos principais quesitos de segurança que devem ser avaliados durante a fase de projeto é o controle do fluxo de percolação de água, evitando-se que partículas de solo sejam carregadas pela ação do fluxo. Os filtros granulares são uma das estruturas utilizadas para proteger os grãos suscetíveis a processos de erosão interna, capturando-os entre suas constrictões internas.

Segundo Foster, Fell e Spannagle (1998), o fenômeno de erosão interna, ou seja, o processo de transporte de partículas de solo devido à ação do fluxo, foi a causa de quase metade dos casos de rupturas de barragens ocorridas no mundo. Destes casos, a maioria das rupturas ocorreu devido a progressão da erosão interna através do maciço, onde o filtro granular possuía uma granulometria inadequada ou então nem existia.

Em obras de barragens, em qualquer interface entre dois materiais porosos, onde haja fluxo de água do material mais fino para o mais grosseiro, é inevitável que algum transporte de partículas venha a ocorrer. Para tanto, a utilização de sistemas de drenagem interna constitui a principal defesa contra fluxos concentrados e preferenciais que são um dos principais mecanismos iniciadores do processo de erosão interna (CRUZ, 1996).

Os métodos de dimensionamento de filtros granulares mais usuais consistem em relacionar a granulometria do filtro com a granulometria do solo que se deseja proteger por meio de critérios empíricos baseados na distribuição das partículas. Locke (2001) afirma que estes métodos não proporcionam uma compreensão dos mecanismos que influenciam no processo de filtração e conseqüentemente não dão uma visão clara para o projetista do que pode ocorrer dentro da barragem. Além disso, não é o tamanho das partículas do filtro que governa o processo de filtragem, mas sim o tamanho das constrictões formados por essas partículas.

Estudos posteriores como de Silveira (1965), Musso e Federico (1982), Humes (1998), Locke, Indraratna e Adikari (2001), Raut e Indraratna (2008) e Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) apresentaram uma nova perspectiva de dimensionamento, baseando-se

na distribuição das restrições internas da granulometria do filtro. Estes estudos apresentam resultados bem mais realistas para o comportamento filtrante do solo granular.

O dimensionamento correto de um filtro granular é de suma importância para garantir a segurança da estrutura, como também das instalações e populações localizadas à jusante da barragem. Este problema torna-se mais relevante ainda para o estudo geotécnico de barragens, principalmente para a região semiárida do nordeste brasileiro, onde os processos cíclicos de enchimento e secagem de reservatório auxiliam no desgaste do solo, propiciando num aumento do processo erosivo dos grãos menores (ARAÚJO, 2017, ARAÚJO; MALVEIRA; SOARES, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2018).

Diante disso, é fundamental que seja realizado um estudo dos métodos de dimensionamento para propor uma metodologia melhorada e segura para avaliar granulometrias de filtros granulares de barragens contra processos de erosão interna.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo geral apresentar um estudo teórico, numérico e experimental acerca do dimensionamento de filtros granulares em barragens de terra, abordando dois conceitos de critérios, a distribuição de partículas e a distribuição de restrições.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta dissertação, podem ser citados:

- a) Desenvolver um procedimento matemático simplificado para determinação da curva de distribuição de restrições internas para um solo granular;
- b) Desenvolver um modelo experimental de barragem de terra para avaliar as metodologias de dimensionamento de filtros granulares;
- c) Desenvolver uma metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna adequada baseada nos critérios de distribuição de restrições e aplicá-la a um estudo de caso real de barragem de terra;
- d) Comparar as duas abordagens de critérios de dimensionamento de filtros granulares.

1.3 Metodologia para desenvolvimento do trabalho

A metodologia utilizada nesta dissertação consta de uma revisão bibliográfica da evolução de alguns critérios de retenção e instabilidade interna para dimensionamento de filtros granulares, que vai desde o critério de retenção de Terzaghi até o critério de instabilidade interna de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015), baseados em duas abordagens: a distribuição das partículas e a distribuição das constrições internas do filtro.

Para aplicação dos conceitos da distribuição das constrições, foi elaborado um procedimento matemático simplificado, baseados nos estudos abordados na revisão bibliográfica realizada, para determinação de curvas de distribuição de constrições (CDC) para solos granulares.

No estudo experimental, foram desenvolvidos dois modelos experimentais, um com granulometria do filtro granular dimensionada para evitar processos de erosão interna das partículas do solo base, e outro para permitir a ocorrência de erosão interna. Para tanto, foram adotados critérios baseados na distribuição de partículas e de constrição para comparação e verificação da metodologia mais adequada na previsão do comportamento filtrante.

Por fim, foi proposto uma metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna para barragens de terra, baseados nos critérios de distribuição de constrições e aplicada a duas barragens de terra do estado do Ceará. Seus resultados foram comparados com os critérios de distribuição de partículas e com os relatórios de vistorias realizadas nas barragens escolhidas.

1.4 Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório. Um resumo dos capítulos seguintes está apresentado a seguir:

- a) O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica acerca da evolução de alguns estudos de critérios de retenção e de instabilidade interna de filtros granulares, dividindo-os em duas abordagens: os critérios baseados na distribuição das partículas e os critérios baseados na distribuição das constrições internas;
- b) O Capítulo 3 é dedicado ao procedimento matemático simplificado desenvolvido para determinação da Curva de Distribuição das Constrições – CDC, baseado nos estudos apresentados na revisão bibliográfica do Capítulo 2. O capítulo mostra o método para seleção dos diâmetros a partir da curva

granulométrica, o desenvolvimento do método analítico para a determinação das constrições, apresentando os resultados obtidos em comparação com os publicados na literatura;

- c) O Capítulo 4 descreve a metodologia desenvolvida para a concepção dos modelos experimentais de barragem de terra adotados para análise do comportamento filtrante e os resultados obtidos em comparação com os métodos de dimensionamento selecionados para o estudo;
- d) O Capítulo 5 apresenta uma proposta metodológica para avaliação de sistemas de drenagem interna em barragens de terra, baseada na teoria da distribuição das constrições internas de um solo granular, aplicada em duas barragens do estado do Ceará.
- e) O Capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões de pesquisas futuras para continuação da pesquisa realizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão de estudos realizados acerca dos mecanismos associados ao processo de filtragem em barragens de terra, abordando critérios de dimensionamento para os sistemas de drenagem interna. Os critérios aqui apresentados estão organizados de acordo com a metodologia empregada, critérios baseados na distribuição das partículas e distribuição das constrições, para sistemas de drenagem compostos por filtros granulares.

2.1 Introdução

O processo de erosão interna representa uma das principais causas de acidentes e rupturas de barragens de aterro. Tal processo tem extrema importância no estudo geotécnico de barragens, ocorrendo quando partículas de solo, seja no maciço da barragem ou em sua fundação, são removidas e carregadas devido ao aumento no fluxo interno de água. De fato, aproximadamente, 50% de todas os incidentes de barragens são atribuídas a algum processo de erosão interna (FOSTER; FELL; SPANNAGLE, 1998; FEMA, 2015; ICOLD, 2017).

Foster, Fell e Spannagle (1998) realizaram uma análise estatística de incidentes em barragens de terra no mundo, construídas entre 1800 e 1986, especificamente, relacionados à erosão interna e instabilidade de taludes. A base de dados compreende alguns estudos publicados na literatura, como: o Catálogo de Desastres, Rupturas e Acidentes de Barragem (BAAB; MERMEL, 1968), que apresenta um resumo de incidentes de barragens por país, incluindo informações sobre as características das barragens; Bibliografia da História de Rupturas de Barragens (VOGEL, 1993), que lista rupturas de barragens ocorridas no mundo em ordem cronológica; os estudos publicados pelo *International Commission on Large Dams* – ICOLD, como Lições de Incidentes de Barragens (ICOLD, 1974), Deterioração de Barragens e Reservatórios (ICOLD, 1983) e Análise Estatística de Rupturas de Barragens (ICOLD, 1995); e dados de incidentes de barragens da Austrália (INGLES, 1984; ANCOLD, 1992), Reino Unido (CHARLES; BODEN, 1985), África do Sul (OLWAGE; OOSTHUIZEN, 1984), Espanha (GOMEZ LAA *et al.*, 1979), Japão (TAKASE, 1967) e China (JUNCHUN, 1984). O resumo estatístico das rupturas de barragens é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatística geral de rupturas de barragens de terra

Modo de ruptura	Nº de casos		% de rupturas	
	Todas as rupturas	Rupturas em operação	Todas as rupturas	Rupturas em operação
Galgamento	46	40	35,9	34,2
Vertedouro	16	15	12,5	12,8
Subtotal	62	55	48,4	47
Erosão interna através do maciço	39	38	30,5	32,5
Erosão interna através da fundação	19	18	14,8	15,4
Erosão interna do maciço para fundação	2	2	1,6	1,7
Subtotal⁽¹⁾	59	57	46,1	48,7
Deslizamento do talude de jusante	6	4	4,7	3,4
Deslizamento do talude de montante	1	1	0,8	0,9
Subtotal	7	5	5,5	4,3
Terremoto/liquefação	2	2	1,6	1,7
Modo desconhecido	8	7	-	-
Total de rupturas (com modo de ruptura conhecido)	128	117	-	-
Total de rupturas⁽¹⁾	136	124	-	-

Nota: (1) Subtotal e total não necessariamente somam 100% devido a alguns casos que foram classificados com vários modos de ruptura.

Fonte: Adaptado de Foster, Fell e Spannagle (1998).

Observa-se que o modo de ruptura mais comum foi por galgamento, principalmente, durante a operação, representando cerca de 35,9% das rupturas. Combinado com as falhas em vertedouros, este valor chega a 48,4%. Enquanto isso, 46,1% das rupturas, cujo modo de ruptura é conhecido, foram devido à erosão interna. O modo mais comum de desenvolvimento do processo de erosão interna foi através do maciço da barragem, representando cerca de 2/3 dos casos de erosão interna, duas vezes maior que a erosão pela fundação e vinte vezes maior que a erosão do maciço para fundação.

Segundo Foster, Fell e Spannagle (1998) cerca de 30% dos casos de acidentes em barragens, cujo modo de ruptura ocorreu por erosão interna pelo maciço, foram devido a ausência de filtros granulares. Em 21 dos 31 casos de acidentes, cujas barragens possuíam filtros, a erosão interna se desenvolveu devido a granulometria do filtro ser mais grosseira que o necessário ou por ter havido segregação do material (filtros bem graduados), sem que houvesse uma devida transição entre os materiais adjacentes.

De acordo com o *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2017), a primeira condição para a erosão interna ocorrer é o desprendimento de partículas. A percolação de água, no interior da barragem ou fundação, deve ocorrer com velocidade suficiente para que forneça a energia necessária para separar as partículas da estrutura do solo. Dessa forma, a intensidade da energia do fluxo está diretamente relacionada com o gradiente hidráulico a que está submetido. A energia do fluxo, que está sendo dissipada pelas partículas, desencadeia a

desestabilização do equilíbrio na estrutura do solo, resultado do aumento das forças de percolação ou forças de arraste de partículas.

Baseado no comportamento dos tipos de solos de barragens frente a processos de erosão interna e os seus mecanismos de início de erosão, o ICOLD (2017) distingue três classes de solos:

- a) solos não plásticos: apresentam maior facilidade de sofrer carreamentos de partículas e, como solos de baixa coesão, dificilmente sustentam fissuras ou rachaduras internas quando saturados. A resistência à erosão interna está principalmente relacionada ao peso próprio das partículas, estando sujeitos a sofrerem erosão regressiva, erosão de contato ou sufusão. Esta, dependendo da sua distribuição granulométrica;
- b) solos plásticos: apresentam maior resistência à erosão interna comparado aos solos não plásticos, entretanto, quando removidas, as partículas são facilmente transportadas através das fissuras internas. Esses solos conseguem sustentar as fissuras abertas, mesmo quando saturados, estando sujeitos a erosão por escoamentos concentrados ou erosão de contato. A erosão regressiva e sufusão não ocorrem quando submetidos a gradientes hidráulicos normalmente existentes em barragens e fundações;
- c) solos plásticos dispersivos: esses solos, devido a sua mineralogia e a química da água, apresentam maior erodibilidade, pois a formação de grumos de partículas de argilas é dificultada. A erosão interna inicia em fissuras ou escoamentos concentrados sob baixa tensão e gradientes hidráulicos.

Os sistemas de drenagem interna são reconhecidos como as estruturas responsáveis por controlar e direcionar o fluxo de percolação de água da barragem e fundação (CRUZ, 1996). Os filtros, predominantemente, são utilizados para impedir o transporte das partículas de solo erodidas. Para tanto, o filtro deve apresentar cinco características fundamentais (ICOLD, 2017): **retenção**, ser capaz de promover o aprisionamento de partículas erodidas; **drenagem**, ser capaz de conduzir com facilidade o fluxo de água a uma saída apropriada, reduzindo o excesso de poropressão; **autofiltrante**, ser capaz de evitar a perda de suas próprias partículas, ou seja, manter-se estável internamente; **não coesivo**, possuir pouco ou nenhum material de granulometria fina ($<0,075$ mm); e **resistência**, ser capaz de absorver as tensões no interior da barragem, sem ser esmagado.

Os métodos de dimensionamento de filtros consistem em estabelecer uma granulometria adequada ao solo que se deseja proteger, denominado de solo base. A

granulometria, portanto, deve atender às características fundamentais citadas anteriormente. Os critérios de dimensionamento podem ser divididos em duas abordagens: (a) critérios baseados na distribuição das partículas e (b) na distribuição das constrições, conforme serão apresentados nos itens a seguir.

2.2 Critérios de retenção baseados na distribuição de partículas

Os critérios de retenção baseados na distribuição de partículas consistem em relacionar os diâmetros das partículas do filtro com os diâmetros das partículas do solo base, por meio da curva de distribuição granulométrica dos materiais. Dessa forma, cada critério vai atribuir um ou mais diâmetros específicos e correlacioná-los por meio de razões ou limites de tamanhos. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos acerca de dimensionamento de filtros baseados nessa metodologia. Neste trabalho, serão adotados os símbolos D (maiúsculo) para representar os tamanhos das partículas do filtro granular e d (minúsculo) para os tamanhos das partículas do solo base. O número subscrito ao símbolo representa a porcentagem mais fina que o tamanho indicado.

2.2.1 Terzaghi

O primeiro critério adotado em projetos de filtros granulares foi proposto por Terzaghi na década de 1920, enquanto trabalhava no projeto da barragem Bou Hanifia, África do Norte (NGUYEN, 2012). O critério de Terzaghi (TERZAGHI; PECK, 1962), como ficou conhecido, foi desenvolvido baseado em testes envolvendo areias uniformes como materiais para os filtros e solo base. O método define dois requisitos a serem atendidos:

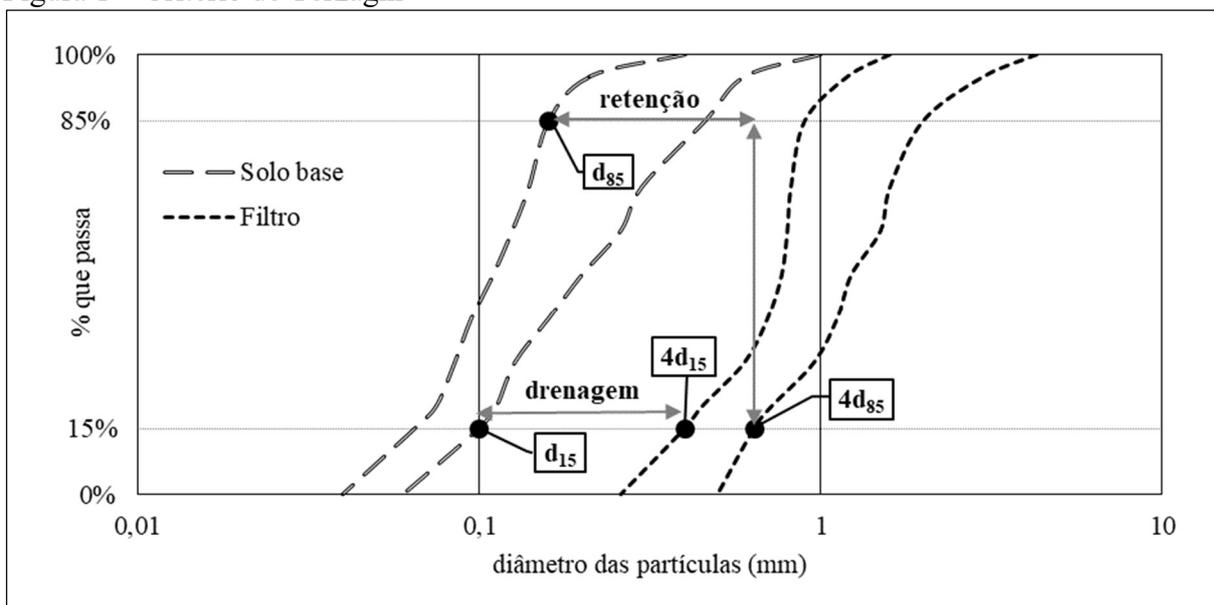
- a) retenção: os poros internos do filtro devem ser suficientemente pequenos para impedir o transporte de partículas erodidas, de forma que o diâmetro correspondente a 15% das partículas mais finas do filtro, D_{15} , deve ser no máximo quatro vezes o diâmetro correspondente a 85% das partículas mais finas do solo base, d_{85} ;

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \quad (1)$$

- b) drenagem: os poros internos do filtro devem ser suficientemente grandes para permitir a drenagem da água, de forma que o diâmetro correspondente a 15% das partículas mais finas do filtro, D_{15} , deve ser no mínimo quatro vezes o diâmetro correspondente a 15% das partículas mais finas do solo base, d_{15} .

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \quad (2)$$

Figura 1 – Critério de Terzaghi



Fonte: Adaptado de Araújo (2017).

Raut (2006) ressaltou que algumas pesquisas que utilizaram peneiras de metal como filtros em testes de filtração, como os trabalhos de Vaughan e Soares (1982) e Kwang (1990), mostraram que pouca perda de partículas ocorre quando a abertura da peneira era menor que d_{80} , enquanto que se tornava muito maior para abertura superior a d_{90} . O que torna aceitável o uso de d_{85} como representante da granulometria do solo base.

2.2.2 Bertram (1940)

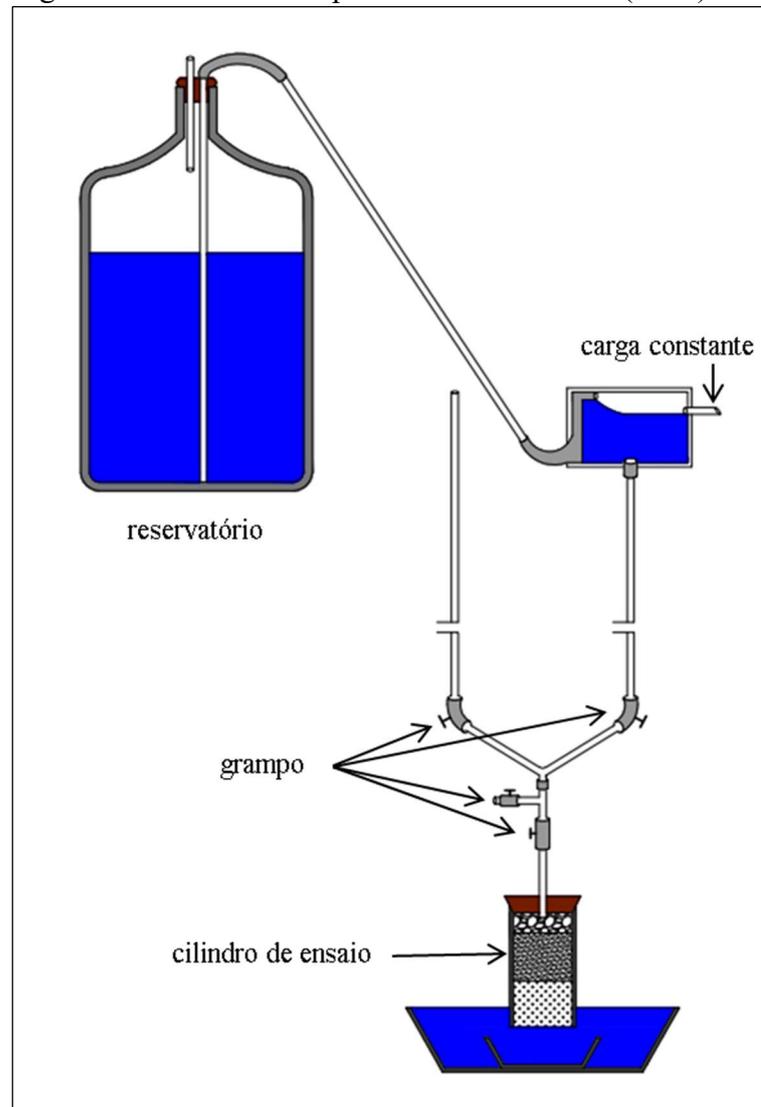
Bertram (1940 *apud* MOFFAT, 2005) foi o primeiro trabalho publicado a analisar a relação de retenção de Terzaghi. O estudo utilizou areias uniformes como materiais para os testes. O método adotado consistiu em impor um fluxo de água unidirecional, no sentido descendente, percolando através das combinações de materiais (solo base e filtro) com gradientes hidráulicos, variando entre 18-20, para duas horas de duração, ou 6-8, para quatro

horas de duração. O esquema do modelo experimental é apresentado na Figura 2. Os resultados mostraram uma relação de aproximadamente 6 entre os diâmetros representativos de Terzaghi, Equação (3). Destaca-se que o estudo analisou somente a relação de retenção, sendo a relação de drenagem, dado na Equação (2), mantida.

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 6$$

(3)

Figura 2 – Modelo do experimento de Bertram (1940)



Fonte: Adaptado de Moffat (2005).

2.2.3 Karpoff (1955)

Karpoff (1955 *apud* MOFFAT, 2002) realizou uma série de testes de filtração para filtros com granulometrias uniformes e bem graduados, usando como solo base um silte, uma areia fina e média uniformes e uma areia com pedregulhos bem graduada. Para os filtros, foram utilizadas areias grossas ou médias uniformes e pedregulhos finos a médios. O coeficiente de uniformidade (C_u) para os filtros uniformes variou entre 1,2 e 1,6, enquanto que para os filtros bem graduados variou entre 6,4 e 18,4. O estudo concluiu que um único diâmetro representativo dos materiais não é suficiente para assegurar um processo de filtração eficiente. Para tanto, foram propostos diâmetros adicionais ao critério de Terzaghi, como D_{50} e o d_{50} . As relações adicionais são apresentadas a seguir.

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} < 10 \quad (\text{para filtros uniformes}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{D_{50}}{d_{50}} < 58 \\ \frac{D_{15}}{d_{15}} < 40 \end{cases} \quad (\text{para filtros bem graduados}) \quad (5)$$

Além das equações (4) e (5), o trabalho de Karpoff (1955) apresentou requisitos adicionais, que mais tarde foram adotadas por *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation* (USBR, 1963) como: o tamanho máximo para as partículas do filtro deveria ser de 76 mm a fim de evitar a segregação das partículas; o filtro não deveria ter mais que 5% de partículas finas (<0,075 mm) para evitar sua colmatção; o formato da curva granulométrica dos filtros e solos bases, na fração granulométrica mais fina, deveria ser aproximadamente paralelas; se o solo base conter partículas maiores que 4,75 mm, o material deve ser analisado com base somente na fração menor que 4,75 mm.

2.2.4 Sherard et al. (1984a)

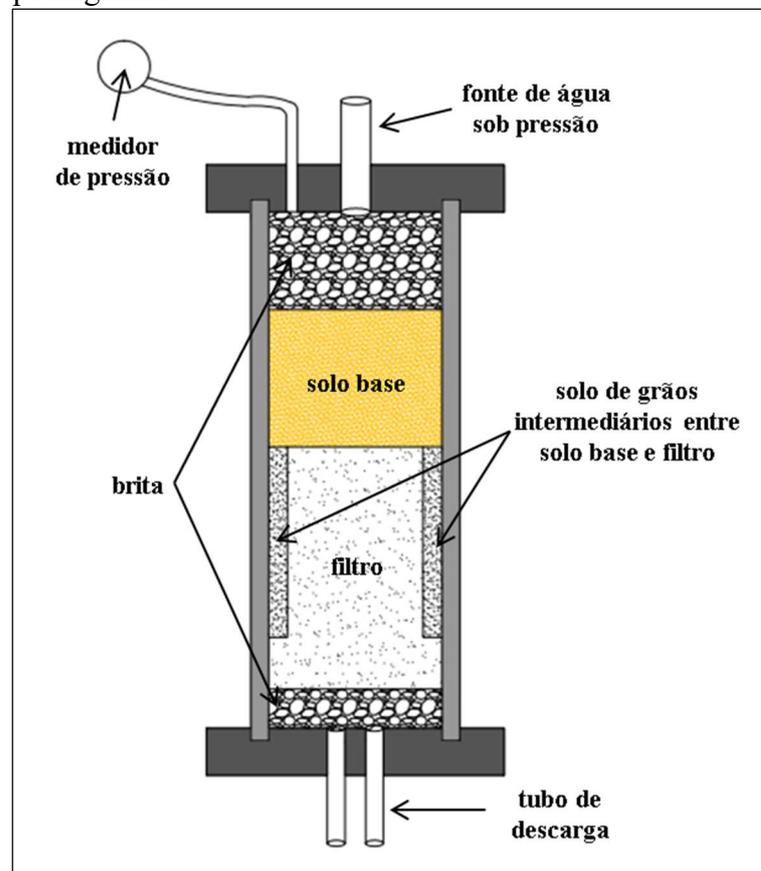
Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a) realizaram um experimento de filtração, utilizando: areias relativamente uniformes como solo base; e areias e pedregulhos uniformes como material para o filtro, com D_{15} variando entre 1 a 10 mm. O equipamento utilizado, ilustrado na Figura 3, consistiu de um permeâmetro, onde, resumidamente, permite a entrada

de um fluxo vertical de água sob alta pressão que percola, através de amostras de solo base e filtro, com gradientes hidráulicos variando entre 0,5 a 50. Na saída, é medida a vazão do fluxo e coletado a água com o eventual material erodido. Os filtros eram considerados satisfatórios quando nenhuma quantidade significativa de partículas de solo base passava através do filtro durante o fluxo, mantendo-se a espessura e aparência das camadas inalteradas.

O estudo de Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a) mostrou que a razão limitante de retenção de Terzaghi deve ser ampliada para 9, conforme apresenta a Equação (6). Entretanto, apesar do critério de Terzaghi ser conservativo, o estudo concluiu que para filtros com D_{15} maior que 1 mm, o critério de Terzaghi, Equação (1), deve continuar sendo o principal critério para julgar a aceitabilidade do filtro granular. Além disso, o estudo sugere que as razões de retenção adicionais, apresentadas por Karpoff (1955), devem ser abandonadas e as curvas granulométricas do solo base e filtro não precisam ser paralelas.

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 9 \quad (6)$$

Figura 3 – Aparelho de ensaio de filtração para areias e pedregulhos



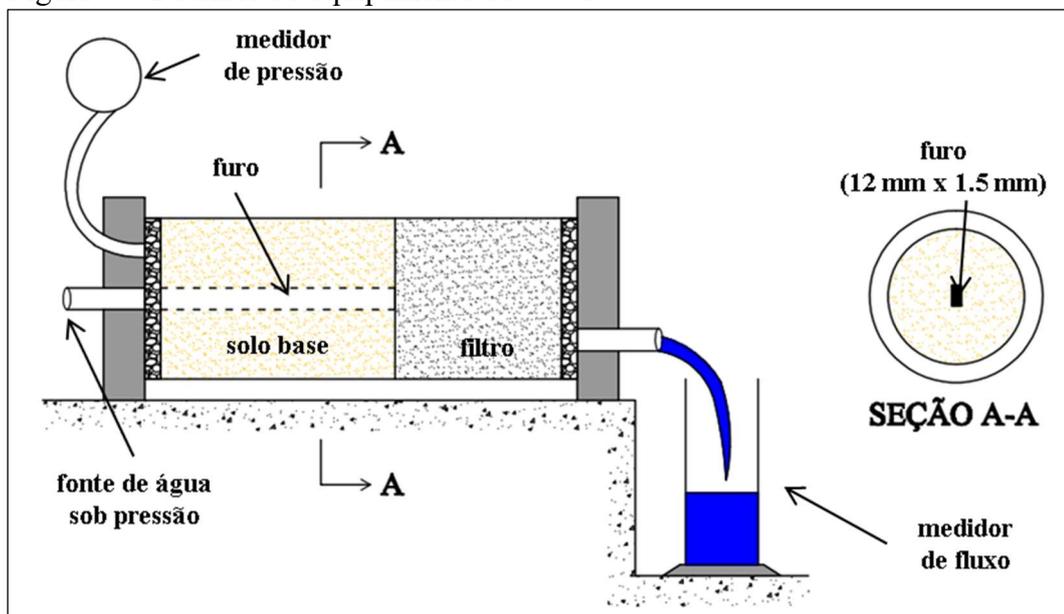
Fonte: Adaptado de Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a).

2.2.5 Sherard et al. (1984b)

Para complementar ao estudo anterior (SHERARD; DUNNIGAN; TALBOT, 1984a), Sherard, Dunnigan e Talbot (1984b) investigaram a utilização de filtros granulares para solos bases silteosos e argilosos. Nesse estudo, foram utilizadas duas metodologias de ensaio de filtração, no qual ambos os materiais, solo base e filtro granular, eram submetidos a um fluxo de água sob alta pressão. As principais observações feitas no início dos testes mostravam que fluxos de água sob alta pressão sempre formavam escoamentos concentrados, um dos quatro mecanismos de início de erosão interna (ICOLD, 2017).

Na primeira metodologia de ensaio, chamada de *Slot Test*, um furo de 12 mm era, inicialmente, feito no centro da camada de solo base. Esse furo tem a finalidade de definir o canal inicial por onde o escoamento concentrado será desenvolvido, de forma a permitir a localização do canal e o tamanho de abertura, fixos em todos os testes. Os detalhes do equipamento são mostrados na Figura 4. O filtro era considerado satisfatório quando o fluxo de água rapidamente diminuía, tornando-se mais claro, com a selagem completa do canal de escoamento concentrado ou com a estabilização de um fluxo contínuo e pequeno de água limpa.

Figura 4 – Detalhes do equipamento de *Slot Test*

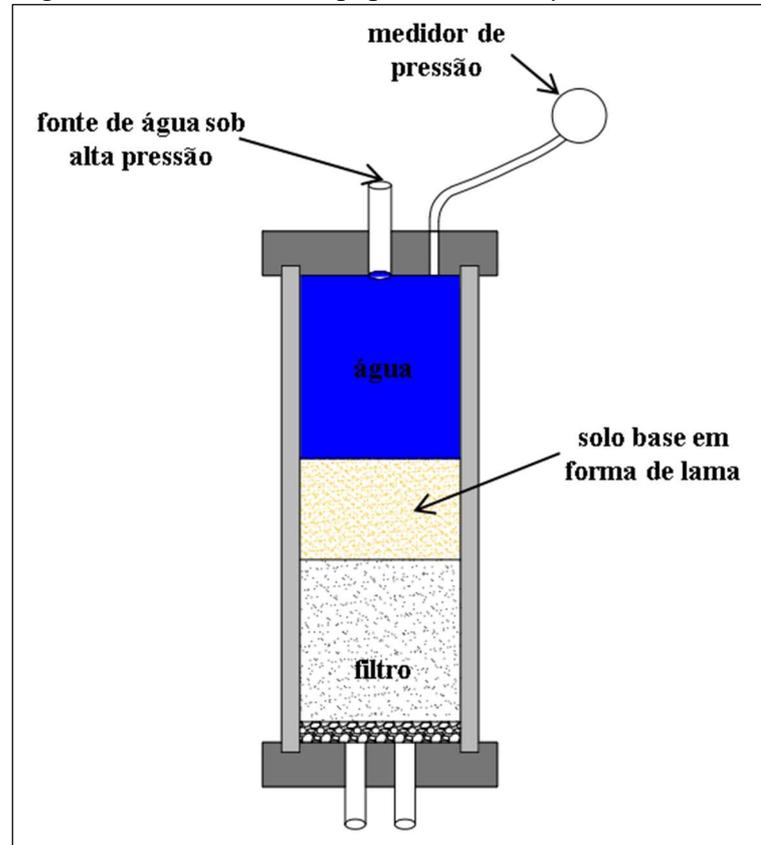


Fonte: Adaptado de Sherard, Dunnigan e Talbot (1984b).

Na segunda metodologia de ensaio, chamada de *Slurry Test*, o solo base era aplicado sobre o filtro em forma de lama. Esta era obtida por meio da mistura gradual de água com a amostra de solo até que atingisse um teor de umidade cerca de 2,5 vezes maior que o limite de

liquidez do solo, obtendo uma lama, de viscosidade semelhante a um óleo de motor. Os detalhes do equipamento são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Detalhes do equipamento *Slurry Test*



Fonte: Adaptado de Sherard, Dunnigan e Talbot (1984b).

Os filtros eram considerados satisfatórios quando a superfície da lama assentava repentinamente alguns milímetros e parava de se movimentar, enquanto, para os filtros não satisfatórios, a lama era lavada pelo filtro em cerca de 2 ou 3 segundos. É interessante destacar que as duas metodologias desenvolvidas apresentaram resultados semelhantes para os solos testados.

Sherard, Dunnigan e Talbot (1984b) apresentaram as seguintes conclusões:

- a) areias siltosas ou argilosas, com d_{85} entre 0,1 e 0,5 mm, o principal critério até então existente, o critério de retenção de Terzaghi, Equação (1), deveria ser utilizado, apesar de ser conservativo. A plasticidade ou coesão inerente destes solos não influenciavam no dimensionamento dos filtros;
- b) argilas, com d_{85} entre 0,03 e 0,1 mm, o filtro deve possuir um D_{15} não maior que 0,5 mm. A plasticidade e dispersibilidade da argila não influenciam na granulometria do filtro;

- c) siltes de baixa plasticidade, com d_{85} entre 0,03 e 0,1 mm e limite de liquidez menor que 30, o filtro deve possuir um D_{15} não maior que 0,3 mm;
- d) solos extremamente finos, com d_{85} menor que 0,02 mm, o filtro deve possuir um D_{15} igual a 0,2 mm ou menor.

2.2.6 Honjo e Veneziano (1989)

Honjo e Veneziano (1989) estudaram a capacidade de filtros capturarem partículas de solos de baixa coesão, por meio de uma combinação de modelagem física de transporte de partículas de solo e análise estatística do comportamento geral de filtros. No total, foram analisados 287 dados experimentais publicados na literatura. O estudo apresentou, por meio da análise estatística, um importante parâmetro de estabilização de filtragem, o índice de autocicatrização d_{95}/d_{75} , apesar de não haver nenhuma justificativa física da adoção desses diâmetros.

O índice de autocicatrização relaciona a capacidade do solo base formar uma camada satisfatória de autocicatrização, ou seja, uma camada pré-filtro formada por partículas mais grossas do solo base que não foram carregadas para o filtro. Essa camada possui uma granulometria intermediária entre o solo base e filtro, auxiliando, portanto, na captura de partículas menores antes de chegarem ao filtro.

O estudo mostrou que a relação de retenção de Terzaghi, Equação (1), continua sendo o principal parâmetro explicativo do desempenho de um filtro, entretanto, para solos base com granulometria da fração mais grossa e bem graduada, o critério de Terzaghi não é satisfatório. Para tanto, Honjo e Veneziano (1989) apresentaram uma modificação no critério de Terzaghi, considerado válido somente quando o índice de autocicatrização for menor ou igual a sete.

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq \left(5,5 - 0,5 \frac{d_{95}}{d_{75}} \right) \quad (7)$$

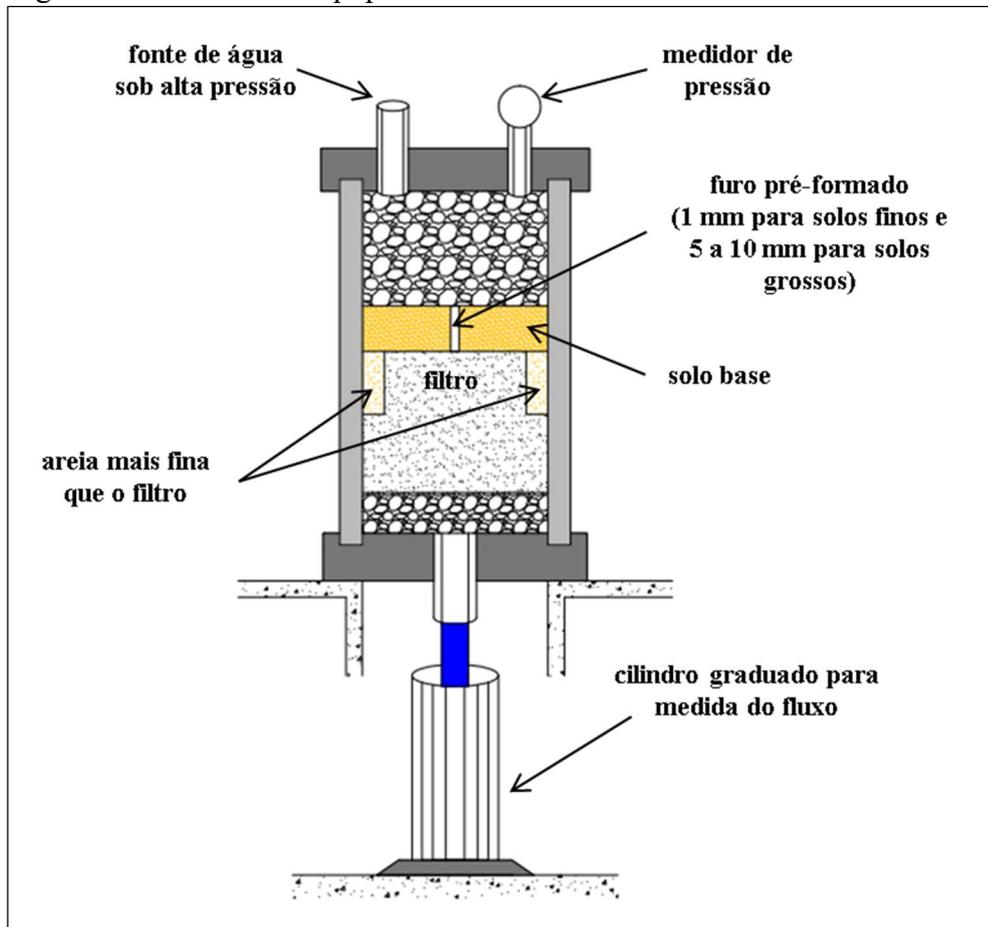
Percebe-se que, conforme a gradação das partículas aumenta, ocorre uma diminuição no fator de segurança do critério de Terzaghi, portanto quanto maior for a faixa de tamanho dos grãos, medido pelo índice de autocicatrização d_{95}/d_{75} , mais restritivo deve ser a relação de Terzaghi. Vale destacar, novamente, que Karpoff (1955) também estudou solos bem

graduados, sugerindo que somente os diâmetros de Terzaghi não eram suficientes para efetivar o sucesso de um filtro.

2.2.7 *Sherard e Dunnigan (1989)*

Sherard e Dunnigan (1989) desenvolveram um novo método de ensaio de filtragem e propuseram novas relações granulométricas de filtros satisfatórios para diferentes tipos de solo base. O método de ensaio foi chamado de *No Erosion Filter* – NEF e consiste, resumidamente, em submeter um fluxo de água sob pressão em uma combinação de granulometrias de solo base e filtro. Nesse ensaio, semelhante ao método de *Slot Test*, um canal de escoamento é induzido na camada do solo base antes de iniciar o fluxo de água. O filtro era definido como satisfatório quando nenhuma erosão visível ocorria no canal de escoamento e uma fina camada de partículas finas se formava na interface do filtro, interrompendo o fluxo concentrado. Os detalhes do equipamento são mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Detalhes do equipamento do ensaio NEF



Fonte: Adaptado de Sherard e Dunnigan (1989).

O estudo de Sherard e Dunnigan (1989) apresentou novas relações de retenção de filtros, dependentes da quantidade de finos presente no solo. Foram definidos quatro grupos de solos base, de acordo com a quantidade de partículas passantes na peneira N° 200. Os critérios de classificação dos grupos de solo base e suas respectivas relações de retenção estão apresentados na Tabela 2. O estudo ressalta a necessidade de um ajuste de regradação das curvas granulométricas dos solos base que apresentem partículas maiores que 4,75 mm, exceto para o grupo 3. Partículas maiores que 4,75 mm não têm influência no comportamento do ensaio e, portanto, foi concluído que não têm influência na efetividade do processo de filtração. O ajuste de regradação é feito ao determinar uma nova curva granulométrica, considerando apenas as partículas passantes na peneira N° 4 (4,75 mm). Tais relações e recomendações foram adotadas nos manuais de projetos de filtros do *U.S. Department of Agriculture* (NRCS, 1994), sendo um dos mais utilizados nos Estados Unidos e em outros países (PIMENTA FILHO, 2013).

Tabela 2 – Relações granulométricas segundo Sherard e Dunnigan (1989)

	Grupo	% passante na peneira N° 200	Critério de retenção
Finos	1	> 85%	$D_{15} \leq 9d_{85}$, mas não menor que 0,2 mm
	2	85% - 40%	$D_{15} \leq 0,7$ mm
Grossos	3	$\leq 15\%$	$D_{15} \leq 4d_{85}$
	4	40% - 15%	$D_{15} \leq \left(\frac{40 - \% \text{ de finos}}{40 - 15} \right) (4d_{85} - 0,7) + 0,7$

Fonte: Adaptado de Sherard e Dunnigan (1989).

2.2.8 Lafleur et al. (1989)

Lafleur, Mlynarek e Rollin (1989) estudaram os mecanismos de filtragem em solos base de baixa coesão amplamente graduados ($Cu > 20$), apresentando dois processos fundamentais nestes solos: a autofiltração e a estabilidade interna. A autofiltração consiste no processo de retenção gradual, iniciado pela captura das partículas mais grossas na interface com o filtro granular, que, progressivamente, promove a formação de camadas, que auxiliam na retenção de partículas cada vez menores, similar à camada autocicatrizante apresentada por Honjo e Veneziano (1989). A estabilidade interna consiste na capacidade de a granulometria promover o processo de autofiltração, formando um sistema solo base/filtro estável com a menor perda de partículas finas possível.

O foco do estudo foi determinar qual o melhor tamanho indicativo do solo base para a relação de retenção de solos com granulometria amplamente graduados ($C_u > 20$), semelhante ao que o d_{85} representa para os solos base uniformes, que implicasse em perda insignificante de partículas. Os resultados mostraram que, para solos com granulometria linearmente graduada, o tamanho mínimo do d_{50} leva a uma situação de equilíbrio entre as camadas formadas pela autofiltração. Para solos com granulometria descontínua (*gap-graded soils*), o diâmetro representativo deve corresponder à fração fina da descontinuidade desde que as partículas grossas desse solo não interfiram na autofiltração.

2.3 Critérios de instabilidade interna baseados na distribuição de partículas

A susceptibilidade de solos bem graduados ou de granulometria descontínua estarem sujeitos à instabilidade interna depende bastante da forma na qual suas partículas estão distribuídas. Esses solos podem apresentar uma configuração, onde um desequilíbrio cria: uma fração grossa, que é estrutural, mas com poucos grãos em contato sob altas tensões; e uma fração fina, não estrutural, com grãos livres para se movimentar, sem ocorrer qualquer transferência de tensões entre eles (RÖNNQVIST; VIKLANDER, 2014).

Segundo o ICOLD (2017), a sufusão é definida como um mecanismo de início de erosão interna no qual as partículas da fração fina de solos internamente instáveis são carregadas pelo fluxo de água através dos espaços vazios formados pela fração grossa. Para tanto, três condições devem ser atendidas:

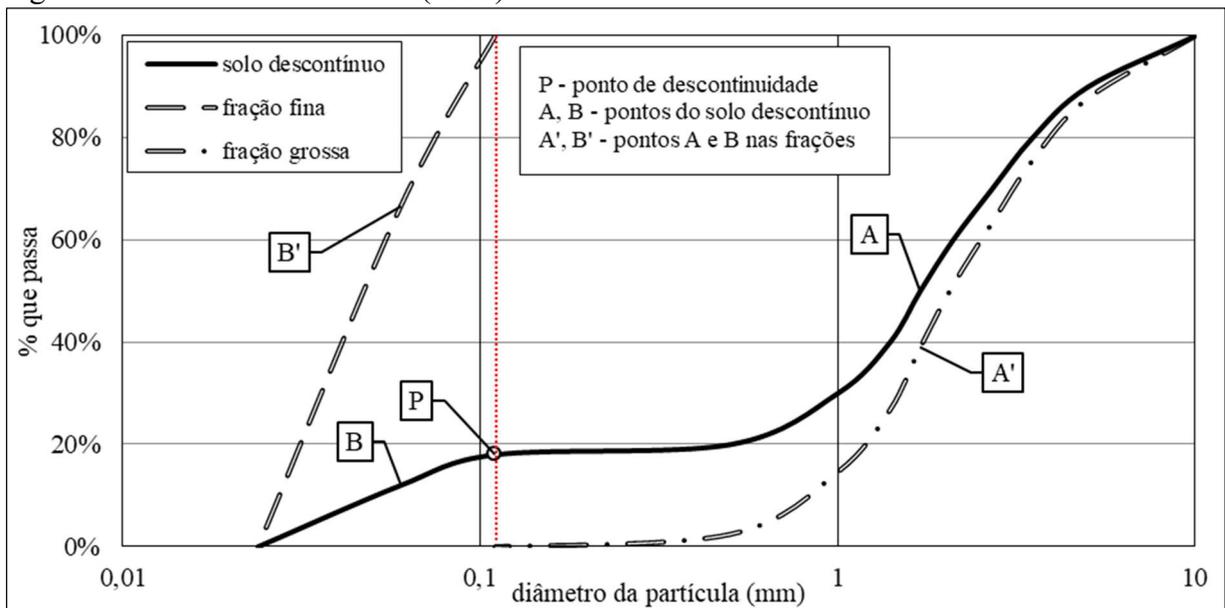
- a) o tamanho das partículas finas deve ser menor que os espaços vazios formados pelas partículas grossas;
- b) a quantidade de partículas finas deve ser menor o bastante para preencher os vazios internos formados pela fração grossa. Se houver mais que o necessário, as partículas grossas estarão envoltas por partículas finas, “flutuando” na matriz de finos, reduzindo os contatos entre os grãos maiores e, portanto, impedindo de formar a estrutura resistente do solo;
- c) a velocidade do fluxo deve impor tensões suficientemente altas para superar as tensões efetivas do solo e movimentar as partículas finas pelos espaços vazios.

2.3.1 De Mello (1975)

O critério de De Mello (1975) foi desenvolvido para solos descontínuos (*gap-graded soils*) e consiste em separar a curva granulométrica a partir do ponto (*P*) ou diâmetro que indica a descontinuidade de grãos, conforme ilustra a Figura 7. Dessa forma, duas novas curvas são geradas: uma fração fina, composta pelas partículas com tamanhos inferiores ao ponto de descontinuidade; e uma fração grossa, composta pelas partículas maiores que a descontinuidade. O método utiliza a expressão de retenção de Terzaghi, Equação (8), onde D_{15G} é o diâmetro relativo a 15% mais fino da fração grossa e d_{85F} é o diâmetro relativo a 85% mais fino da fração fina.

$$\frac{D_{15G}}{d_{85F}} \leq 4 \quad (8)$$

Figura 7 – Método de De Mello (1975)



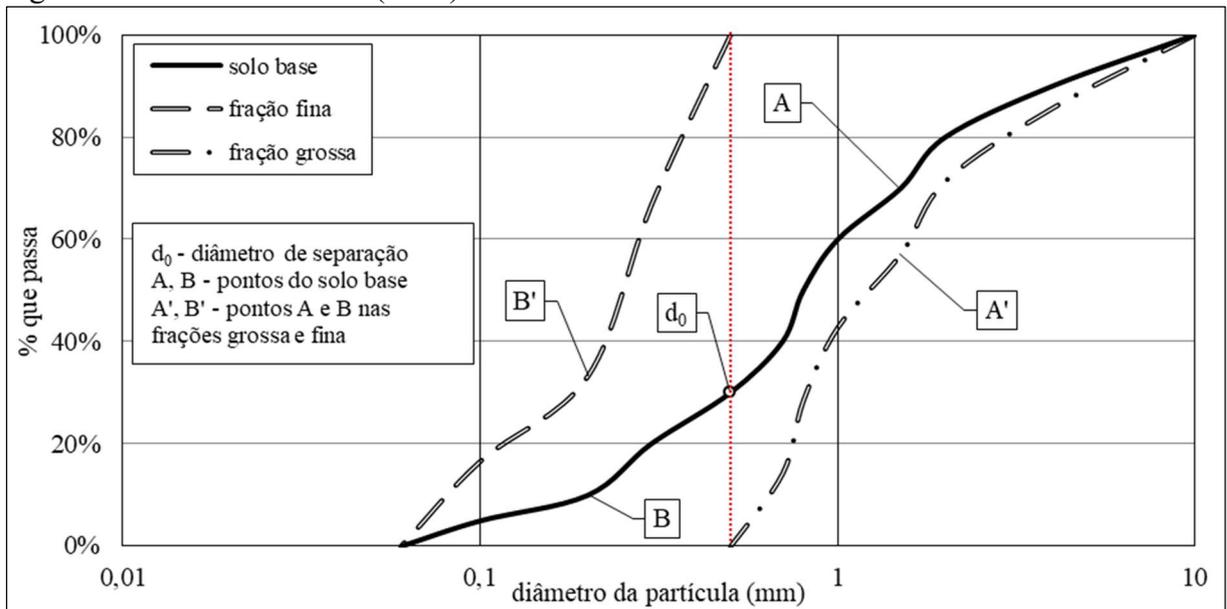
Fonte: Adaptado de De Mello (1975).

2.3.2 Kézdi (1979)

Kézdi (1979 *apud* MOFFAT, 2002) realizou estudos acerca de solos internamente instáveis, partindo da hipótese que tais solos apresentariam duas componentes de graduação, a primeira, formada por partículas que teriam função de filtrar as partículas da segunda componente. Caso a primeira atendesse ao critério de retenção de Terzaghi em relação a segunda, então o solo possuiria estabilidade. A divisão da curva do solo entre as duas

componentes é feita de forma arbitrária, definindo um diâmetro d_0 de separação, semelhante ao ponto de descontinuidade de De Mello (1975), conforme ilustra a Figura 8. É sugerido que sejam definidos d_0 's suficientes para atestar a capacidade filtrante de toda a abrangência da granulometria.

Figura 8 – Método de Kézdi (1979)

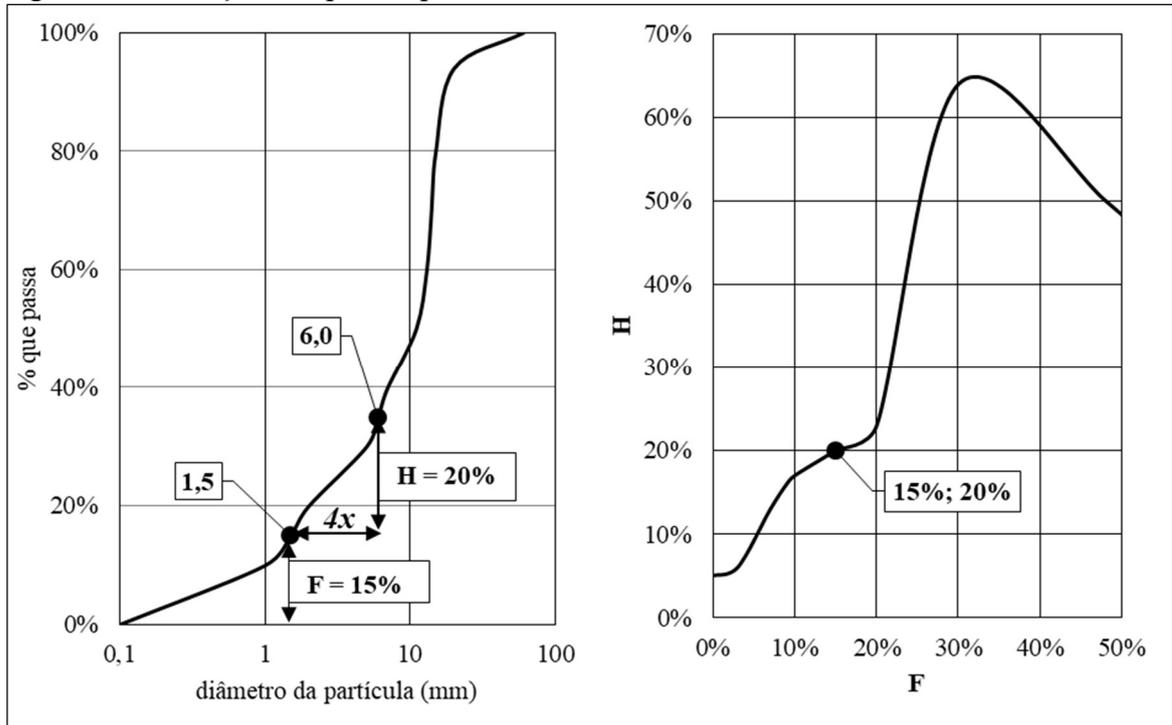


Fonte: elaborada pelo autor.

2.3.3 Kenney e Lau (1985, 1986)

O método de Kenney e Lau (1985, 1986 *apud* RÖNNQVIST; VIKLANDER, 2014) foi desenvolvido a partir de observações experimentais de amostras de areias bem graduadas submetidas a um fluxo unidirecional descendente, com carga constante de 10 kPa. Se ocorresse alguma alteração na curva granulométrica após o ensaio, significava que o solo apresentou instabilidade interna. O método consiste numa análise para filtros ou zonas de transição com menos de 5% finos, por meio de uma curva de forma $H-F$, ilustrada na Figura 9, onde F representa a porcentagem em massa de partículas com diâmetro inferior a um tamanho aleatório D e H representa a porcentagem em massa de partículas com diâmetros compreendidos entre D e $4D$, ou seja, o acréscimo na porcentagem que ocorre nesse intervalo.

Figura 9 – Obtenção dos pontos para a curva de forma H-F

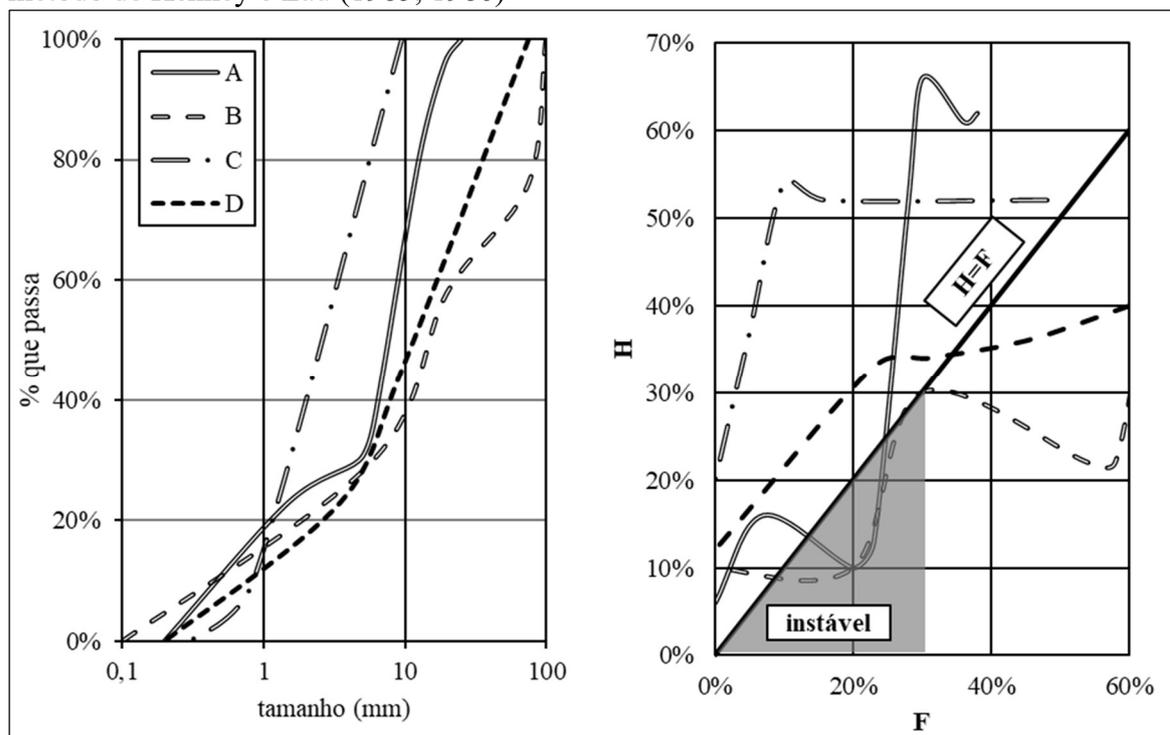


Fonte: elaborada pelo autor.

Em outras palavras, o método avalia a deficiência na distribuição dos grãos, considerando o diâmetro equivalente médio dos vazios quatro vezes menor que o diâmetro equivalente médio do solo, por isso a adoção do intervalo fixo entre D e $4D$. Ainda na Figura 9 é exemplificado a forma de obtenção de pontos para a curva de forma $H-F$, onde são lidos, na curva à esquerda, o diâmetro D igual a 1,5 com o respectivo valor de F de 15% e o diâmetro $4D$ de 6 com H de 20%. O ponto determinado ($F=15\%$; $H=20\%$) é apresentado na curva à direita.

Quando a curva $H-F$, obtida a partir da curva granulométrica do material, se localizar abaixo da reta $H=F$, no trecho de $F \leq 30\%$, para solos uniformes ou $F \leq 20\%$, para solos bem graduados, o material possui instabilidade interna. Ao analisar os exemplos de curvas de solos apresentados na Figura 10, percebe-se que os solos A e B localizam-se abaixo da reta $H=F$ no trecho $F \leq 30\%$ (área sombreada) e, portanto, são considerados instáveis.

Figura 10 – Exemplos de curvas de solos estáveis e instáveis internamente segundo o método de Kenney e Lau (1985, 1986)



Fonte: Adaptado de Kenney e Lau (1985, 1986).

2.3.4 Moffat (2002)

Moffat (2002) realizou um estudo de instabilidade interna, envolvendo ensaios em solos com granulometrias publicadas nos estudos de Kenney e Lau (1985) e Honjo, Haque e Tsai (1996). Os ensaios consistiram em submeter as amostras de solos a um fluxo de água descendente, com aplicação de gradientes hidráulicos de 10^{-1} , 1, 10 e 20, cada um por um período de 90 minutos, com vibrações manuais quando atingia o último gradiente. Além disso, uma sobrecarga de 25 kPa era aplicada na camada superior das amostras. Os resultados mostraram que o critério de Kédzi (1979) mostrou-se bem mais confiável para prever a instabilidade interna de solos comparado ao método de Kenney e Lau (1985, 1986). Ainda, sugere-se que o método de Kenney e Lau (1985, 1986) seja revisado no tocante ao limite máximo da porcentagem F que é analisada pela reta $H=F$, ou seja, os limites de $F \leq 30\%$, para solos uniformes ou $F \leq 20\%$, para solos bem graduados.

2.3.5 Li (2008)

Li (2008) realizou uma análise dos critérios de avaliação de instabilidade interna por meio de uma série de testes em seis solos amplamente graduados (*widely graded soils*) de baixa coesão. Dois permeâmetros foram utilizados, um menor que se limitava a solos com partículas inferiores a 8 mm, atingindo um gradiente hidráulico máximo de 15, e outro maior para solos com partículas inferiores a 23 mm, atingindo um gradiente máximo de 65. Os testes foram realizados com as amostras submetidas a sobrecargas variadas de 25 kPa a 200 kPa. Os resultados do estudo mostraram que o método de Kézdi (1979) foi mais efetivo para avaliar instabilidade de solos descontínuos (*gap graded soils*), quando o d_0 foi escolhido entre a descontinuidade, enquanto que o método de Kenney e Lau (1985, 1986) foi mais efetivo para solos amplamente graduados. Ambos os métodos apresentaram ser conservativos, Kézdi (1979) quando o d_0 adotado é inferior ao D_{15} do solo e Kenney e Lau (1985, 1986) quando o F é superior a 15%. Li (2008) sugere uma combinação entre os dois métodos para melhorar a distinção entre granulometrias estáveis e instáveis, aplicando o critério de Kézdi (1979) na fração crítica de Kenney e Lau (1985, 1986), fração da curva com $F > 15\%$.

2.4 Critérios baseados na distribuição das constrições

Os critérios baseados na distribuição das constrições consistem em determinar por meio de uma metodologia geométrica e analítica a distribuição das constrições internas de um filtro granular. As constrições podem ser definidas como as menores aberturas existentes que dão acesso aos poros internos de um solo granular. Os primeiros estudos sobre as constrições procuravam verificar a espessura ideal de filtros, na qual a movimentação de partículas de determinado tamanho carregadas pelo fluxo cessava, mesmo quando a granulometria não atendia aos critérios usuais de dimensionamento. Outros estudos, por outro lado, já investigaram a relação da capacidade filtrante de solos com um tamanho característico de uma constrição. Alguns dos estudos acerca das constrições são apresentados nos itens a seguir.

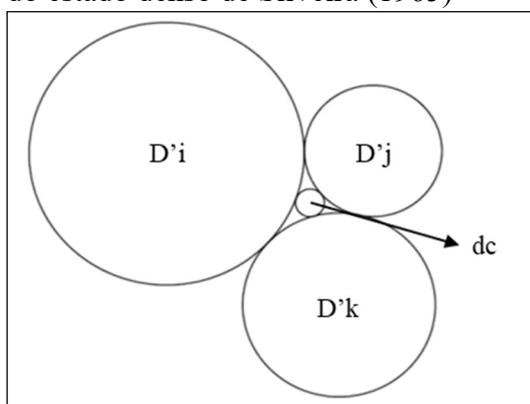
2.4.1 Silveira (1965)

O estudo de Silveira (1965) foi um dos primeiros a analisar os problemas de filtragem por meio de uma abordagem analítica de determinação da distribuição das constrições dos filtros. Seu trabalho propôs uma metodologia geométrica-probabilística para o cálculo da

distribuição das constrições, baseada numa verificação de um provável deslocamento de uma partícula aleatória d através do filtro. O deslocamento da partícula irá depender do tamanho das constrições dc confrontadas ao longo do caminho, de forma que, se a partícula for menor que a constrição, ou seja, $d < dc$, a partícula continuará se movimentando, ao passo que se a partícula for maior que a constrição, ou seja, $d > dc$, a movimentação da partícula será interrompida. Silveira (1965) relacionou a quantidade de confrontos λ necessários para que uma partícula d , em movimentação, encontre uma constrição inferior ao seu tamanho e seja parada, assumindo um certo nível de confiança Nc . Para tanto, é condição necessária a determinação da distribuição dos tamanhos das constrições.

Silveira (1965) admitiu as seguintes hipóteses fundamentais: (a) solo estaria no estado máximo de compacidade, o estado denso; (b) as partículas seriam consideradas com formatos esféricos; e (c) a posição relativa das partículas seriam aleatórias. Para representar o estado denso, foi considerado um arranjo de três partículas aleatórias i, j e k , tangentes entre si, conforme ilustra a Figura 11.

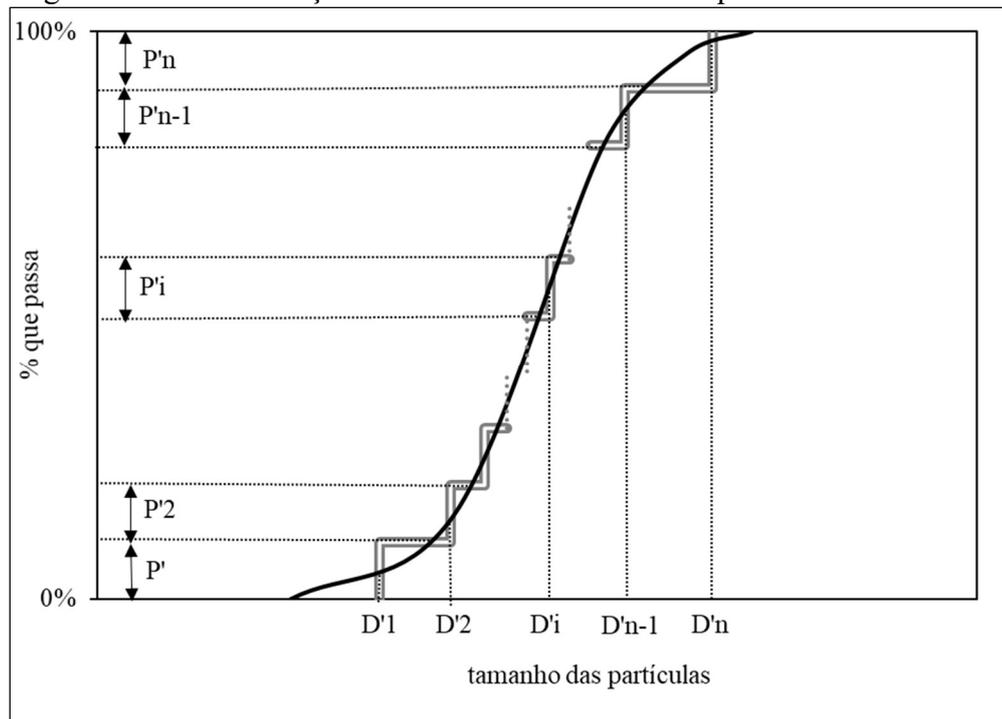
Figura 11 – Agrupamento característico do estado denso de Silveira (1965)



Fonte: Adaptado de Silveira (1965).

A base da metodologia de Silveira (1965) está na curva granulométrica do solo granular. Por meio dessa, são determinados os diâmetros médios D' , que representam a média para um determinado intervalo de tamanho, com sua respectiva frequência de ocorrência P' . A Figura 12 esquematiza a determinação dos diâmetros médios e suas frequências de ocorrência.

Figura 12 – Determinação dos diâmetros médios e frequências de ocorrências



Fonte: Adaptado de Silveira (1965).

As equações de Silveira (1965) para o cálculo do tamanho da constrição do estado denso e de sua frequência são apresentadas a seguir, onde: $D'i$, $D'j$ e $D'k$ são os diâmetros das partículas i , j e k do agrupamento; $P'i$, $P'j$ e $P'k$ são as frequências das partículas; r_i , r_j e r_k são o número de vezes que as partículas i , j e k se repetem num mesmo agrupamento; e dc_d e Pc_d são, respectivamente, o diâmetro da constrição e a sua frequência de ocorrência.

$$\begin{aligned}
 [(D'i + D'j + D'k)D'i.D'j.D'k]^{1/2} &= [(D'i + D'j + dc_d)D'i.D'j.dc_d]^{1/2} \\
 &+ [(D'i + dc_d + D'k)D'i.dc_d.D'k]^{1/2} \\
 &+ [(dc_d + D'j + D'k)dc_d.D'j.D'k]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$Pc_d = \frac{3!}{r_i! r_j! r_k!} (P'i)^{r_i} \cdot (P'j)^{r_j} \cdot (P'k)^{r_k} \tag{10}$$

O principal objetivo do estudo de Silveira (1965) foi definir a espessura necessária para um filtro granular ideal conseguir com sucesso aprisionar determinada partícula do solo base e assim, eventualmente, estabilizar a movimentação das partículas mais finas. A metodologia define um número de confrontos λ que uma partícula de tamanho d é submetida até que encontre uma constrição pequena o suficiente para aprisioná-la, segundo um

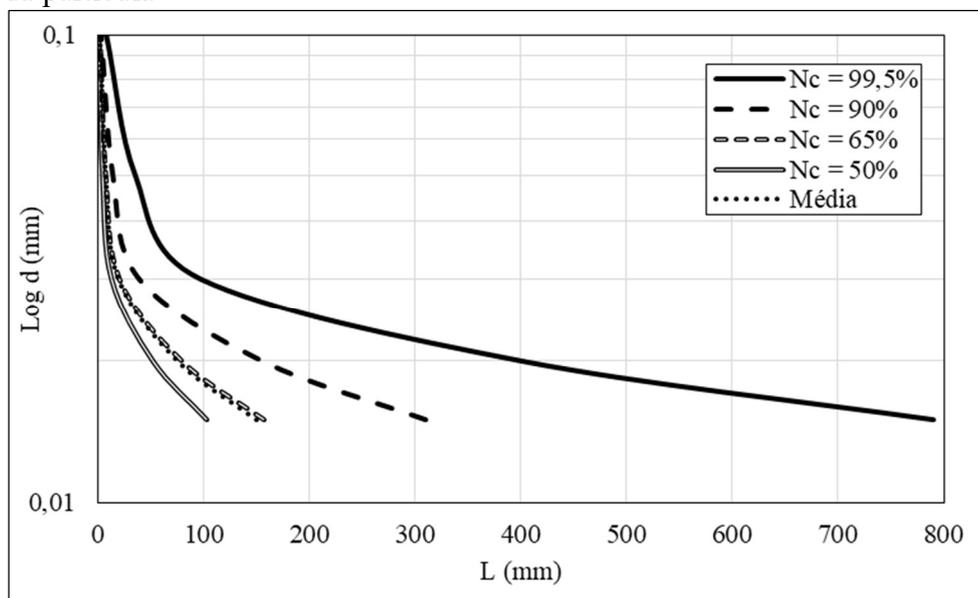
determinado nível de confiança N_c . Para tanto, a espessura do filtro L deve proporcionar confrontos suficientes para impedir o transporte de uma partícula d , de acordo com as expressões a seguir, onde p é a porcentagem de constrições com tamanho inferior a partícula d e D_{50} é o diâmetro médio do filtro que representa o deslocamento médio entre uma constrição a outra.

$$\lambda = \frac{\log(1 - N_c)}{\log p} \quad (11)$$

$$L = D_{50} \cdot \lambda \quad (12)$$

Na Figura 13 são apresentadas as curvas de infiltração de partículas de um determinado filtro granular para diferentes valores de N_c . Silveira (1965) ressalta que, a partir dessas curvas, é possível ter uma visão geral da contaminação por partículas erodidas no interior de um filtro, de forma que, traçando-se uma linha horizontal em qualquer um dos diâmetros, a interseção com a curva $L = (d, N_c)$ mostra o comprimento do caminho percorrido por N_c (%) de partículas, ou seja, o comprimento que uma partícula percorre até encontrar uma constrição capaz de restringir seu movimento para um nível de confiança N_c . É claro que essa análise é feita considerando o filtro limpo, podendo também ser realizada de forma interativa considerando a contaminação gradual do filtro.

Figura 13 – Exemplos de curva de infiltração de partículas *versus* diâmetro da partícula

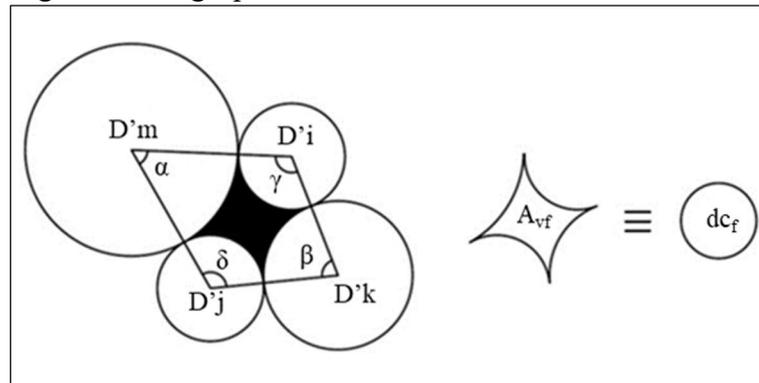


Fonte: Adaptado de Silveira (1965).

2.4.2 Silveira et al. (1975)

Considerando que filtros granulares dificilmente estão compactados em seu estado máximo de compacidade, Silveira, Peixoto Júnior e Nogueira (1975 *apud* RAUT, 2006) apresentaram uma nova forma de cálculo da distribuição das constrições, assumindo um estado de compacidade mínimo, um estado fofo. Nessa nova configuração de densidade, foi proposto um novo agrupamento de grãos representativo do estado fofo, formado por quatro partículas, conforme ilustra a Figura 14. Nesse agrupamento foi inserido o termo constrição equivalente, no qual a área livre compreendida pelas quatro partículas é equiparada a uma circunferência de diâmetro dc_f . Ressalta-se que deve ser considerado o maior valor de área formada pelo agrupamento. Segundo Raut (2006), diferente da configuração mais densa, as constrições geralmente não são formadas no plano dos centros de todas as quatro partículas, sendo recomendado por Schuler (1996) usar a média de todos os possíveis comprimentos de corda para representar o diâmetro aparente da partícula, que é cerca de 0,82 vezes o diâmetro atual. As equações para o diâmetro da constrição e sua frequência de ocorrência são apresentadas a seguir, onde: $D'i$, $D'j$, $D'k$ e $D'm$ são os diâmetros médios do agrupamento; α , β , γ e δ são os ângulos internos; e A_{vf} é a área livre formada pela tangência das partículas.

Figura 14 – Agrupamento característico do estado



Fonte: Araújo (2017).

$$A_{vf} = \frac{1}{8} \left[(D'm + D'i)(D'm + D'j)\text{sen}\alpha + (D'k + D'i)(D'k + D'j)\text{sen}\beta \right. \\ \left. - (\alpha D'm^2 + \beta D'k^2 + \gamma D'i^2 + \delta D'j^2) \right] \quad (13)$$

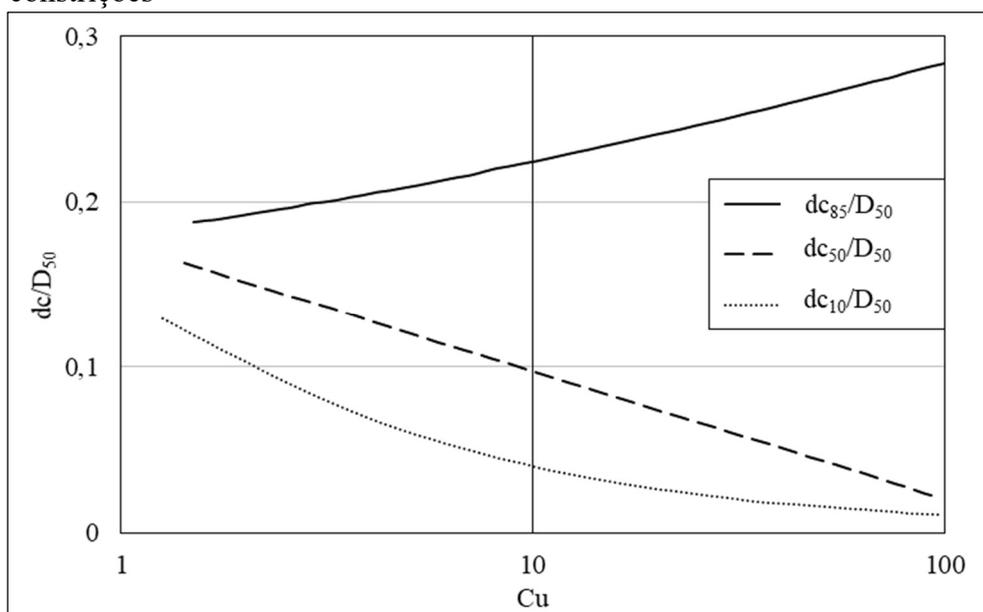
$$dc_f = \sqrt{\frac{4A_{vf}}{\pi}} \quad (14)$$

$$P_{C_f} = \frac{4!}{r_i! r_j! r_k! r_m!} (P'_i)^{r_i} \cdot (P'_j)^{r_j} \cdot (P'_k)^{r_k} \cdot (P'_m)^{r_m} \quad (15)$$

2.4.3 Musso e Federico (1982)

De Mello (1977) analisou o modelo analítico de Silveira (1965) e Silveira, Peixoto Júnior e Nogueira (1975), no qual foram baseados para curvas de filtros uniformes, e mostrou que ocorre um aumento na razão entre o dc_{85} , diâmetro da constrição correspondente a 85% mais fino, e o D_{50} , diâmetro médio da partícula do filtro, com o aumento do coeficiente de uniformidade, conforme mostra a Figura 15. Diferente do que ocorre com as outras constrições, dc_{50} e dc_{10} . Isto significa que as menores constrições tendem a diminuir de tamanho com o aumento do Cu , enquanto que as maiores constrições tendem a aumentar o tamanho com o Cu . Entretanto, tal resultado difere do que é esperado ocorrer, uma vez que com o aumento do Cu , as menores partículas tendem a ocupar as constrições formadas pelas maiores partículas, o que resulta em menores constrições, e, portanto, o modelo não é adequado para determinar a distribuição de constrições de solos granulares bem graduados. Nesse caso, a curva de dc_{85}/D_{50} deveria decrescer.

Figura 15 – Influência do coeficiente de uniformidade na formação das constrições



Fonte: Adaptado de De Mello (1977).

Musso e Federico (1982) apontaram que ao utilizar as frequências de ocorrência por meio da curva de distribuição granulométrica “normal”, ou seja, a obtida pelo ensaio de

peneiramento, introduz-se o erro em filtros bem graduados. Devido à curva granulométrica ser definida por meio das porcentagens passantes em função da massa dos grãos, as maiores partículas de solos bem graduados possuíam uma massa maior, entretanto como estão em número menor, os contatos entre elas seriam reduzidos. Portanto, seria improvável que as maiores partículas se agrupassem e formassem grandes constrições já que haveriam partículas menores, mas em maior número, que ocupariam as possíveis grandes constrições e as reduziriam. Para tanto, Musso e Federico (1982) propuseram considerar as frequências das partículas em função do número de partículas do solo P_{np} , convertendo as frequências em massa por meio da Equação (16). Além disso, apresenta uma equação alternativa para o cálculo das constrições para o estado denso, por meio da Equação (17).

$$P_{np,i} = \frac{\frac{P_i}{D_i^3}}{\sum_{x=1}^N \frac{P_x}{D_x^3}} \quad (16)$$

$$\left(\frac{2}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_j}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_k}\right)^2 + \left(\frac{2}{dc_d}\right)^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2}{D_i}\right) + \left(\frac{2}{D_j}\right) + \left(\frac{2}{D_k}\right) + \left(\frac{2}{dc_d}\right) \right]^2 \quad (17)$$

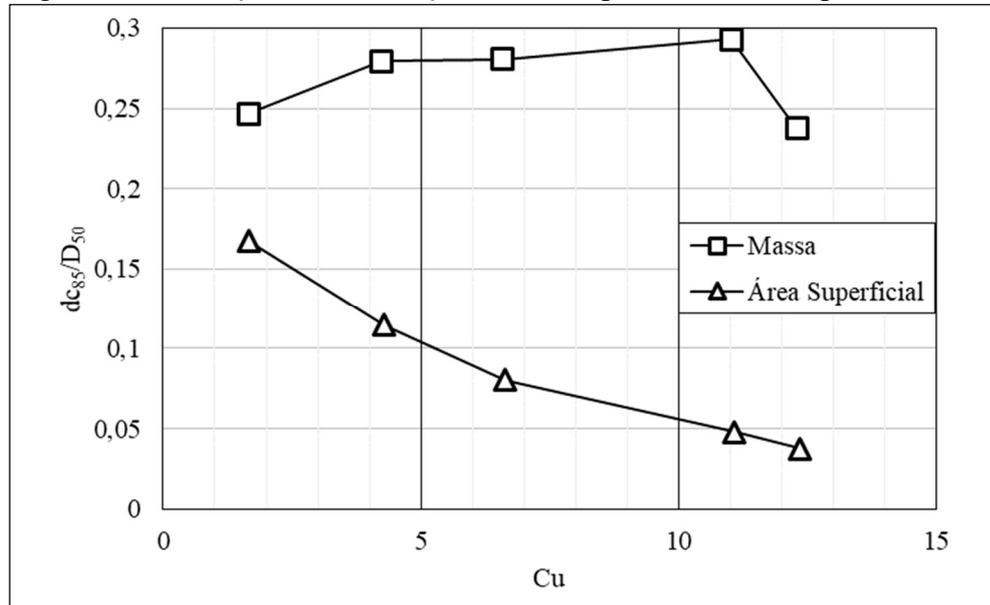
2.4.4 Humes (1998)

Humes (1998) criticou os métodos de Silveira (1965) e de Musso e Federico (1982), no tocante à forma na qual as frequências de ocorrências das partículas eram utilizadas, em função da massa ou do número de partículas. Conforme demonstrado por De Mello (1977), Figura 15, o método de Silveira (1965) produz constrições muito maiores por conta do efeito das frequências em massa, pois quanto maior a partícula, maior a massa e, então, maior a participação na formação de constrições, o que não ocorre em solos não uniformes.

No método de Musso e Federico (1982), as frequências em função do número de partículas apresenta uma supervalorização na formação de constrições menores, devido ao grande número de partículas pequenas. Humes (1998) considerou que a melhor abordagem para as frequências deveria ser em função da área superficial das partículas, pois o que define a formação das constrições são os contatos entre as partículas. Então, quanto maior a superfície da partícula, maior a sua participação nos agrupamentos que formam as constrições. Locke (2001), Raut (2006) e Nguyen (2012) consideram essa abordagem como a mais representativa

para uma análise de filtração. Humes (1998) definiu a Equação (18) para converter as frequências em massa das partículas para área superficial P_s .

Figura 16 – Redução das constrições com a hipótese de área superficial



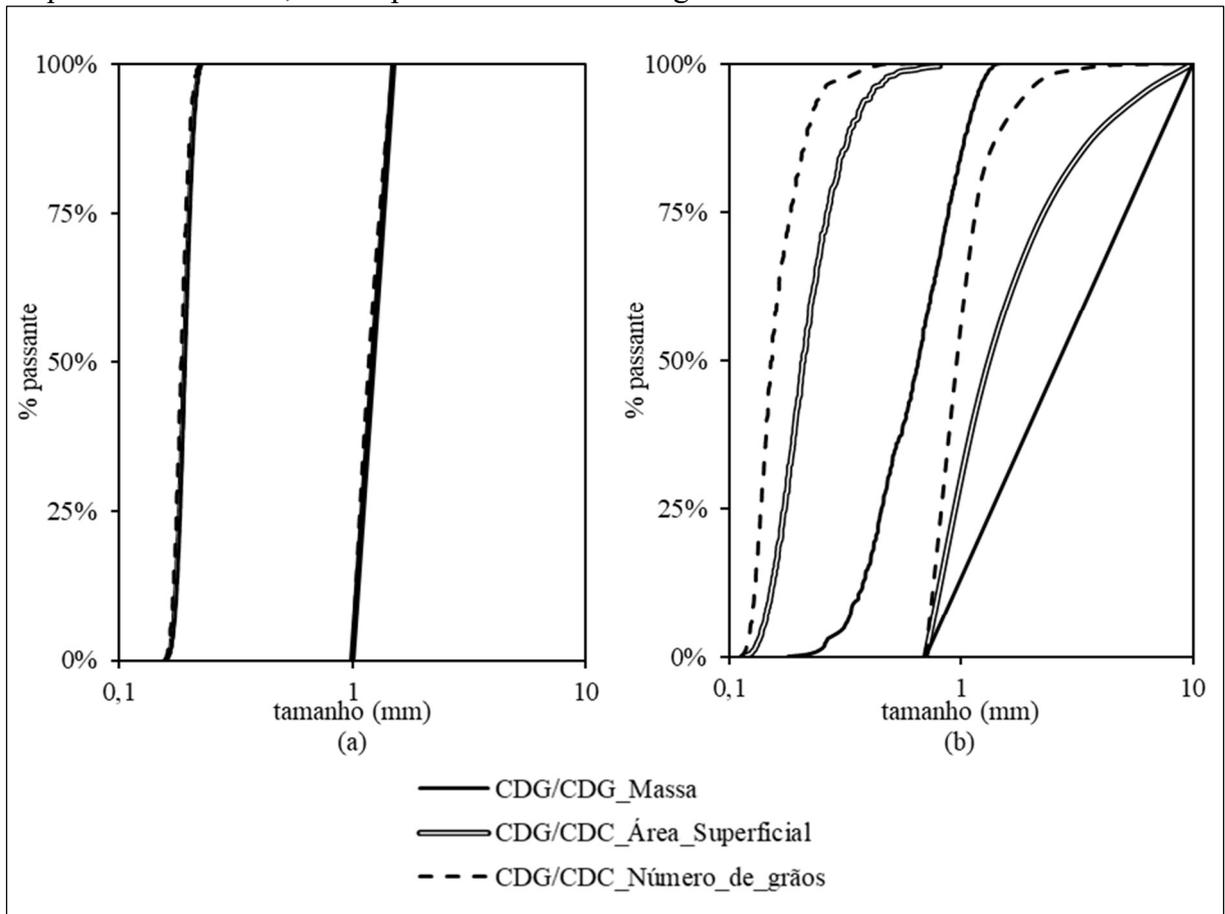
Fonte: Adaptado de Humes (1998).

$$P_{s,i} = \frac{P'_i}{\overline{D'_i}} \quad (18)$$

$$\sum_{x=1}^N \frac{P'_x}{\overline{D'_x}}$$

Conforme mostra a Figura 16, a relação de dc_{85}/D_{50} , apresentada por Humes (1998), decresce com o aumento do coeficiente de uniformidade para a hipótese de área superficial, que é o resultado esperado. A seguir são apresentadas curvas de distribuição granulométricas (CDG) e de constrição (CDC) para um filtro uniforme, Figura 17(a) e bem graduado, Figura 17(b), no qual é evidente a influência do coeficiente de uniformidade na determinação das constrições e numa análise de efetividade granulométrica do material.

Figura 17 – Curvas de distribuição granulométrica e de constrições para as hipóteses de frequências em massa, área superficial e número de grãos



Fonte: Adaptado de Raut (2006).

2.4.5 Locke et al. (2001)

Nos modelos anteriores (SILVEIRA, 1964; SILVEIRA; PEIXOTO JÚNIOR; NOGUEIRA, 1975) as constrições eram determinadas baseadas num tipo específico de agrupamento dos grãos para os estados extremos de compacidade, denso e fofo. Entretanto, dificilmente um filtro consegue atingir esses estados completamente, estando na verdade num estado intermediário. Locke, Indraratna e Adikari (2001) apresentaram uma abordagem mais realista para distribuição das constrições, considerando a influência do índice de densidade (I_D) na formação das constrições. O índice de densidade avalia o estado de compacidade de um solo granular, comparando-se o índice de vazios do solo com os valores máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}), quanto maior o índice, mais compacto está o solo, conforme é expresso na Equação (19).

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (19)$$

O método baseia-se nos resultados do estudo de Schuler (1996) e Giroud (1996), propondo: o aumento no diâmetro das constrições ocorre linearmente, proporcional ao decréscimo do índice de densidade do filtro; e o valor da menor constrição, independente do estado de compactação, é igual à menor constrição definida no estado denso.

Os diâmetros das constrições são calculados, dividindo-se as distribuições dos estados denso e fofo em “ N ” partes, sendo cada uma representada por um inteiro x , que varia de 0 a N , e uma probabilidade acumulada de $100^x/N\%$. O cálculo dos diâmetros é realizado pela Equação (20), onde $dc_{d,x}$, $dc_{f,x}$ e dc_x são respectivamente as constrições obtidas para o estado denso, fofo e intermediário todos correspondentes a $100^x/N\%$ e I_D é o índice de densidade do filtro. Na Figura 18 são apresentadas curvas de distribuição de constrições representativas para quatro estados de compactação.

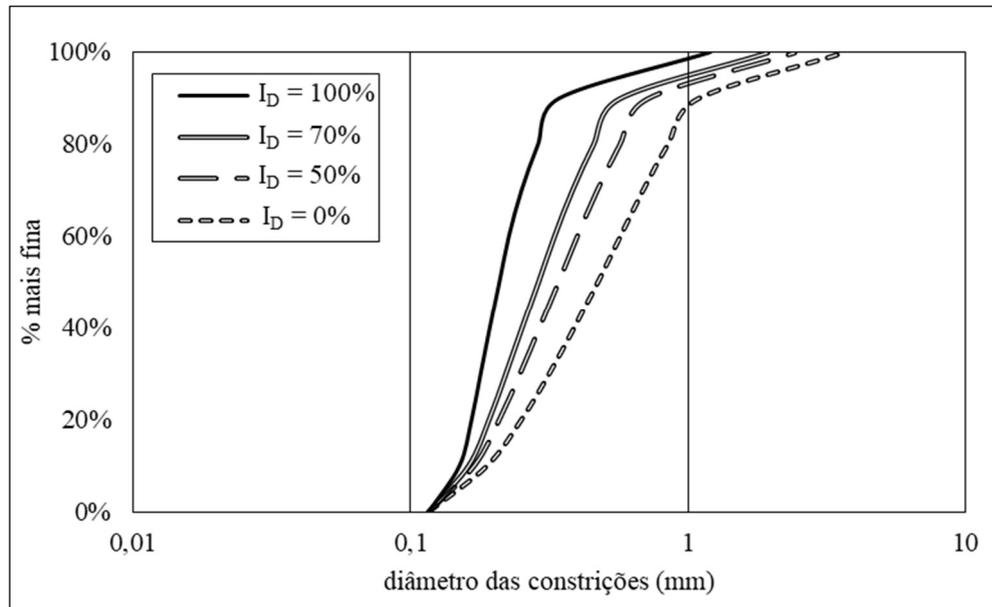
$$dc_x = dc_{d,x} + \frac{x}{N}(1 - I_D)(dc_{f,x} - dc_{d,x}) \quad (20)$$

Locke, Indraratna e Adikari (2001) também propuseram um método para estimar a distância L que uma partícula d consegue infiltrar no interior do filtro até ser aprisionado por uma constrição menor que seu tamanho, considerando um modelo de rede cúbico regular de poros e constrições de Schuler (1996) ilustrado na Figura 19. Nesse modelo, um poro é formado por seis diferentes constrições que dão acesso ao seu interior. Quando uma partícula entra num poro por uma destas constrições, há a possibilidade de movimentar-se pelas outras cinco saídas existentes. Para tanto, a análise probabilística proposta considera essas novas possibilidades de saída na estimativa de percurso da partícula ao definir uma probabilidade $P(G)$ de uma partícula atravessar qualquer uma das constrições que formam o poro, seguindo a direção do fluxo de água, variando em função da probabilidade p definida anteriormente por Silveira (1965). Dessa forma, o número de confrontos λ , apresentado na Equação (11), foi redefinido segundo a Equação (22). Locke, Indraratna e Adikari (2001) sugerem adotar nas análises de percurso um valor de Nc igual a 95%.

$$P(G) = p + \sum_{i=0}^{\infty} [1 - (1-p)^4]^i (1-p)p\{[1 - (1-p)^3]^i (1-p)\}^i \quad (21)$$

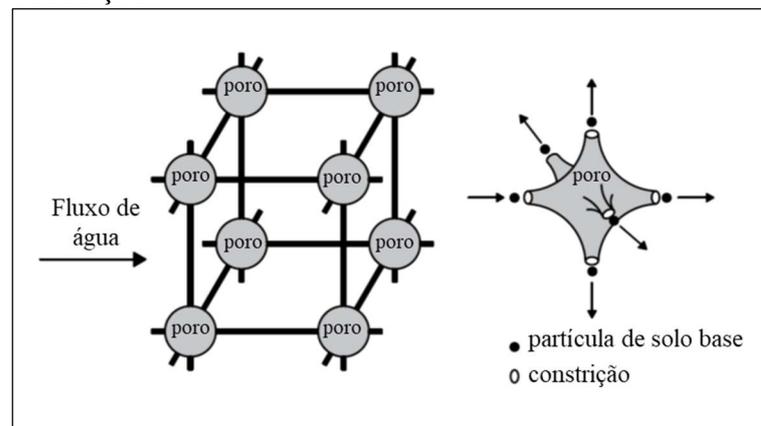
$$\lambda = \frac{\log(1 - Nc)}{\log P(G)} \quad (22)$$

Figura 18 – Curvas de distribuição de constrições para I_D iguais a 100%, 70%, 50% e 0%



Fonte: Araújo (2017).

Figura 19 – Modelo de rede cúbica regular de poros e constrições



Fonte: Araújo (2017).

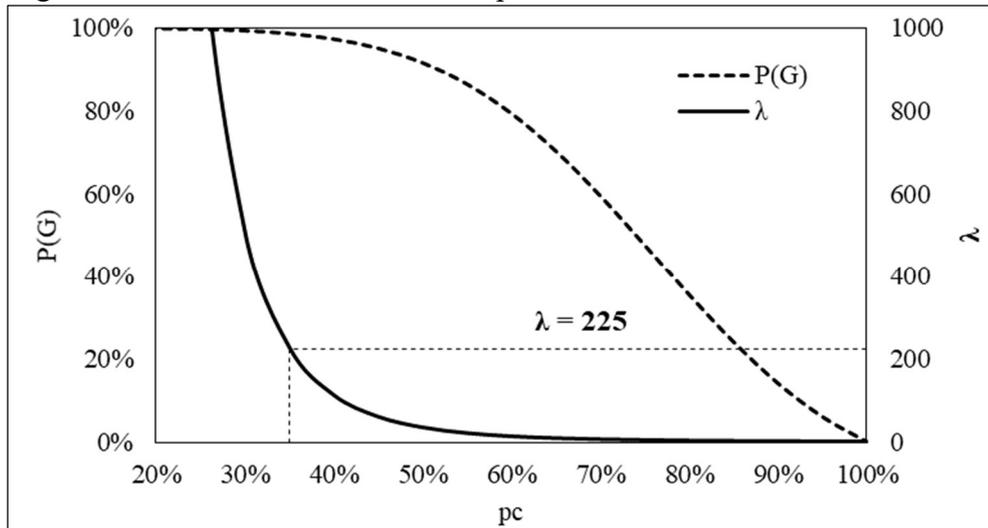
2.4.6 Raut e Indraratna (2008)

Indraratna, Raut e Khabbaz (2007) analisaram o modelo de estimativa dos confrontos de Locke, Indraratna e Adikari (2001), adotando 95% para o nível de confiança N_c , e constataram que conforme a porcentagem das menores constrições p_c se igualava a 35%, o número de confrontos λ crescia excessivamente, conforme é demonstrado na Figura 20. Em outras palavras, para partículas com tamanho inferior ao dc_{35} , o diâmetro da constrição equivalente a 35% mais fino, seriam necessários muitos confrontos para que a partícula fosse efetivamente retida. Dessa forma, foi definido que partículas de solos menores que o dc_{35} não

podem ser retidas por um filtro granular, a menos que as constrições se tornem progressivamente menores por efeito da autofiltração. O estudo realizou uma comparação com outros métodos de estimativa da constrição de controle da filtração (KENNEY *et al.*, 1985; WITT, 1993; FOSTER; FELL, 2001; SHERARD; DUNNIGAN; TALBOT, 1984a) conforme demonstrado na Tabela 3. Nota-se que os valores de dc_{35} para o I_D de 70% foram similares aos de Kenney *et al.* (1985) e para o I_D de 100% foram próximos aos de Foster e Fell (2001) e Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a). Isso mostra a compatibilidade do dc_{35} como diâmetro de controle de filtração das partículas dos outros métodos teóricos.

Por outra perspectiva, Indraratna e Raut (2006) analisaram as constrições dominantes de um filtro granular e perceberam que para 5% das maiores constrições ($pc = 95\%$) o número de confrontos necessários para reter uma partícula maior que dc_{95} , o diâmetro da constrição correspondente a 95% mais fino, era inferior à unidade. Em outras palavras, qualquer partícula com diâmetro maior que o dc_{95} tem 95% ($Nc = 95\%$) de chance de não conseguir entrar no filtro e, portanto, não tem influência no processo de autofiltração. Portanto, somente as partículas menores que o dc_{95} podem ser carregadas para o filtro pelo fluxo de água e influenciar no processo de autofiltração, ou seja, na diminuição progressiva das constrições do filtro.

Figura 20 – Curvas de movimento de partículas e dos confrontos sofridos



Fonte: Adaptado de Indraratna, Raut e Khabbaz (2007).

Tabela 3 – Comparação entre métodos de estimativa dos dc 's de controle de filtração

Filtro	Kenney <i>et al.</i> (1985)		Witt (1993) (mm)	Foster e Fell (2001) (mm)	Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a) (mm)	Indraratna, Raut e Khabbaz (2007)	
	0,20D ₁₅ (mm)	0,25D ₅ (mm)				dc ₃₅ (70%) (mm)	dc ₃₅ (100%) (mm)
F1	0,213	0,225	0,240	0,167	0,191	0,215	0,181
F2	0,209	0,200	0,210	0,167	0,188	0,200	0,188
F3	0,210	0,177	0,198	0,168	0,189	0,178	0,167
F4	0,095	0,115	0,108	0,076	0,086	0,096	0,081
F5	0,023	0,028	0,026	0,019	0,021	0,024	0,020

Fonte: Adaptado de Indraratna, Raut e Khabbaz (2007).

Raut e Indraratna (2008) propuseram um critério de retenção de filtros semelhante à Equação (1) de Terzaghi, no qual relaciona os dois diâmetros das constrições mais importantes: dc_{35} , definido como o diâmetro da constrição de controle; e dc_{95} , definido como o diâmetro da constrição autofiltrante. Estes dois parâmetros são relacionados na Equação (23), onde o d^*_{85} é o diâmetro da partícula do solo base correspondente a 85% mais fino da curva granulométrica ajustada a partir do dc_{95} , ou seja, a curva analisada corresponde somente as partículas do solo base inferior ao dc_{95} .

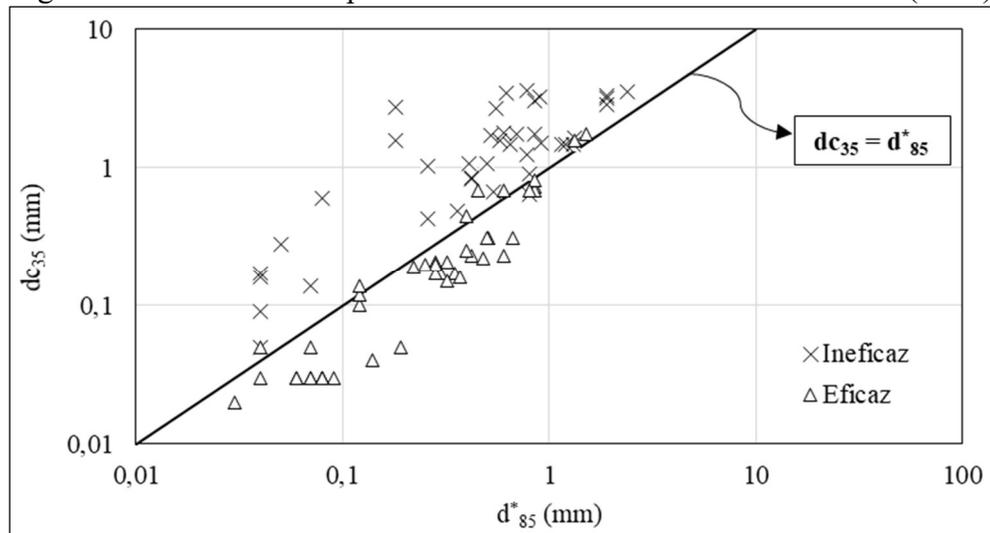
$$\frac{dc_{35}}{d^*_{85}} \leq 1 \quad (23)$$

Raut e Indraratna (2008) analisaram um total de 83 dados de resultados experimentais publicados na literatura (LAFLEUR, 1984; LAFLEUR; MLYNAREK; ROLLIN, 1989; INDRARATNA; VAFAI; DILEMA, 1996; INDRARATNA; VAFAI, 2008) e também de testes conduzidos na Universidade de Wollongong, Austrália. O critério proposto foi também analisado em comparação com dois dos manuais de dimensionamento de filtros granulares mais conhecidos NRCS (1994) e ICOLD (1994). Esses dados estão apresentados no Anexo A. Experimentalmente, dos 83 dados analisados pelos autores, 44 resultaram como eficazes na filtração. O método do ICOLD (1994) previu apenas 23 eficazes, já o NRCS (1994) 27 eficazes, enquanto que o critério de Raut e Indraratna (2008) previu 35 dados como eficazes. Isso demonstra o conservadorismo associado às metodologias do ICOLD (1994) e NRCS (1994). Um resumo comparativo dos resultados experimentais com o critério de Raut e Indraratna (2008) é apresentada na Figura 21.

Raut e Indraratna (2008) afirmam que a Equação (23) é o método mais confiável de avaliar a efetividade para uma grande variedade de combinações de solo base e filtros, independentemente de sua plasticidade ou coeficiente de uniformidade. Segundo Pimenta Filho

(2013), esse critério considera parâmetros fundamentais ao processo de filtragem como os diâmetros das partículas, o coeficiente de uniformidade, a distribuição das constrições e o índice de densidade, portanto, justificando a sua adesão em avaliações de segurança de erosão interna e em dimensionamentos de filtros.

Figura 21 – Resultados experimentais do estudo de Raut e Indraratna (2008)



Fonte: Adaptado de Raut e Indraratna (2008).

2.4.7 Indraratna et al. (2015)

O critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) foi desenvolvido ao avaliar o potencial de instabilidade interna de filtros granulares com base em testes hidráulicos realizados em seis solos granulares com diferentes coeficientes de uniformidade e compactados a diferentes índices de densidade. Esse método mantém o mesmo conceito de critérios anteriores, como De Mello (1975) e Kézdi (1979), de idealizar que o solo granular seja um sistema filtro/solo base, no qual os grãos mais grossos terão a função de filtrar os grãos mais finos. A seguinte metodologia, ilustrada na Figura 22, foi proposta:

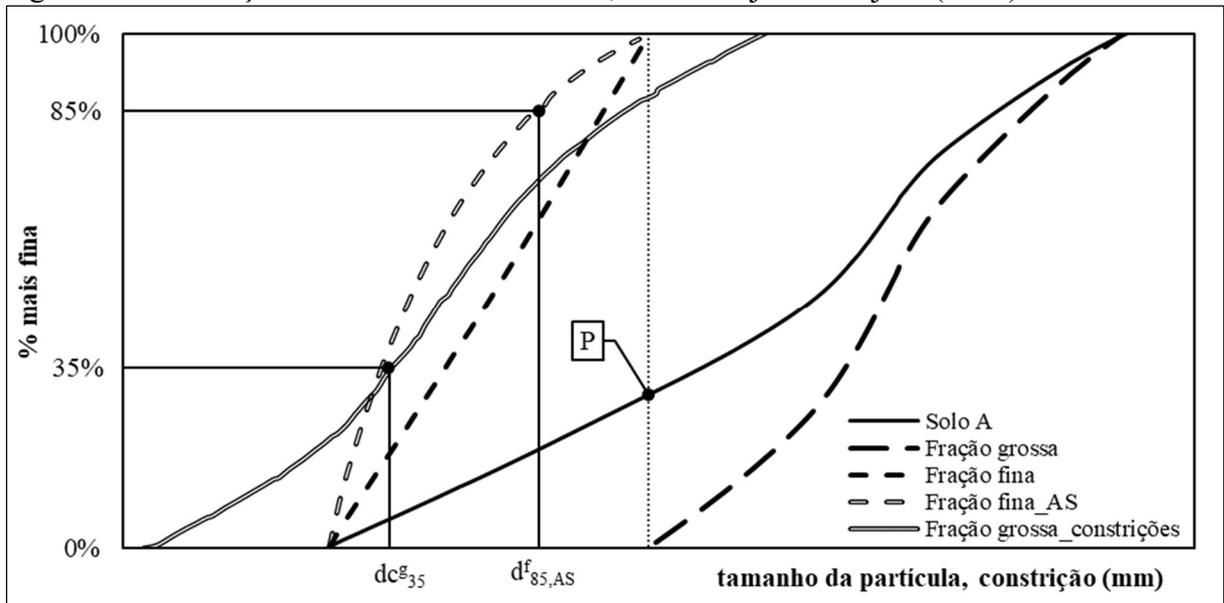
- a) dividir a curva granulométrica do solo granular em duas frações a partir de um ponto P correspondente ao limite mínimo de H/F atribuído em Kenney e Lau (1985) para $F \leq 30\%$;
- b) a fração grossa resultante deve ser considerada como a componente filtrante, enquanto que a fração fina, o solo base;
- c) a avaliação da instabilidade interna deve ser realizada com a curva granulométrica em função da área superficial da fração fina (Fração fina_AS) e

a curva de constrições da fração grossa (Fração grossa_constrições) para um dado índice de densidade (I_D);

- d) o último passo é aplicar a Equação (24), proposta por Indraratna, Raut e Khabbaz (2007), para verificar se a fração grossa é efetiva ou não para reter os grãos da fração fina, onde dc_{35}^g é o diâmetro da constrição correspondente a 35% mais fino da fração grossa e $d_{85,AS}^f$ é o diâmetro do grão correspondente a 85% na curva granulométrica em função da área superficial da fração fina.

$$\frac{dc_{35}^g}{d_{85,AS}^f} \leq 1 \quad (24)$$

Figura 22 – Ilustração do método de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015)



Fonte: Adaptado de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015).

O critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) foi validado ao analisar 72 resultados de testes de instabilidade publicados na literatura: 14 testes em Kenney e Lau (1985), quatro em Skempton e Brogan (1994), 13 em Honjo, Haque e Tsai (1996), 13 em Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a), seis em Nguyen, Rujikiatkamjorn e Indraratna (2013), seis em Indraratna, Nguyen e Rujikiatkamjorn (2012), cinco em Indraratna, Rau e Khabbaz (2007), três em Indraratna, Vafai e Dilema (1996), dois em Indraratna e Vafai (1997), dois em Locke, Indraratna e Adikari (2001) e quatro em Lafleur, Mlynarek e Rollin (1989). Além destes, os autores realizaram mais 20 testes adicionais.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nas análises de validação do critério proposto em comparação com os resultados experimentais. De todos os 92 resultados, apenas em uma o critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) diferiu do resultado experimental. Em outras palavras, o critério previu o resultado experimental em 99% da base de dados analisada. Isso demonstra o rigor do nível de confiança ao adotar o critério para avaliar o potencial de instabilidade interna em solos granulares, principalmente por envolver parâmetros, como o I_D e a distribuição das constrições, até então não consideradas em critérios anteriores como De Mello (1975), Kézdi (1979) e Kenney e Lau (1985, 1986).

Tabela 4 – Validação do critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) “continua”

Nº	Referência	I_D	P	$\frac{dc_{35}^g}{d_{85,AS}^f}$	Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015)	Resultado experimental
1	Kenney e Lau (1985)	90%	20%	0,90	√	X
2	-	90%	25%	0,98	√	√
3	-	90%	20%	1,28	X	X
4	-	90%	5%	0,95	√	√
5	-	90%	20%	0,68	√	√
6	-	90%	15%	0,97	√	√
7	-	90%	30%	0,54	√	√
8	-	90%	30%	0,91	√	√
9	-	90%	30%	0,44	√	√
10	-	90%	5%	0,95	√	√
11	-	90%	10%	0,56	√	√
12	-	90%	10%	3,67	X	X
13	-	90%	20%	2,35	X	X
14	-	90%	15%	1,86	X	X
15	Indraratna e Vafai (1997)	90%	30%	0,30	√	√
16	-	90%	30%	0,25	√	√
17	Indraratna, Vafai e Dilema (1996)	50%	30%	0,30	√	√
18	-	50%	30%	0,27	√	√
19	-	50%	30%	0,25	√	√
20	Indraratna, Rau e Khabbaz (2007)	70%	30%	0,32	√	√
21	-	70%	30%	0,3	√	√
22	-	70%	30%	0,22	√	√
23	-	70%	30%	0,23	√	√
24	-	70%	30%	0,23	√	√
25	Lafleur, Mlynarek e Rollin (1989)	70%	30%	0,51	√	√
26	-	70%	30%	0,41	√	√
27	-	70%	30%	0,34	√	√
28	-	70%	10%	0,33	√	√
29	Locke, Indraratna e Adikari (2001)	70%	20%	0,69	√	√
30	-	70%	25%	0,46	√	√
31	Skempton e Brogan (1994)	5%	15%	2,95	X	X
32	-	5%	10%	1,86	X	X
33	-	5%	10%	0,98	√	√
34	-	5%	6%	0,84	√	√
35	Nguyen, Rujikiatkamjorn e Indraratna (2013)	70%	30%	0,27	√	√
36	-	70%	30%	0,3	√	√
37	-	70%	30%	0,3	√	√
38	-	70%	30%	0,32	√	√
39	-	70%	30%	0,34	√	√
40	-	70%	30%	0,33	√	√

Tabela 4 – Validação do critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) “conclusão”

Nº	Referência	I _D	P	$\frac{dc_{35}^g}{d_{85,AS}^f}$	Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015)	Resultado experimental
41	Indraratna, Nguyen e Rujikiatkamjorn (2012)	70%	30%	0,31	√	√
42	-	70%	30%	0,32	√	√
43	-	70%	30%	0,32	√	√
44	-	70%	30%	0,39	√	√
45	-	70%	30%	0,46	√	√
46	-	70%	30%	0,3	√	√
47	Honjo, Haque e Tsai (1996)	65%	5%	0,89	√	√
48	-	65%	10%	0,45	√	√
49	-	65%	30%	0,97	√	√
50	-	65%	30%	0,44	√	√
51	-	65%	20%	0,75	√	√
52	-	65%	30%	0,74	√	√
53	-	65%	30%	0,37	√	√
54	-	65%	20%	1,41	X	X
55	-	65%	30%	1,41	X	X
56	-	65%	30%	1,02	X	X
57	-	65%	20%	1,99	X	X
58	-	65%	30%	1,96	X	X
59	-	65%	30%	1,02	X	X
60	Sherard, Dunnigan e Talbot (1984a)	70%	30%	0,75	√	√
61	-	70%	10%	0,39	√	√
62	-	70%	5%	0,33	√	√
63	-	70%	30%	0,28	√	√
64	-	70%	30%	0,25	√	√
65	-	70%	30%	0,19	√	√
66	-	70%	30%	0,37	√	√
67	-	70%	30%	0,36	√	√
68	-	70%	30%	0,27	√	√
69	-	70%	30%	0,28	√	√
70	-	70%	30%	0,25	√	√
71	-	70%	30%	0,3	√	√
72	-	70%	30%	0,25	√	√
73	Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015)	7%	30%	0,48	√	√
74	-	52%	30%	0,39	√	√
75	-	94%	30%	0,29	√	√
76	-	7%	30%	0,93	√	√
77	-	52%	30%	0,76	√	√
78	-	93%	30%	0,59	√	√
79	-	6%	30%	0,84	√	√
80	-	47%	30%	0,68	√	√
81	-	93%	30%	0,53	√	√
82	-	6%	30%	1,28	X	X
83	-	51%	30%	1,05	X	X
84	-	71%	30%	0,93	√	√
85	-	96%	30%	0,78	√	√
86	-	7%	15%	1,11	X	X
87	-	32%	15%	0,96	√	√
88	-	63%	15%	0,83	√	√
89	-	94%	15%	0,69	√	√
90	-	6%	30%	1,64	X	X
91	-	48%	30%	1,32	X	X
92	-	93%	30%	1,02	X	X

Nota: X = ineficaz; √ = eficaz

Fonte: Adaptado de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015).

3 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DAS CONSTRIÇÕES INTERNAS

Neste capítulo será apresentado o procedimento matemático utilizado para a determinação de curvas de distribuição das contrições internas de solos granulares, utilizados na presente dissertação. Destaca-se a forma de obtenção dos diâmetros dos grãos a partir da curva de distribuição granulométrica em função da massa das partículas, a conversão da curva granulométrica em função da massa para área superficial das partículas, o desenvolvimento do método analítico para a determinação das contrições e, comparação com resultados publicados na literatura.

3.1 Dados de entrada: diâmetros médios das partículas e frequência de ocorrência

Na metodologia analítica de Silveira (1965) e estudos posteriores, a curva de distribuição granulométrica é a base para obtenção dos diâmetros médios D' e frequências de ocorrência P' necessários para o cálculo dos diâmetros das contrições dc e frequências Pc . Para tanto, foi analisado uma forma de determinação de D' que melhor se adequasse e descrevesse o formato da curva granulométrica e facilitasse o processo de obtenção e cálculos. A forma escolhida foi fixar a frequência de ocorrência de todos os diâmetros médios a 10%, assim, será definido um conjunto de dez diâmetros médios que descrevem o material granular. Os valores de D' serão, portanto, a média geométrica dos diâmetros que limitam o intervalo que equivale a P' de 10% em toda a curva, conforme pode ser expresso na Equação (25), com i igual a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100. Nesse caso, os diâmetros que devem ser lidos na curva granulométrica são: $D_0, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{40}, D_{50}, D_{60}, D_{70}, D_{80}, D_{90}$ e D_{100} .

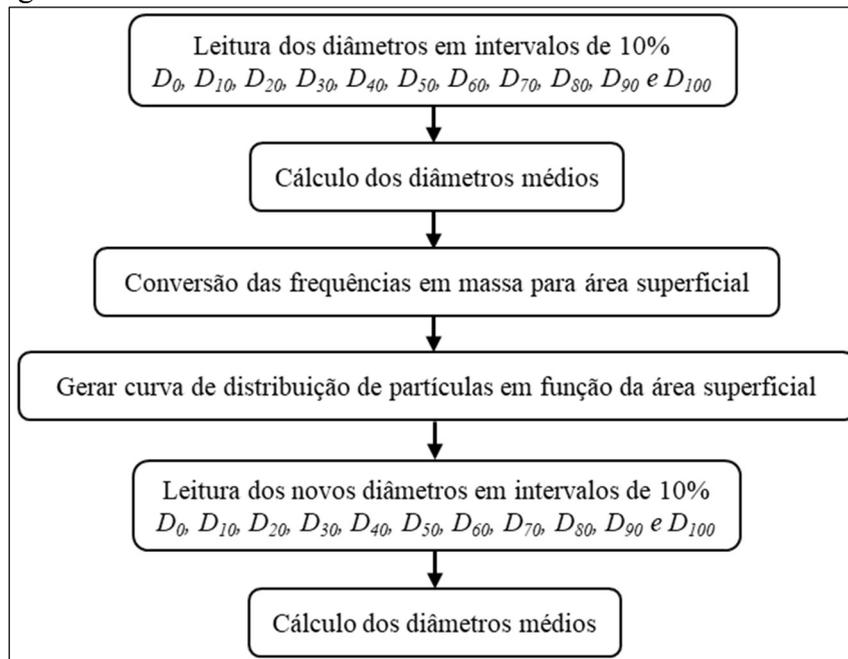
$$D'_{\frac{i}{10}} = \sqrt{D_i \cdot D_{(i-10)}} \quad (25)$$

A partir dos diâmetros médios, é realizado a conversão da curva granulométrica em função da massa de partículas para a curva em função da área superficial de partículas, a fim de que a influência do coeficiente de uniformidade seja considerada na formação das contrições. Essa etapa é realizada utilizando a Equação (18) de conversão das frequências, definida em Humes (1998). Ao considerar o valor de P' fixo, a expressão de Humes (1998) pode ser reescrita na forma da Equação (26).

$$P_{s,i} = \frac{1}{D_i \cdot \sum_{x=1}^N \frac{1}{D_x}} \quad (26)$$

Definida a curva de distribuição granulométrica em função da área superficial das partículas, o processo de leitura dos diâmetros $D_0, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{40}, D_{50}, D_{60}, D_{70}, D_{80}, D_{90}$ e D_{100} é realizado, novamente, fixando o valor de P_s a 10%. Aqui, a média geométrica dos intervalos destes diâmetros dará o conjunto de dez novos diâmetros médios que descrevem o material granular, agora em função da área superficial de suas partículas. Esse conjunto de diâmetros será combinado, aleatoriamente, de acordo com o agrupamento de partículas característico aos estados denso e fofo para o cálculo do tamanho das contrações. A sequência do procedimento de obtenção dos dados de entrada está resumida na Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma da etapa de obtenção da entrada de dados granulométricos



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 Cálculo das restrições internas para o agrupamento do estado denso

No cálculo das restrições internas para o estado denso, o agrupamento de partículas é formado por três grãos aleatórios, conforme apresentado em Silveira (1965). Como foi decidido usar dez diâmetros médios para representar a granulometria do material granular, haverá 220 combinações de três partículas, sendo: 10 agrupamentos formados por diâmetros

médios idênticos (A', A', A'); 120 agrupamentos formados por diâmetros médios diferentes (A', B', C'); e 90 agrupamentos formados por dois diâmetros médios iguais e um terceiro diferente (A', A', B').

Para o cálculo do diâmetro da constrição dc , optou-se por utilizar a Equação (17) de Musso e Federico (1982) devido à facilidade de manipulação das variáveis dos diâmetros. Para tanto, a expressão de Musso e Federico (1982) foi simplificada para uma equação de 2º grau, conforme demonstra as expressões a seguir.

$$k_1 = \left(\frac{2}{D'i}\right)^2 + \left(\frac{2}{D'j}\right)^2 + \left(\frac{2}{D'k}\right)^2 \quad (27)$$

$$k_2 = \left(\frac{2}{D'i}\right) + \left(\frac{2}{D'j}\right) + \left(\frac{2}{D'k}\right) \quad (28)$$

$$(2k_1 - k_2^2)dc^2 + (-4k_2)dc + 4 = 0 \quad (29)$$

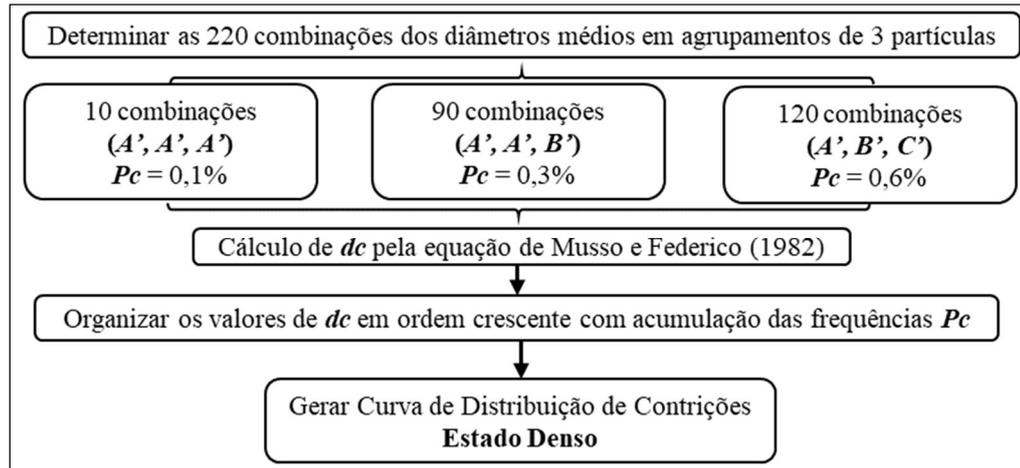
Quanto às frequências de ocorrência das constrições Pc , devido a frequência dos grãos estar fixado em 10%, a aplicação da Equação (10) para o valor de Pc vai variar em função do agrupamento. Para agrupamentos de diâmetros idênticos (A', A', A') o Pc será igual a 0,1%, para diâmetros diferentes (A', B', C') o Pc será igual a 0,6% e para o agrupamento de dois grãos iguais e um diferente (A', A', B') o Pc será igual a 0,3%. A curva de distribuição das constrições internas para o estado denso é definida ao organizar os dados de dc , em ordem crescente de tamanho, e acumulando as frequências de ocorrência Pc de cada constrição. Na Figura 24 está apresentada o fluxograma resumido do procedimento para a curva de distribuição de constrições do estado denso.

3.3 Cálculo das constrições internas para o agrupamento do estado fofo

No cálculo das constrições internas para o estado fofo, o agrupamento é formado por quatro partículas aleatórias. Como foi decidido usar dez diâmetros médios para representar a granulometria do material granular, haverá 715 combinações de quatro partículas, sendo: 10 agrupamentos formados por diâmetros médios idênticos (A', A', A', A'); 210 agrupamentos de diâmetros médios diferentes (A', B', C', D'); 45 agrupamentos com repetição de dois pares de

diâmetros médios iguais (A', A', B', B'); 360 agrupamentos com repetição de dois diâmetros médios iguais e duas diferentes (A', A', B', C'); e 90 agrupamentos com repetição de três diâmetros médios iguais e um diferente (A', A', A', B').

Figura 24 – Fluxograma para a curva de distribuição de contrações para o estado denso

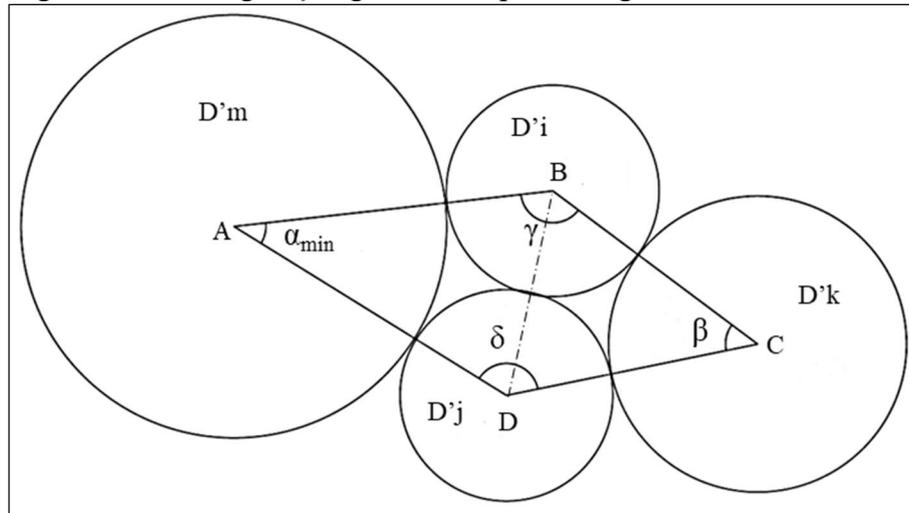


Fonte: elaborado pelo autor.

O cálculo do diâmetro da contração dc , apresentado na Equação (13) e (14), consiste na diferença entre a área do quadrilátero formado pela projeção dos centros das partículas e a soma das áreas dos setores circulares definidos pelos ângulos α , β , γ e δ . Então, o primeiro passo para definir a contração é determinar o valor dos ângulos internos no agrupamento por geometria plana. Para tanto, os valores de β , γ e δ serão definidos em função de α , assumindo-se que o valor adotado de α deva produzir o maior valor de dc possível para um dado agrupamento. O valor de α , que produz o maior dc , deve estar num intervalo entre o α_{min} e α_{max} , obtidos por meio de considerações geométricas para o agrupamento de quatro partículas (RIBEIRO, 2008). A Figura 25 e a Figura 26 apresentam as configurações geométricas assumidas para α_{min} e α_{max} , cujos valores são definidos ao aplicar a lei dos cossenos, conforme são demonstrados nas expressões a seguir.

$$\alpha_{min} = \cos^{-1} \left[\frac{(D'm + D'i)^2 + (D'm + D'j)^2 - (D'i + D'j)^2}{2(D'm + D'i)(D'm + D'j)} \right] \quad (30)$$

Figura 25 – Configuração geométrica para o ângulo α_{\min}



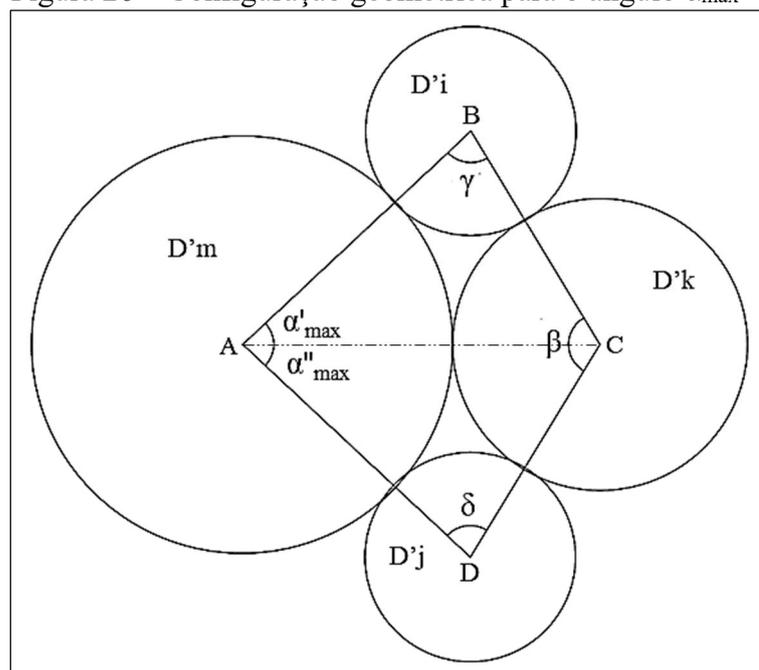
Fonte: elaborado pelo autor.

$$\alpha'_{\max} = \cos^{-1} \left[\frac{(D'm + D'i)^2 + (D'm + D'k)^2 - (D'i + D'k)^2}{2(D'm + D'i)(D'm + D'k)} \right] \quad (31)$$

$$\alpha''_{\max} = \cos^{-1} \left[\frac{(D'm + D'k)^2 + (D'm + D'j)^2 - (D'k + D'j)^2}{2(D'm + D'k)(D'm + D'j)} \right] \quad (32)$$

$$\alpha_{\max} = \alpha'_{\max} + \alpha''_{\max} \quad (33)$$

Figura 26 – Configuração geométrica para o ângulo α_{\max}



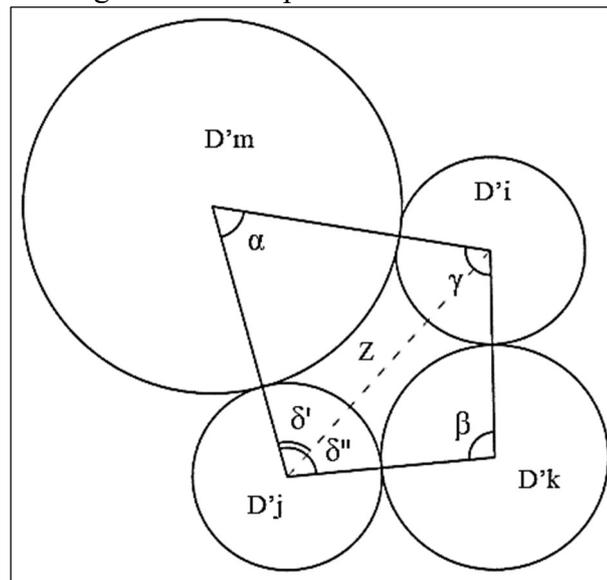
Fonte: elaborada pelo autor.

Conforme explicado anteriormente, o valor de α a ser adotado deve ser tal que produza a maior constrição possível dentro de um determinado agrupamento de partículas e esteja entre α_{min} e α_{max} . O método usado para definir o valor de α foi por meio de interações ao adicionar acréscimos ao α_{min} até atingir α_{max} , conforme pode ser demonstrado na Equação (34), onde $n = 0, 1, 2, \dots, 20$.

$$\alpha_n = \alpha_{min} + n \left(\frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{20} \right) \quad (34)$$

Definido o valor de α , o problema se resume a determinar os outros ângulos internos que formam o agrupamento das quatro partículas. A Figura 27 apresenta o modelo geométrico adotado para determinação dos parâmetros angulares restantes, no qual as expressões seguintes foram desenvolvidas. A constrição, por fim, é definida aplicando-se as equações (13) e (14).

Figura 27 – Modelo geométrico para o cálculo dos ângulos internos para o estado fofo



Fonte: elaborada pelo autor.

$$Z = \sqrt{\left(\frac{D'm + D'i}{2}\right)^2 + \left(\frac{D'm + D'j}{2}\right)^2 - \frac{(D'm + D'i)(D'm + D'j)}{2} \cos \alpha} \quad (35)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[\frac{\left(\frac{D'k + D'i}{2}\right)^2 + \left(\frac{D'k + D'j}{2}\right)^2 - Z^2}{\frac{(D'k + D'i)(D'k + D'j)}{2}} \right] \quad (36)$$

$$\delta' = \cos^{-1} \left[\frac{\left(\frac{D'm + D'j}{2} \right)^2 - \left(\frac{D'm + D'i}{2} \right)^2 + Z^2}{(D'm + D'j).Z} \right] \quad (37)$$

$$\delta'' = \cos^{-1} \left[\frac{\left(\frac{D'j + D'k}{2} \right)^2 - \left(\frac{D'i + D'k}{2} \right)^2 + Z^2}{(D'j + D'k).Z} \right] \quad (38)$$

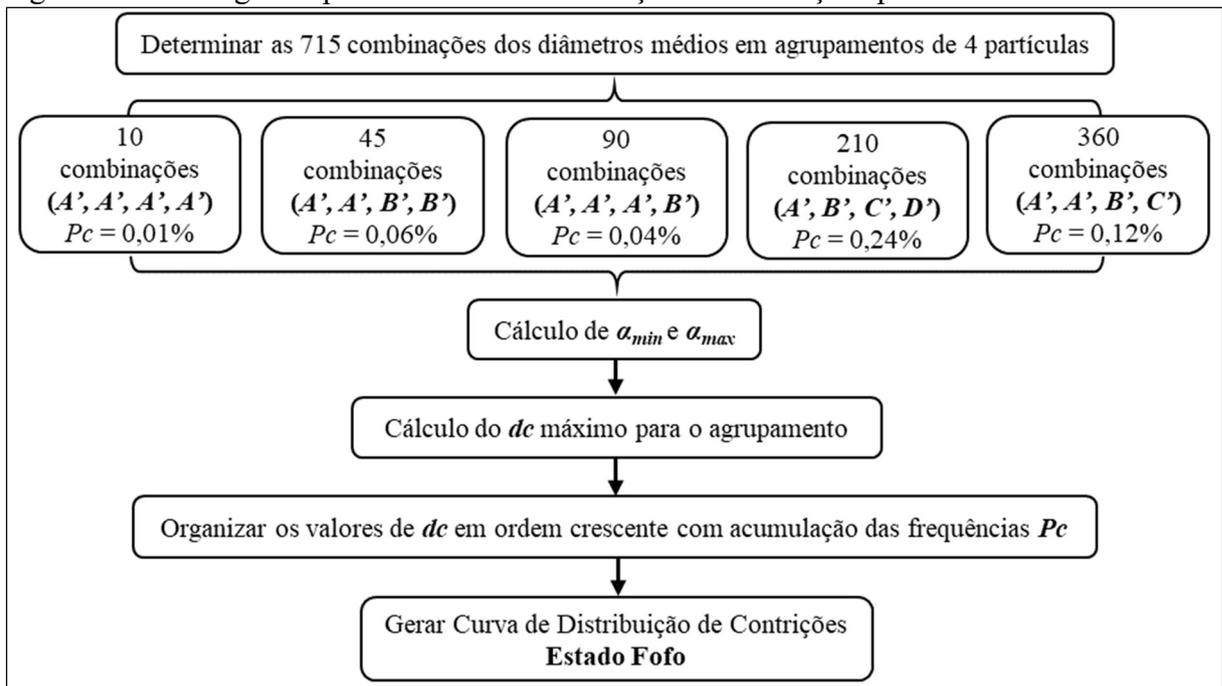
$$\delta = \delta' + \delta'' \quad (39)$$

$$\gamma = 2\pi - (\alpha + \beta + \delta) \quad (40)$$

Quanto às frequências de ocorrência das constrições P_c , devido a frequência dos grãos estar fixado em 10%, a aplicação da Equação (15) para o valor de P_c vai variar em função do agrupamento. Para agrupamentos de diâmetros idênticos (A', A', A', A') o P_c será igual a 0,01%, para diâmetros diferentes (A', B', C', D') o P_c será igual a 0,24%, agrupamentos com repetição de dois pares de diâmetros médios iguais (A', A', B', B') o P_c será 0,06%, agrupamentos com repetição de dois diâmetros médios iguais e dois diferentes (A', A', B', C'), P_c será 0,12% e agrupamentos com repetição de três diâmetros médios iguais e um diferente (A', A', A', B') o P_c será 0,04% .

Ressalta-se que foi considerado as recomendações de Schuler (1996) a respeito do plano formado pelo centro das quatro partículas não ser o que forma a constrição, devendo-se usar a média de todos os possíveis comprimentos de corda. Portanto, o valor obtido para o diâmetro da constrição é multiplicado por um fator de correção de 0,82. A curva de distribuição das contrições internas para o estado fofo é definida ao organizar os dados de dc , em ordem crescente de tamanho, e acumulando as frequências de ocorrência P_c de cada constrição. Na Figura 28 está apresentado o fluxograma resumido do procedimento para a curva de distribuição de contrições do estado fofo.

Figura 28 – Fluxograma para a curva de distribuição de contrações para o estado fofo



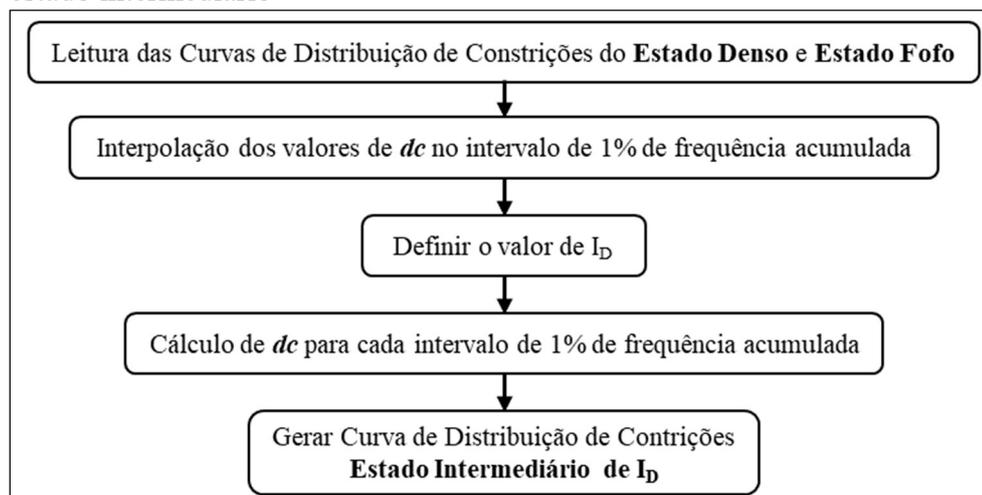
Fonte: elaborada pelo autor.

3.4 Cálculo das contrações internas para o estado intermediário

No estado intermediário, a hipótese apresentada em Locke, Indraratna e Adikari (2001) foi que o diâmetro da contração cresce linearmente, a partir do estado denso, proporcional ao decréscimo do índice de densidade I_D do filtro, sendo proposta a Equação (20). Para tanto, foi utilizado o seguinte método de cálculo: definiu-se um intervalo de leitura dos diâmetros das contrações de 1%, ou seja, a cada 1% da frequência de ocorrência acumulada das contrações é determinado, por interpolação linear, o valor do diâmetro definido, anteriormente, para o estado denso e estado fofo. Dessa forma, as curvas de distribuição das contrações para os dois estados são divididas em 100 partes ($N = 100$) e a Equação (20) passa a ser a Equação (41), com $x = 0, 1, 2, \dots, 99, 100$. O passo seguinte é definir qual o valor de I_D , que vai depender do tipo de análise que será realizada. Na Figura 29 está apresentado o fluxograma resumido do procedimento para a curva de distribuição de contrações do estado correspondente a um valor de I_D .

$$dc_x = dc_{d,x} + \frac{x}{100} (1 - I_D) (dc_{f,x} - dc_{d,x}) \quad (41)$$

Figura 29 – Fluxograma para a curva de distribuição de constrições para o estado intermediário



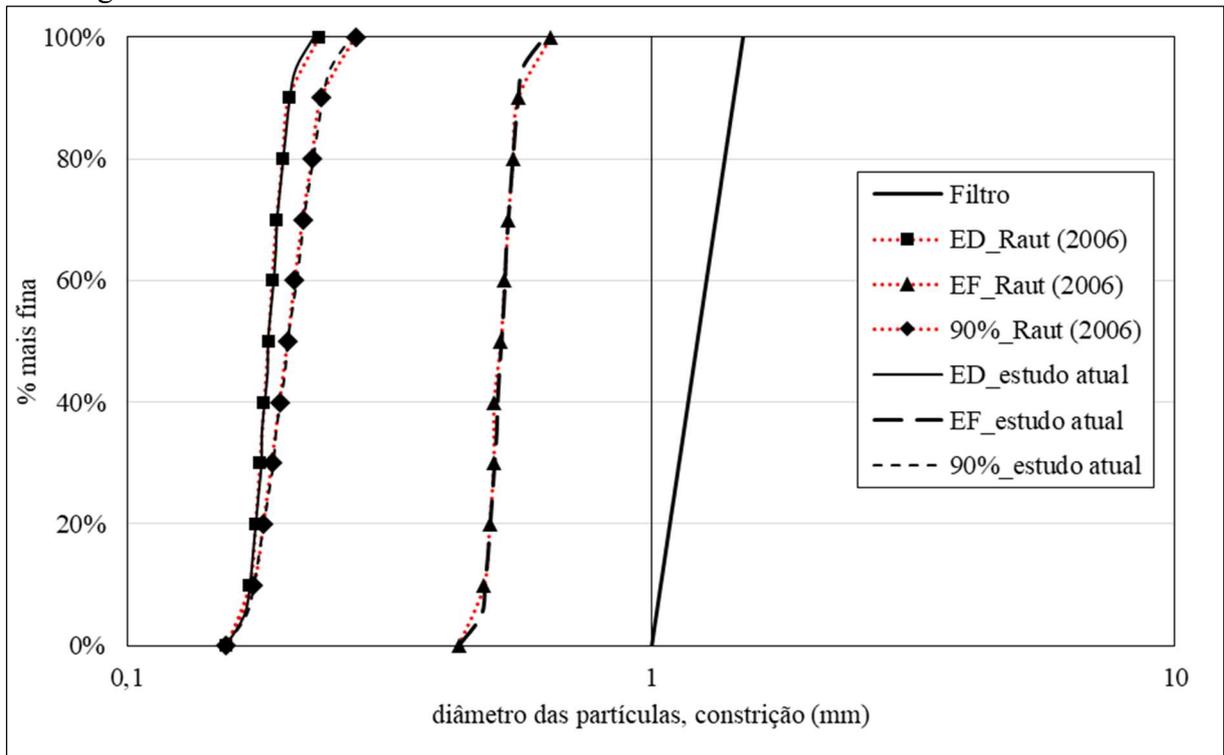
Fonte: elaborada pelo autor.

3.5 Comparação da modelagem matemática empregada com resultados publicados na literatura

A modelagem matemática descrita foi desenvolvida, utilizando planilhas de dados no programa Microsoft Excel, no qual permite facilmente o cálculo matemático, a visualização dos dados gerados e a criação de gráficos para as distribuições de partículas de solo e constrições de forma rápida e prática. A calibração do modelo matemático foi realizada, comparando-se com resultados publicados na literatura, como: a modelagem matemática desenvolvida por Raut (2006); as observações experimentais da distribuição de constrições em Soria, Aramaki e Viviani (1993 *apud* LOCKE, 2001); e o método original de Silveira (1965).

Na modelagem de Raut (2006), o algoritmo consiste na entrada dos dados granulométricos do filtro e do índice de densidade para o qual a distribuição das constrições pretende-se determinar. Nesse modelo, a quantidade de diâmetros médios é determinada pela quantidade de dados granulométricos informado e utiliza a Equação (9) de Silveira (1965), para as constrições do estado denso, cujo dc é solucionado pelo método de bisseção de interações. Destaca-se que o método utilizado neste trabalho utiliza a Equação (17) de Musso e Federico (1982), convertendo-a numa equação de 2º grau. Os resultados da comparação entre o modelo de Raut (2006) estão apresentados na Figura 30. Como pode ser observado, as curvas definidas no modelo atual são bem semelhantes às definidas pela modelagem de Raut (2006). Na Tabela 5 são apresentados os valores definidos em ambos os modelos analisados, no qual é possível ver a pequena diferença entre os resultados.

Figura 30 – Comparação entre as curvas de constrição determinadas em Raut (2006) com a modelagem usada



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Resultados das constrições determinadas no modelo de Raut (2006) e a modelagem usada

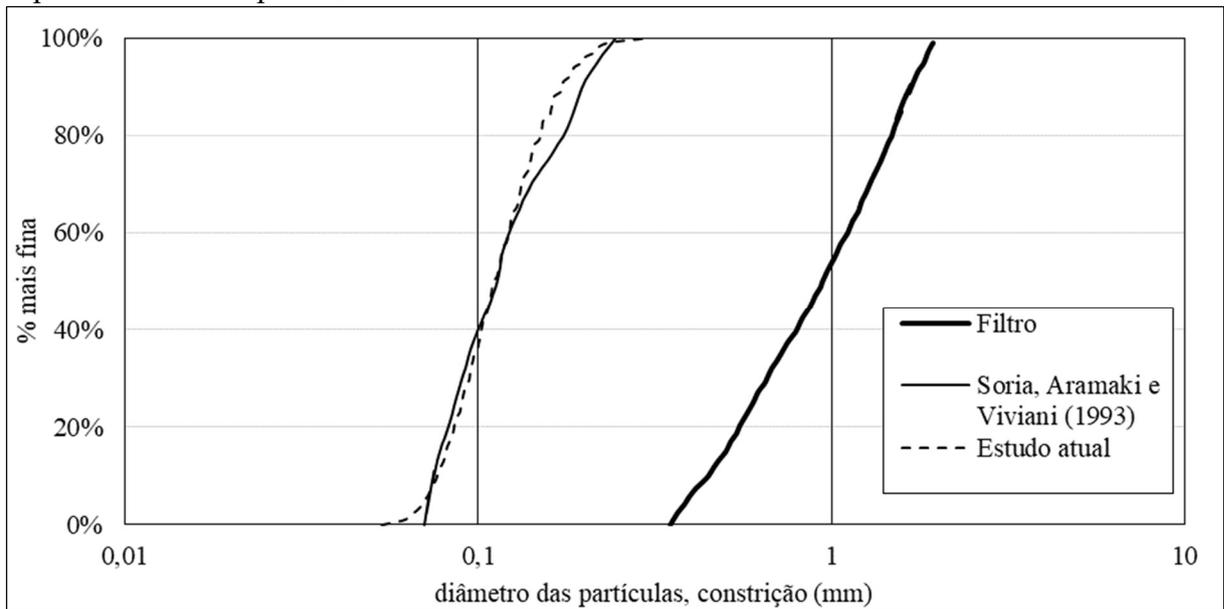
% mais fina	Raut (2006)			Estudo atual		
	Estado denso	Estado fofo	$I_D = 90\%$	Estado denso	Estado fofo	$I_D = 90\%$
0%	0,1547	0,4286	0,1547	0,1547	0,4286	0,1547
10%	0,1710	0,4797	0,1741	0,1717	0,4823	0,1748
20%	0,1755	0,4911	0,1818	0,1761	0,4932	0,1824
30%	0,1790	0,5005	0,1886	0,1806	0,5028	0,1902
40%	0,1822	0,5009	0,1953	0,1831	0,5094	0,1961
50%	0,1859	0,5165	0,2024	0,1857	0,5182	0,2023
60%	0,1887	0,5243	0,2088	0,1904	0,5266	0,2106
70%	0,1923	0,5330	0,2162	0,1932	0,5343	0,2170
80%	0,1977	0,5441	0,2254	0,1984	0,5451	0,2262
90%	0,2031	0,5569	0,2350	0,2041	0,5584	0,2360
100%	0,2321	0,6430	0,2731	0,2266	0,6278	0,2667

Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação aos resultados experimentais de Soria, Aramaki e Viviani (1993 *apud* LOCKE, 2001), no qual definiu uma curva de distribuição de constrição para um I_D estimado de 90%, experimentalmente. Foi utilizado uma abordagem indireta, onde partículas de tamanhos uniformes atravessavam filtros de espessura variável a fim de descobrir qual o tamanho de partícula podia passar, e calculando a curva de distribuição pelo método proposto em Silveira (1993). Na Figura 31 é apresentado a comparação entre a curva de distribuição de constrição, definida experimentalmente, com o resultado do modelo atual. Percebe-se que o

modelagem desenvolvida apresenta uma aproximação da curva experimental de Soria, Aramaki e Viviani (1993), principalmente na região intermediária de 60% - 10% mais fina. Outro ponto a ser destacado é a correlação entre o resultado experimental com a abordagem de Humes (1998) de usar as frequências por área superficial, o que evidencia que a proposta é mais realista que a de Silveira (1965).

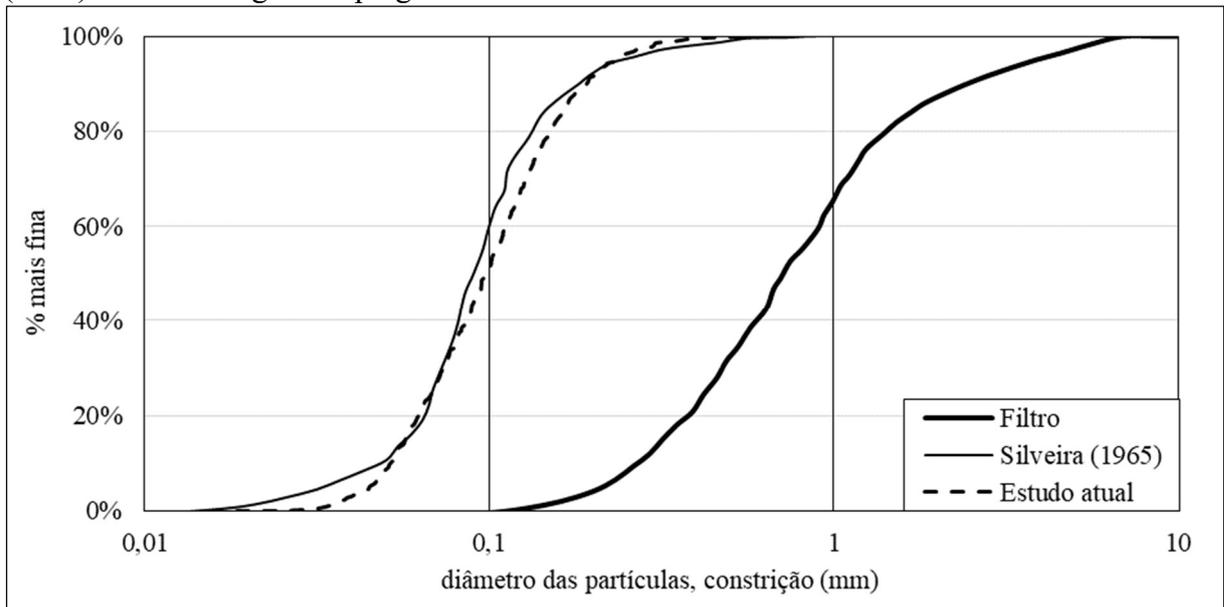
Figura 31 – Comparação entre curvas de distribuição de constrições determinadas experimentalmente para I_D de 90%



Fonte: elaborada pelo autor.

Em comparação com o método inicial de Silveira (1965) para o estado denso, que utiliza as frequências granulométricas em massa, a modelagem desenvolvida também mostrou uma boa aproximação com a curva de distribuição de constrições apresentada em Silveira (1965). Nesse caso, a curva de constrições definida pela modelagem atual considerou as frequências de ocorrência em função da massa. Dessa forma, percebe-se também a correlação aproximada entre as formulações de Musso e Federico (1982) e Silveira (1965) para o cálculo do diâmetro das constrições.

Figura 32 – Comparação entre a curva de distribuição de constrição do estado denso de Silveira (1965) e da modelagem empregada



Fonte: elaborada pelo autor.

4 MODELO EXPERIMENTAL DE BARRAGEM DE TERRA

Neste capítulo será apresentada a metodologia empregada no desenvolvimento do modelo experimental de uma barragem de terra para análise do comportamento de solo base submetidos a processos de carreamento de partículas, devido ao fluxo de água, para o interior de um filtro granular. Destacam-se as definições das configurações geométricas dos equipamentos utilizados e do modelo experimental, bem como a seleção dos materiais de solo base e filtro granular. O desenvolvimento deste estudo experimental está dividido em três fases: a primeira, correspondente à fase preliminar para o modelo experimental de uma barragem de terra, com a construção de uma calha de percolação; a segunda, o modelo experimental de uma barragem de terra em reservatório de acrílico; a terceira, uma alteração da geometria do modelo com aumento da espessura do filtro vertical. Os detalhes serão apresentados a seguir.

4.1 Modelo de calha de percolação

A primeira fase do estudo experimental consistiu em construir uma calha de percolação a fim de analisar o comportamento entre transições graduais de solos, sujeitos à percolação de água. Destaca-se que o foco inicial do experimento foi verificar se a espessura de influência de estabilização de carreamento de partículas, determinada segundo os métodos analíticos de distribuição das constrições internas de um solo granular, coincidiria com as observações experimentais realizadas.

A calha de percolação foi desenvolvida no Laboratório de Solos (LabSolos) do curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA na cidade de Sobral – CE. Por conveniência, optou-se por construí-la sobre a bancada de concreto do laboratório, sendo a estrutura externa construída em alvenaria, com a face frontal em vidro transparente, a fim de melhorar a visualização do comportamento dos solos, e a face lateral direita feita com grades de ferro, onde seriam colocados os materiais mais grosseiros para a drenagem do fluxo.

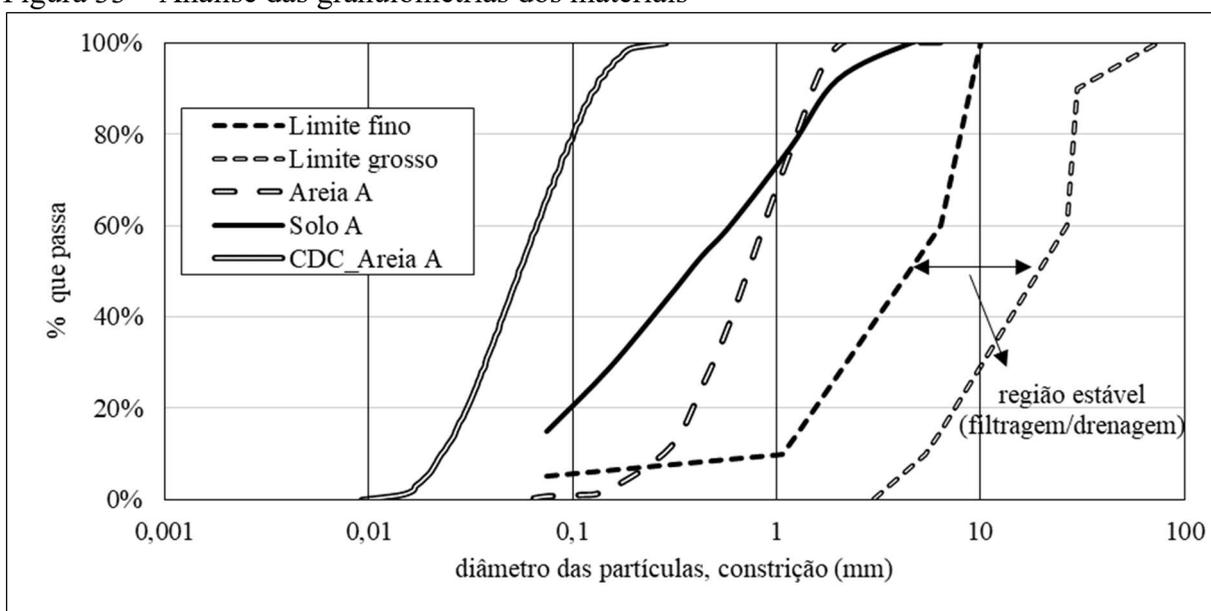
4.1.1 *Análise granulométrica dos materiais*

Para o solo base, foi selecionado um material mais fino, proveniente da Fazenda Experimental Vale do Acaraú da Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA, onde, em trabalhos anteriores do projeto de pesquisa GEOIDRI – erosão interna, vinculado à CNPq, foi

caracterizado para a construção de uma micro barragem, e a presente dissertação representa a continuidade deste trabalho. Os dados de caracterização desse material estão disponíveis no Apêndice A. O material selecionado caracteriza-se como um SM, uma areia siltosa. Esse solo será identificado como Solo A. Para o material do filtro, foi adotado uma areia disponível no LabSolos. A areia adotada será identificada como Areia A. Na Figura 33 estão apresentadas as curvas granulométricas dos materiais selecionados.

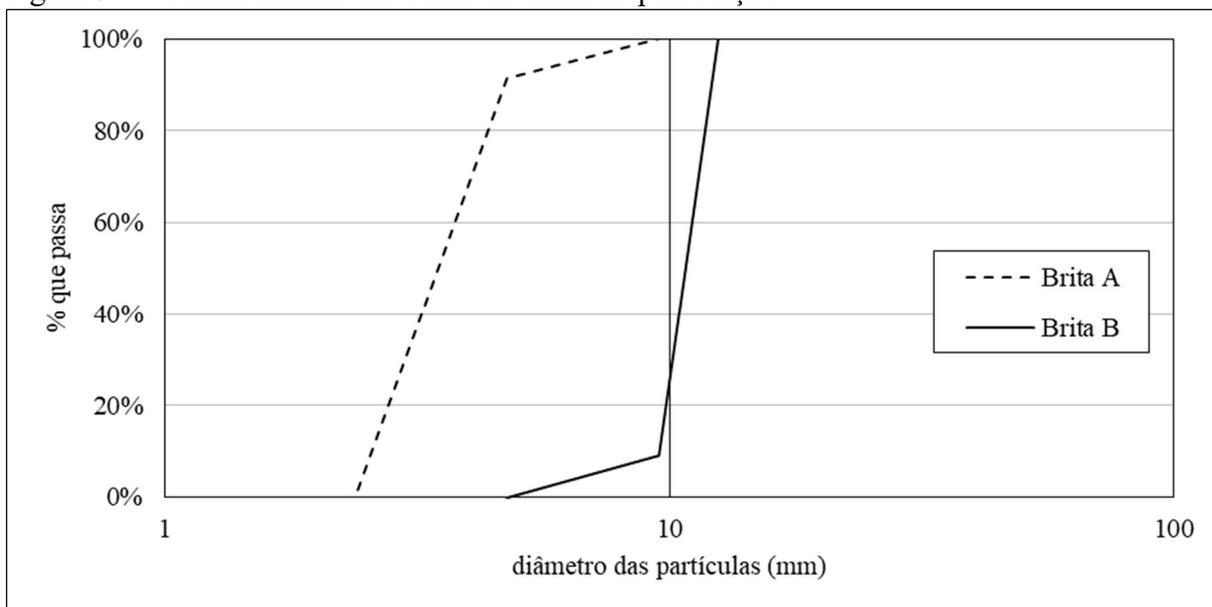
O passo seguinte foi realizar uma verificação de compatibilidade entre as duas granulometrias por meio de dois métodos: o primeiro, utilizou-se as diretrizes do NRCS (1994) para definir as curvas granulométricas limites para um sistema filtrante eficiente; e a segunda, utilizou-se o critério de Raut e Indraratna (2008) para verificar a relação de retenção entre os dois materiais. Conforme mostra a Figura 33, a granulometria da Areia A não se encontra na região estável para as funções filtrantes e drenantes, definida pelo NRCS (1994). Em relação ao critério de Raut e Indraratna (2008), considerando um I_D de 70% para a determinação da curva de distribuição das constrições (CDC_Areia A, Figura 33), o valor do d_{c35} está na ordem de 0,041 mm e o d^*_{85} de 0,133 mm, resultando numa razão de 0,311, ou seja, eficiente para filtragem. A granulometria, portanto, não está adequada quanto à drenagem por ser mais fina que o necessário, todavia está adequada para a filtragem. Dessa forma, decidiu-se colocar duas granulometrias de brita após a areia, junto às grades de ferro, para melhorar a drenagem do sistema. A granulometria das britas estão apresentadas na Figura 34.

Figura 33 – Análise das granulometrias dos materiais



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 34 – Granulometria das britas da calha de percolação



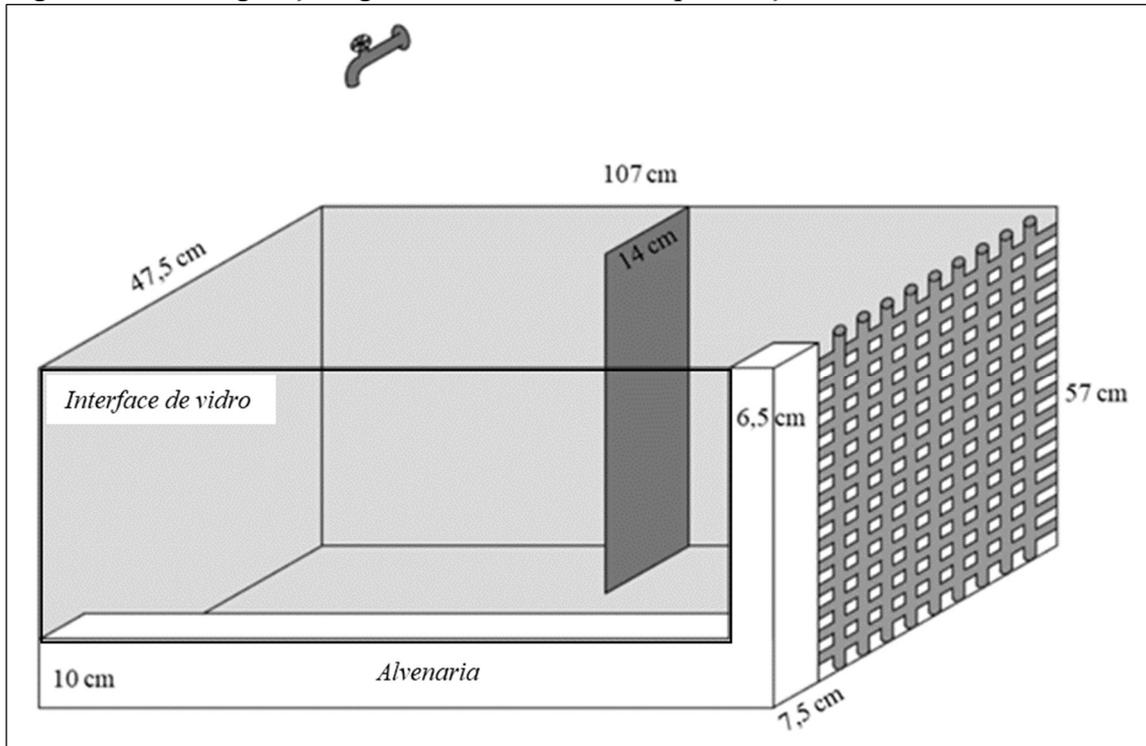
Fonte: elaborada pelo autor.

4.1.2 Configurações geométricas do modelo de calha de percolação

As configurações geométricas adotadas para a calha de percolação foram as seguintes: 47,5 cm de largura, 107 cm de comprimento e 57 cm de altura. A Figura 35 ilustra a geometria adotada. Para a colocação da face de vidro de 1 cm de espessura, foram construídos uma base de 10 cm de altura e 7,5 cm de largura, e uma coluna de 6,5 cm de comprimento, para interligar as grades de ferro e a parede em vidro. A alimentação do fluxo de água estava garantida por meio de uma torneira localizada, imediatamente, acima do modelo, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Sobral – CE. Toda a área foi devidamente impermeabilizada com uma argamassa à base de resina.

No primeiro enchimento de água, percebeu-se que havia um fluxo preferencial de água pela interface entre o solo e a parede de alvenaria, o que levou a colocar uma cortina impermeável de 14 cm de largura na metade do comprimento, como forma de reduzir o fluxo, ao aumentar o caminho de percolação na interface. O mesmo fluxo preferencial não foi observado na interface entre o solo e a parede de vidro, provavelmente, devido a coluna de alvenaria que interliga a parede de vidro com a grade de ferro, que produziu o mesmo efeito de uma cortina. A Figura 36 apresenta a estrutura do modelo construído.

Figura 35 – Configurações geométricas da calha de percolação



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 36 – Estrutura externa para a calha de percolação



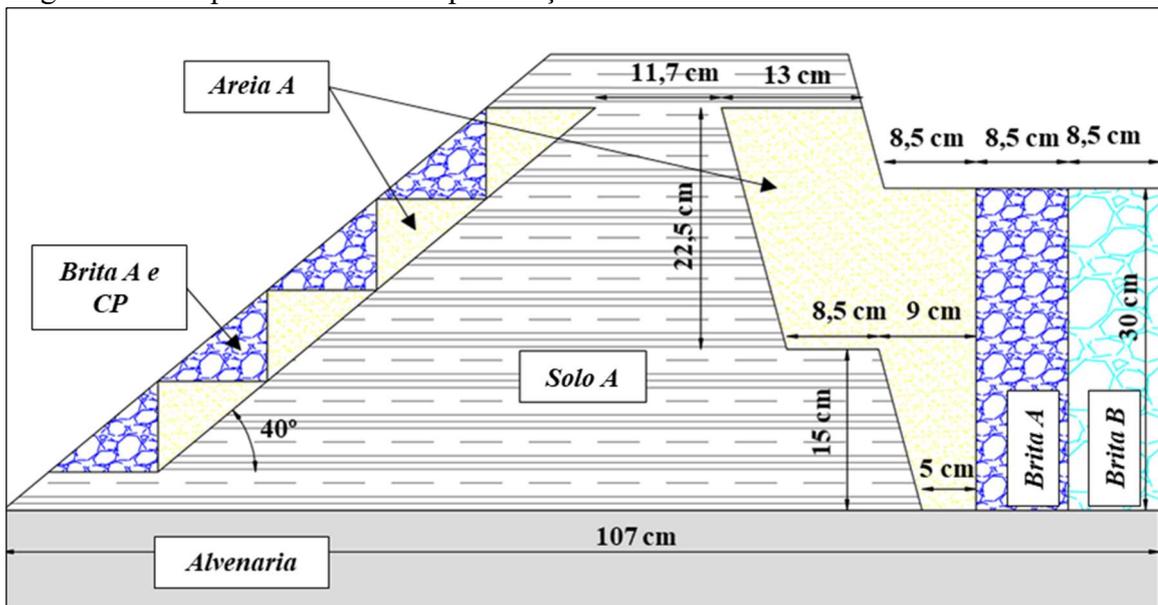
Fonte: elaborada pelo autor

4.1.3 Processo construtivo

Inicialmente, o solo base passou por um processo de homogeneização e retirada de matéria orgânica. Adotou-se um teor de umidade de 18,2%, equivalente ao teor de umidade ótimo do ensaio de compactação Proctor Normal (ABNT, 2016). Dessa forma, o solo base foi lançado em camadas de, aproximadamente, 3 cm e compactado por apiloamento. Utilizou-se corpos de prova de concreto, provenientes dos materiais descartados de ensaios realizados no laboratório de materiais da UVA, como ferramenta para compactação manual das camadas de solo. Ressalva-se que não foi feito o controle de densidade do modelo, apenas se procurou atingir um nível adequado de trabalhabilidade do material.

A areia e a brita eram colocadas simultaneamente à compactação das camadas do solo base. A areia era colocada seca, sendo somente a partir da metade e no final da altura do modelo que ocorria o assentamento por ação de queda d'água lançada nesse material. Utilizou-se também duas chapas de aço para evitar o contato entre os materiais e o transporte de partículas de um material para outro devido a construção. Somente ao final, as chapas eram retiradas. A Figura 37 apresenta o modelo esquemático da calha de percolação. Por conveniência, utilizou-se os corpos de prova (CP) de concreto no talude de montante, junto à camada de proteção de brita, para diminuir o risco de escorregamento, conforme pode ser visto na Figura 38. Este modelo ficou em operação durante 90 dias, com ciclos de enchimento e secagem do reservatório no mesmo dia.

Figura 37 – Esquema da calha de percolação



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 38 – Modelo da calha de percolação construído



Fonte: elaborada pelo autor.

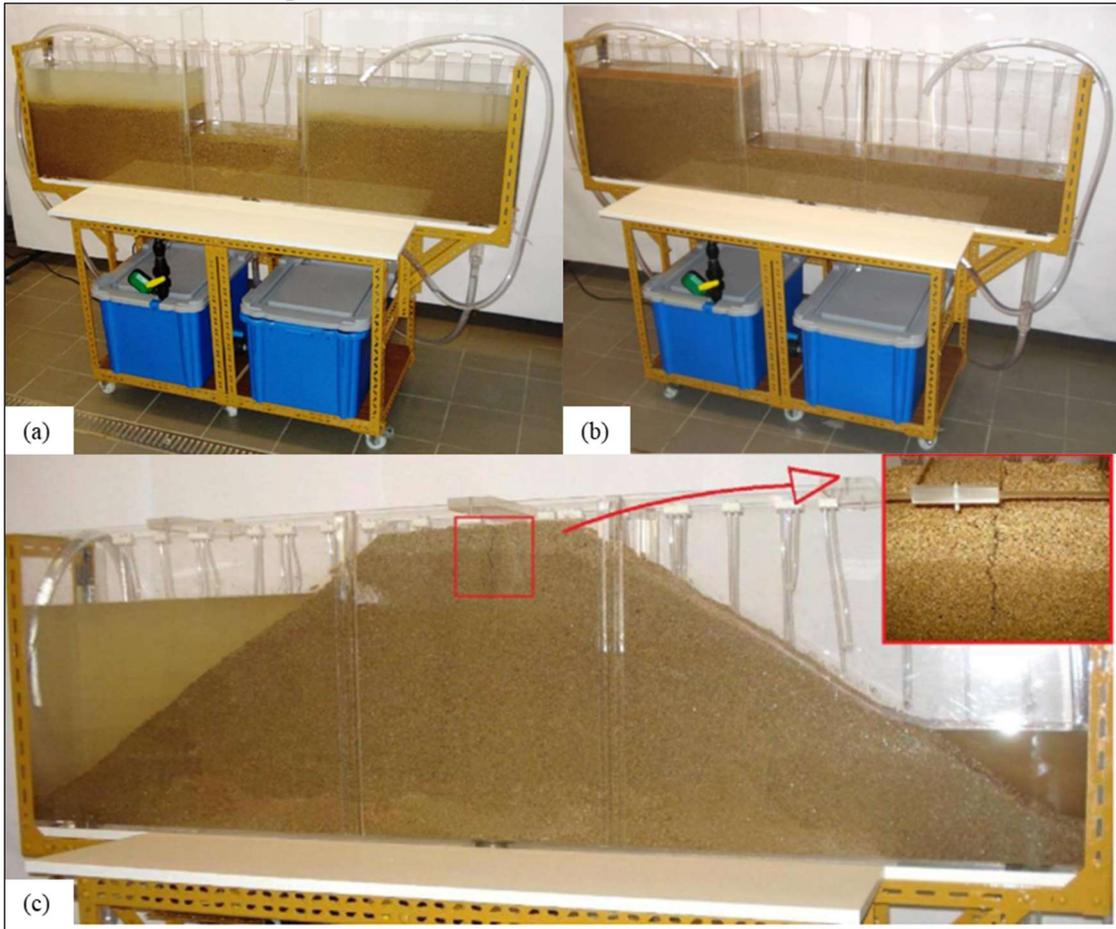
4.2 Modelo experimental da barragem de terra

Com base nas lições aprendidas durante a construção do modelo da calha de percolação, partiu-se então para um modelo experimental de barragem de terra. Uma das finalidades do experimento, além de observar o comportamento dos solos frente a possíveis eventos de erosão interna, foi também de explorar o lado didático do experimento. Para tanto, era necessário que a estrutura escolhida pudesse ter um melhor campo de visualização de quaisquer processos que ocorressem, facilitar o trabalho de lançamento de material e compactação, além da locomoção do modelo construído pelo laboratório e também em salas de aula.

Nesta fase, inicialmente, procurou-se na literatura disponível modelos experimentais de estruturas de terra que pudessem se adequar a problemas relacionados à erosão interna, no qual foram selecionadas duas pesquisas para basear este estudo:

- a) Ferreira (2008): desenvolveu um equipamento laboratorial destinado ao estudo de percolação bidimensionais em meios porosos em modelos reduzidos de (a) ensecadeiras, (b) cortinas de retenção e (c) barragens de aterro, conforme pode ser observado na Figura 39.

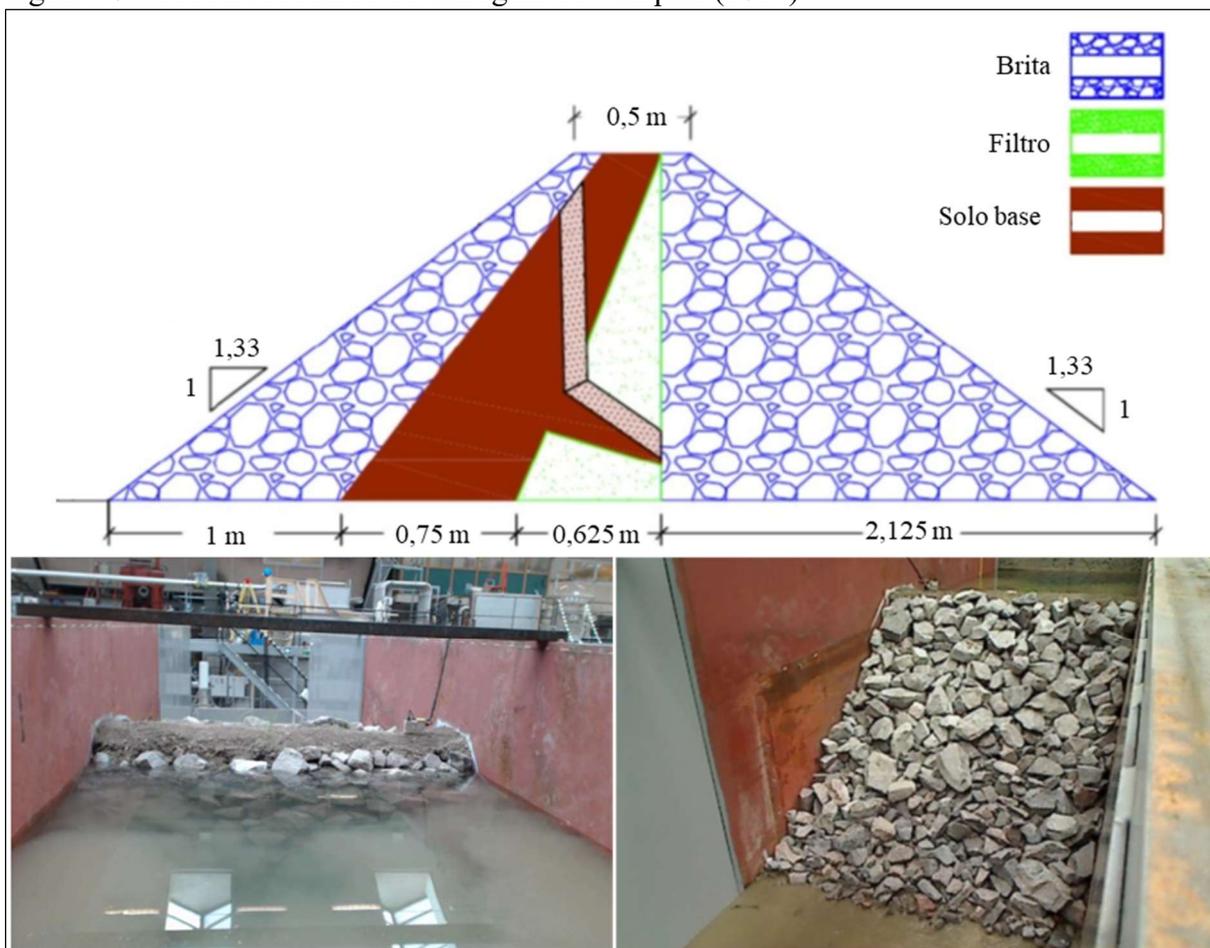
Figura 39 – Modelos de (a) ensecadeira, (b) cortina de retenção e (c) barragem de aterro desenvolvidos por Ferreira (2008)



Fonte: Ferreira (2008).

- b) Vazquez (2014): desenvolveu um modelo reduzido de barragem de aterro para analisar os mecanismos de falhas antes da ruptura e verificar a confiabilidade de uma análise de risco após a ruptura da barragem, cujo projeto de barragem foi desenvolvido para rompesse somente por um evento de erosão interna, conforme ilustra a Figura 40.

Figura 40 – Modelo reduzido de barragem de Vazquez (2014)



Fonte: Adaptado de Vazquez (2014).

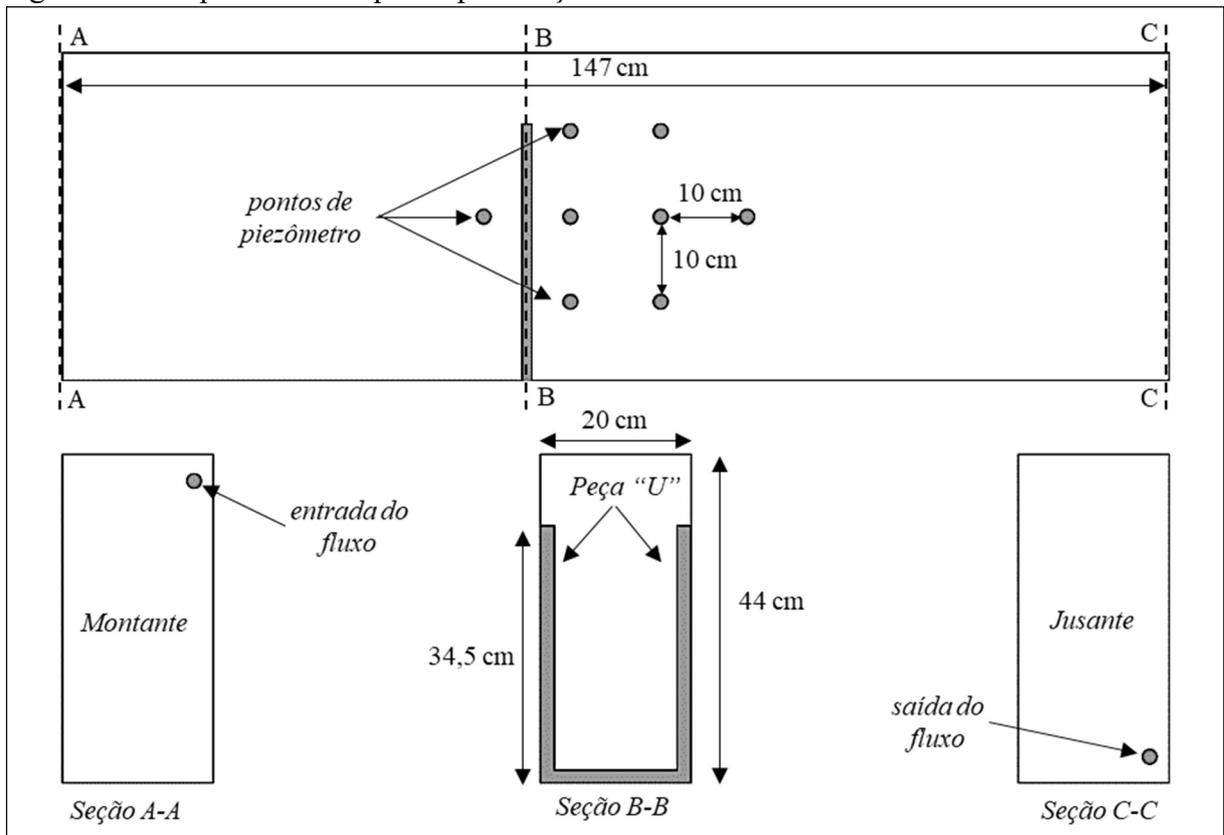
A seguir, serão detalhados os procedimentos adotados para a construção do modelo experimental de uma barragem de terra.

4.2.1 Configurações geométricas do reservatório

A estrutura para a construção do modelo foi uma adaptação do reservatório de percolação desenvolvido por Ferreira (2008). O reservatório foi construído em acrílico, tendo as seguintes configurações geométricas, conforme ilustra a Figura 41: 147 cm de comprimento, 20 cm de largura, 44 cm de altura e 1,3 cm de espessura de parede. Por se tratar de um modelo experimental de barragem e, portanto, um modelo bidimensional de percolação em solos, o comprimento do reservatório deveria ser bem maior que a altura e a largura, reduzida. Além de manter uma relação adequada com o tamanho das partículas e o atrito lateral entre as paredes. Próximo a metade de seu comprimento, foi adotado uma estrutura em formato de “U”, também em acrílico, ligada ao reservatório, com a mesma função da cortina adotada na calha de

percolação, evitar o fluxo preferencial pela interface de materiais. Duas aberturas nas faces de montante e jusante foram feitas para entrada e saída do fluxo de água. Nesta última, foi conectada uma torneira para controlar a permissão ou paralisação do fluxo de saída. A face frontal possui oito orifícios, localizados na região central, com 20 mm de diâmetro para a instalação de piezômetros. Na face superior, o tanque apresenta uma tampa com suporte para vedação da estrutura, caso necessário.

Figura 41 – Esquema do tanque de percolação utilizado



Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, foi desenvolvido também o suporte metálico para acomodar o tanque e garantir a locomoção do aparelho. O suporte possui 70 cm de altura, tamanho julgado adequado para facilitar o trabalho de lançamento e retirada de materiais. O tanque de percolação e o suporte metálico estão apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Tanque de percolação e suporte metálico



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.2 *Análise granulométrica dos materiais e geometria da barragem de terra*

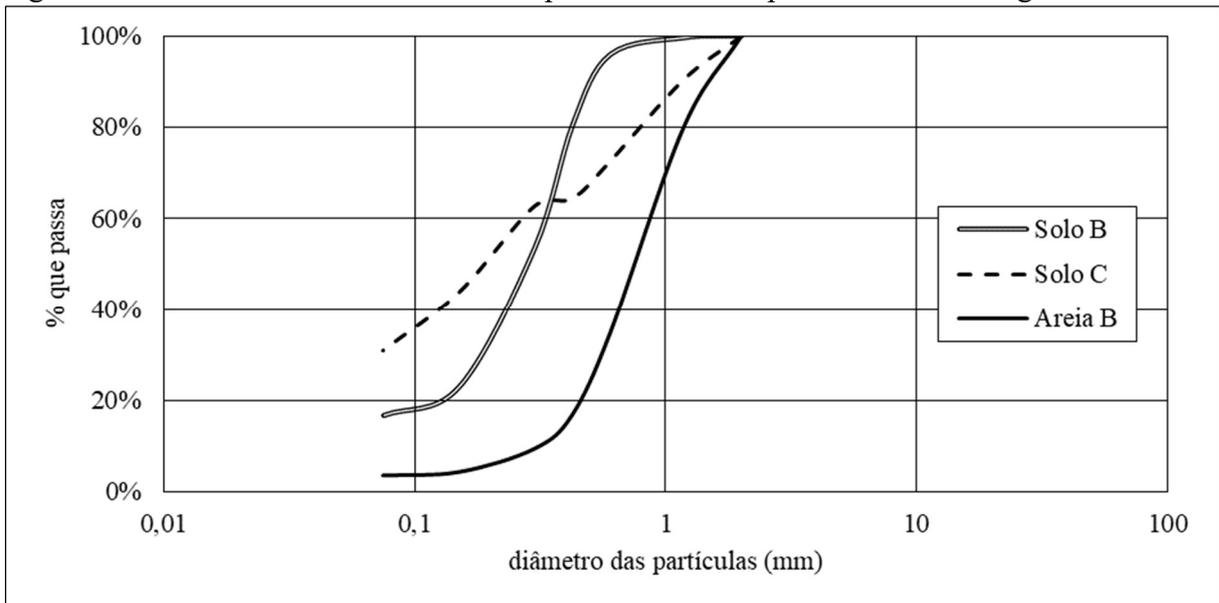
Para este modelo experimental de barragem, procurou-se definir os materiais de forma que permitissem que as partículas de solo base fossem carregadas através do filtro selecionado. Foram realizados ensaios de peneiramento em três materiais, dois para solo base e um para filtro. Esses materiais foram selecionados a partir de solos disponíveis no LabSolos. As curvas granulométricas dos materiais estão apresentadas na Figura 43. A partir das curvas dos materiais, foi decidido que a Solo C seria utilizado como o solo base e a Areia B como material para o filtro granular. Entretanto, devido a quantidade de solo disponível, optou-se por fazer uma barragem zoneada, tendo o Solo C na região à montante e o Solo B na região à jusante.

Inicialmente, foi analisada a compatibilidade entre o Solo C e a Areia B para um sistema efetivo de filtragem, utilizando o critério de Raut e Indraratna (2008). Nessa análise, verificou-se que os materiais eram compatíveis, o filtro, portanto, era capaz de interromper o carregamento do solo base. Entretanto, como o propósito foi definir granulometrias incompatíveis, ou seja, que permitissem o transporte de partículas, fez-se necessário analisar uma forma de aproveitar esses materiais. Foi então proposto um processo de refinamento dos materiais e a melhor forma encontrada foi utilizar a fração passante na peneira N° 30 do Solo C e limitar a granulometria da Areia B entre 1,18 mm e 2 mm. As novas granulometrias Solo C'

e Areia B', bem como a distribuição das constrictões (CDC_Areia B') para I_D de 70% são apresentados na Figura 44. A análise determinou que o diâmetro dc_{35} foi de 0,263 mm e o d_{85}^* foi 0,214 mm. Dessa forma, como o dc_{35} é maior que o d_{85}^* , pressupõe-se que haja carreamento das partículas do Solo C', conforme o propósito inicial. Os dados granulométricos dos materiais apresentados estão disponíveis no Apêndice B.

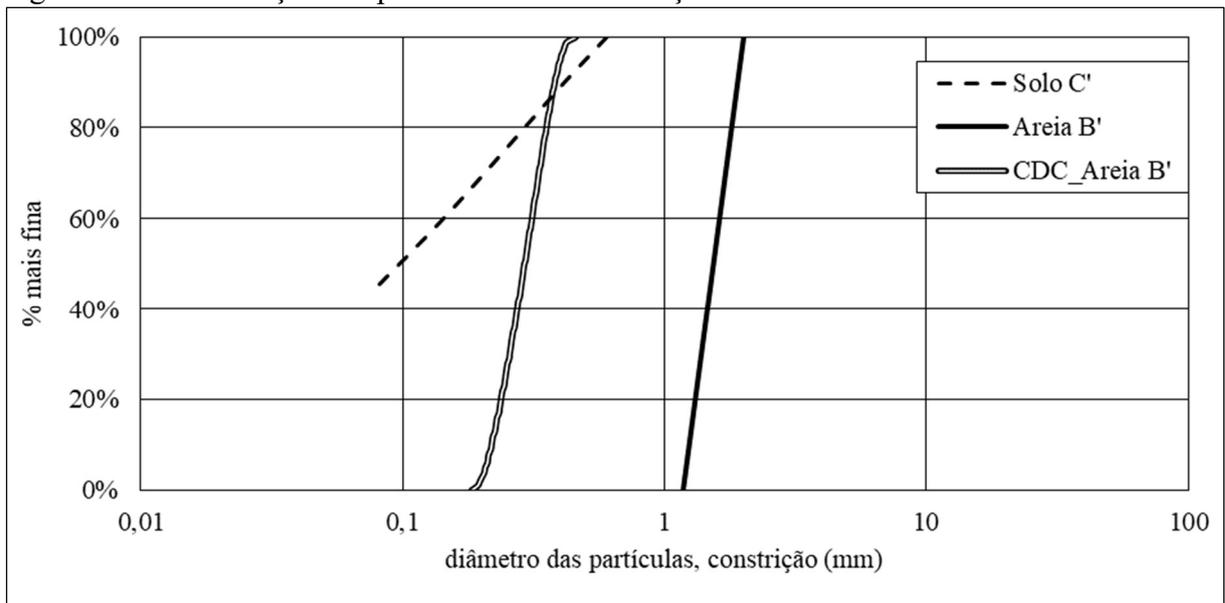
A seção da barragem adotada foi de uma barragem zoneada com o Solo C' no talude de montante e o Solo B no talude de jusante. O modelo possui 44 cm de altura, mesma altura do reservatório, 10 cm de comprimento no coroamento e taludes na proporção de 1,3:1. O comprimento total da seção foi de 117,8 cm. O sistema de drenagem interna é composto por um filtro vertical e um tapete drenante, interligado a um dreno de pé, no qual possui uma transição granular da Areia B' a uma brita. A espessura inicial do filtro e do tapete drenante foram de 2,3 cm. A Figura 45 apresenta a seção da barragem experimental inicial.

Figura 43 – Granulometrias dos materiais para o modelo experimental da barragem de terra



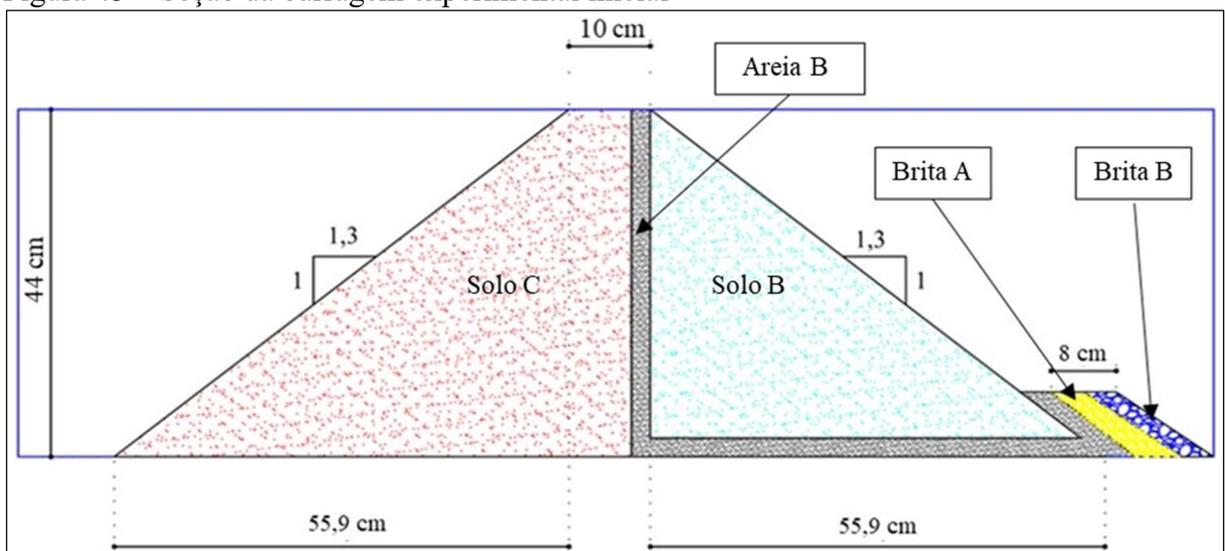
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 44 – Distribuição das partículas e das restrições dos materiais refinados



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 45 – Seção da barragem experimental inicial



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.3 Processo construtivo

Inicialmente, os materiais foram homogeneizados e o Solo C foi passado na peneira Nº 30, conforme explicado, anteriormente, para atingir a granulometria pretendida do Solo C'. Para o gabarito das medidas e geometria da seção do modelo, foi impresso, na escala real de 1:1, o projeto inicial da seção e colado na face posterior do reservatório com todas as marcações dos materiais e as camadas de compactação. No total, a seção foi dividida em 21 camadas com 2 cm cada, adotando-se um teor de umidade equivalente a 14%. Na compactação, pretendeu-se

deixar o material menos compacto, para facilitar o desprendimento de partículas pelo fluxo, haja vista que a carga hidráulica que estaria submetida era pequena. Para tanto, optou-se por compactação manual, com um objeto de peso igual a 0,72 kg, pois se preocupava que com um peso mais elevado pudesse danificar o acrílico. Procurou-se reproduzir uma energia de compactação entre 60%-70% da energia de compactação do ensaio de Proctor Normal (ABNT, 2016), correlacionando-o com o número de golpes por camada e altura de queda do compactador. O peso específico do modelo foi determinado de forma indireta, compactando-se o solo num molde do Proctor Normal, aplicando-se o mesmo nível de energia. O peso específico ficou por volta de 16,56 kN/m³.

A primeira camada do Solo C' foi colocada junto com a Areia B' do tapete drenante, sendo compactada em seguida. A areia do tapete foi colocada seca, sendo umedecida e adensada somente após a compactação da camada à montante. Nas camadas seguintes, optou-se por construir três camadas no talude de jusante com o Solo B para finalizar junto com o dreno de pé. As camadas subsequentes à montante foram colocadas e compactadas, também preenchendo o espaço onde seria o filtro vertical. Nesse caso, pretendeu-se realizar um procedimento semelhante à construção real de filtros em barragens, no qual o solo delimitado no espaço do filtro era escavado e preenchido com a Areia B'. Destaca-se que a camada de contato entre o solo base e filtro foi retirada, procurando-se remover toda a contaminação de partículas no filtro, já que devido a cor do solo base apresentar um contraste distinguível da areia, era possível visualizar e a remover. A Figura 46 apresenta as etapas iniciais da construção do modelo experimental, onde é possível verificar o gabarito de medidas auxiliar, as camadas de solo compactadas, o tapete drenante e o dreno de pé construídos e três pontos de piezômetros instalados.

Figura 46 – Etapas iniciais da construção do modelo experimental de barragem de terra



Fonte: elaborada pelo autor.

Conforme é demonstrado na Figura 47, seguiu-se as recomendações de Cruz (1996), a respeito das interfaces, de compactar o solo nas proximidades da peça “U” em acrílico com uma umidade mais elevada para evitar que o solo seja “descolado” da interface e, assim, de formar um fluxo preferencial.

A construção do modelo seguiu até uma altura de 28 cm, com o filtro atingindo a altura da segunda linha de pontos de piezômetros, aproximadamente 20 cm. Nesse estado, decidiu-se iniciar o enchimento de água no reservatório para realizar as primeiras observações a respeito de carreamento de partículas e verificar a influência da espessura do filtro vertical. Foi realizado um ciclo de enchimento e secagem de reservatório durante um período de 30 dias. Ao longo desse período, o reservatório era enchido até o nível máximo e secado no mesmo dia. A Figura 48 mostra o modelo experimental após o primeiro enchimento do reservatório.

Figura 47 – Material compactado nas proximidades da interface



Fonte: elaborada pelo autor.

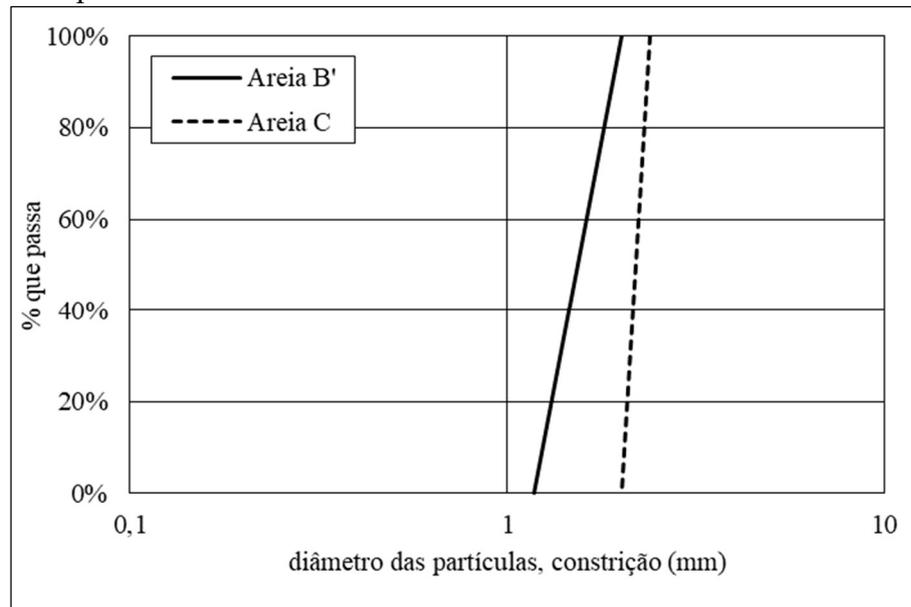
Figura 48 – Modelo experimental (a) após o primeiro enchimento e (b) detalhe do filtro vertical



Fonte: elaborada pelo autor.

Após esse período, foi realizado um segundo ensaio, com um aumento na espessura do filtro do modelo experimental, em relação ao primeiro ensaio. Dessa vez, colocando-se duas granulometrias de areias em transição, a Areia B' a jusante do Solo C' e a nova granulometria Areia C em seguida. As granulometrias das areias são mostradas na Figura 49. A nova espessura adotada para o filtro foi de 12,5 cm, com metade para cada uma das areias.

Figura 49 – Curvas granulométricas das areias utilizadas no aumento da espessura do filtro



Fonte: elaborada pelo autor.

Nesse processo, todo o espaço necessário para o aumento do filtro foi escavado, retirando-se também a areia inicial do primeiro modelo. Uma amostra dessa areia foi obtida para analisar, na granulometria, a presença de partículas erodidas do Solo A3', após o período em que ficou submetido o fluxo de água. Na Figura 50 está apresentada o modelo experimental após a retirada do material para o aumento do filtro.

As areias foram lançadas secas no espaço escavado, sendo utilizado uma folha de papelão para separar as duas granulometrias. A folha era levantada, lentamente, para evitar que as partículas das areias se misturassem durante a construção. Uma sequência do processo de execução do filtro é mostrada na Figura 51. O filtro foi construído até a altura de 28 cm.

A última etapa do processo construtivo foi finalizar a seção da barragem até a altura, inicialmente, definida em projeto. As camadas seguintes à altura do filtro foram construídas com o Solo C', seguindo o mesmo procedimento de compactação anterior. Após finalizado a crista da barragem, procedeu-se com a proteção dos taludes de montante e jusante com camadas de Areia B' e britas. Finalizado, iniciou-se o enchimento do reservatório do modelo

experimental. Dessa vez, o reservatório foi enchido até a nível máximo de acumulação, mantendo-se o reservatório sempre cheio e na mesma cota. O modelo experimental ficou operando durante 60 dias.

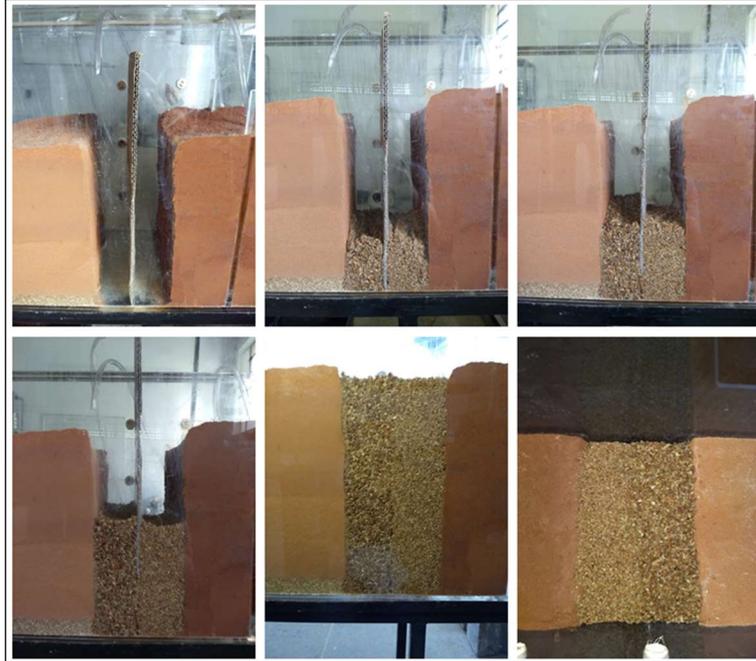
A Figura 52 apresenta o modelo experimental finalizado e em operação, realizando o primeiro enchimento do reservatório. Pode-se observar os detalhes da crista de coroamento e a camadas de proteção dos taludes e o dispositivo utilizado para manter o nível de água máximo fixo.

Figura 50 – Aumento da espessura do filtro vertical



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 51 – Execução do lançamento das areias para construção do filtro vertical



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 52 – Modelo experimental de barragem de terra (a) finalizado com (b) os detalhes do coroamento e (c) o dispositivo de controle do nível de água



Fonte: elaborada pelo autor.

4.3 Resultados e discussões

As observações realizadas neste estudo experimental correspondem somente às questões relacionadas ao carreamento de partículas pelo fluxo de água. Para tanto, foram focos das observações: as interfaces entre os materiais solo/filtro e solo/parede; os métodos de dimensionamento de partículas e constrições; e a espessura da camada filtrante. Os resultados serão discutidos a seguir para os dois modelos experimentais realizados.

4.3.1 *Modelo de calha de percolação*

No primeiro enchimento da calha de percolação, observou-se o desenvolvimento de um fluxo preferencial entre a interface de solo e a parede de alvenaria. Enquanto se mantinha o reservatório enchendo, parte do fluxo ficou estabelecido entre a parede, com a água escoando em maior quantidade pela interface do que saindo pelo dreno. O mesmo não foi observado na interface do solo com a parede de vidro. Provavelmente, a estrutura externa de alvenaria, no caso, a coluna de alvenaria entre a parede de vidro e a grade de ferro, atuou como uma cortina, aumentando a caminho de percolação. Como medida de solução para o fluxo preferencial na interface solo/parede de alvenaria, adicionou-se a cortina impermeável ao projeto, conforme explicado no item 4.1.3. A cortina, portanto, atuou adequadamente no controle do fluxo preferencial na interface, possibilitando a operação efetiva do dreno.

Em relação ao carreamento de grãos, semanalmente, era verificado a ocorrência de material depositado na saída do dreno (Figura 53), entretanto, nenhum material erodido foi encontrado. As granulometrias adotadas para compor o sistema solo base/filtro foram compatíveis, no tocante a estabilização do processo filtrante de partículas carreadas, para a carga hidráulica submetida. Na possibilidade de partículas do solo base serem removidas pelo fluxo de água, a estrutura das constrições internas, ou melhor, a distribuição do tamanho das constrições internas do filtro mostrou-se eficiente para paralisar o transporte desses grãos.

Figura 53 – Local de verificação de partículas erodidas pelo dreno



Fonte: elaborada pelo autor.

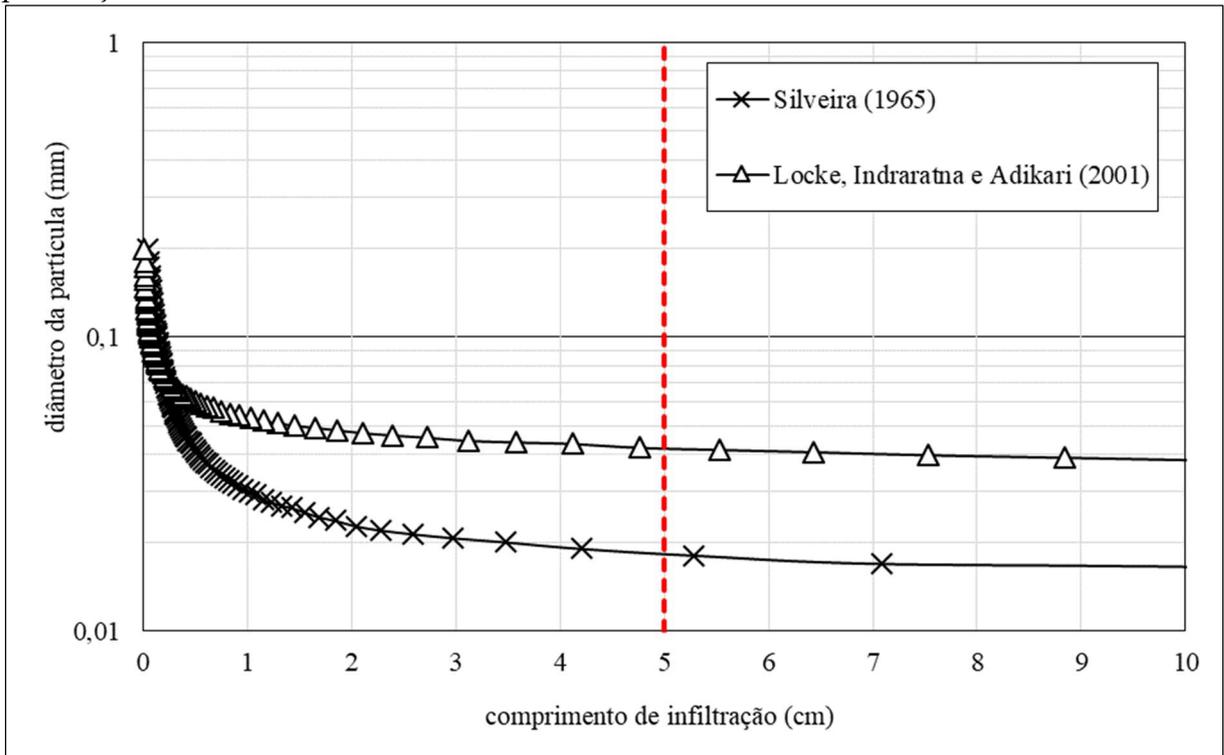
Os métodos utilizados no dimensionamento da granulometria do filtro, o método do NRCS (1994), baseado nos estudos de Sherard e Dunnigan (1989), e o critério de Raut e Indraratna (2008), foram ideais para a previsão do comportamento filtrante do modelo experimental. Apesar do NRCS (1994) ter considerado o filtro não ideal no quesito drenagem, conforme foi mostrado no dimensionamento das granulometrias anteriormente, na Figura 33, onde a curva granulométrica da Areia A está inferior ao limite granulométrico fino recomendado, a utilização das camadas de brita após o filtro foram suficientes para adequar às necessidades drenantes para o sistema solo base/filtro.

Vale destacar que, na etapa de dimensionamento das granulometrias, foram usados dois métodos distintos: o NRCS (1994), que é baseado em relações empíricas entre tamanhos de partículas do solo base e filtro; e Raut e Indraratna (2006), que é baseado numa abordagem analítica e empírica entre o tamanho das contrações internas e das partículas do solo base. Nesse caso, para as configurações geométricas, granulométricas e hidráulicas do modelo da calha de percolação, as metodologias baseadas no tamanho das partículas e das contrações apresentaram a mesma conclusão, de eficiência do filtro em paralisar o processo de carregamento de partículas.

Levando em consideração a espessura ideal para a camada de filtro, o método analítico das contrações internas proporciona uma estimativa do comprimento percorrido por uma partícula erodida até encontrar uma contração capaz de paralisá-la para um dado nível de confiança. Para as características granulométricas da Areia A e considerando um nível de confiança N_c de 95%, a curva de infiltração de partículas foi definida na Figura 54 para o

modelo simplificado de constrições de Silveira (1965) e o modelo de rede cúbico de poros de Locke, Indraratna e Adikari (2001). Percebe-se, ao analisar a curva que, a partir de 5 cm qualquer aumento na espessura da camada do filtro é insignificante para melhorar as condições filtrantes do material.

Figura 54 – Curva de infiltração de partículas para a granulometria do filtro da calha de percolação

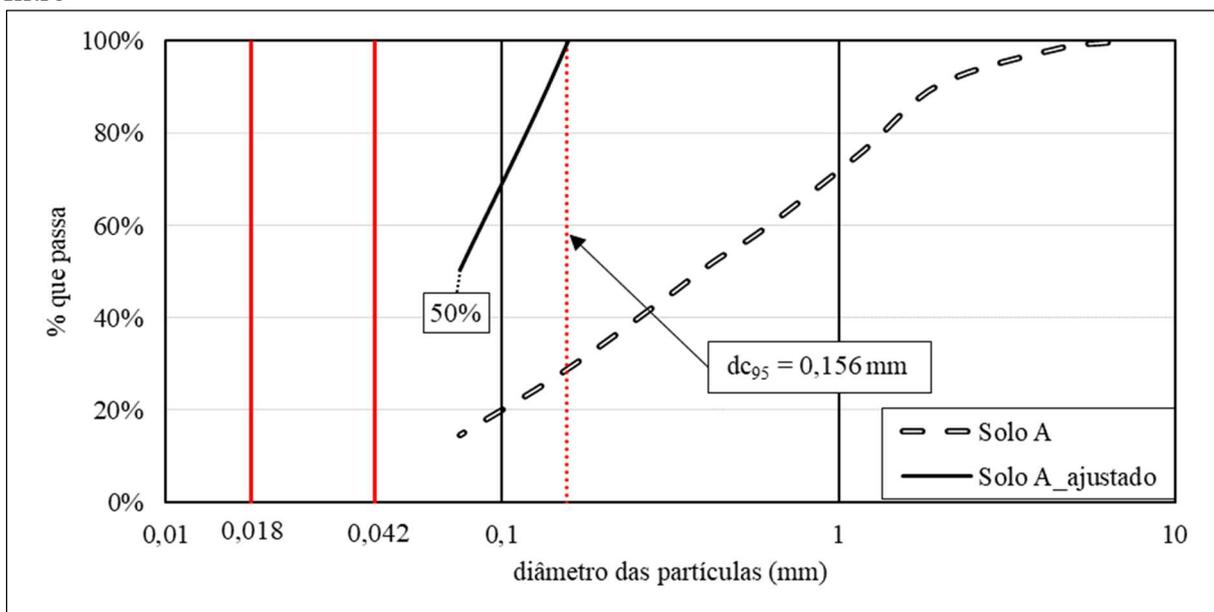


Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo de previsão de Silveira (1965) estima a captura efetiva de partículas com diâmetro superior a 0,018 mm no interior do filtro, enquanto o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) estima a captura de partículas com diâmetro superior a 0,042 mm. Ambos os modelos foram definidos com o nível de confiança de 95%, considerando a espessura mínima de 5 cm. A granulometria do solo base da calha de percolação (Solo A) possui em torno de 15% de material fino ($<0,075$ mm), ou seja, com a espessura mínima de 5 cm o filtro, teoricamente, deve impedir que menos de 85% de suas partículas de serem erodidas para fora do dreno. Se analisar somente os grãos compreendidos entre os diâmetros mínimos de captura, determinados pelos modelos, e o $dc_{95} = 0,156$ mm do filtro, diâmetro máximo no qual é permitida a entrada no interior do filtro, conforme demonstra na curva granulométrica ajustada na Figura 55, a quantidade de partículas que podem ser capturadas é superior a 50% em massa. Se considerar o efeito autofiltrante, inerente da retenção progressiva das partículas ao longo do tempo de

fluxo, essa porcentagem pode aumentar ainda mais. No caso, o modelo da calha de percolação, que apresenta filtro com espessura superior a 5 cm, não apresentou carreamento de partículas na saída do dreno, ou seja, o resultado analítico do estudo de carreamento está coerente com o resultado experimental obtido no estudo.

Figura 55 – Análise granulométrica das partículas de solo suscetíveis a serem capturadas pelo filtro



Fonte: elaborada pelo autor.

4.3.2 Modelo experimental de barragem de terra

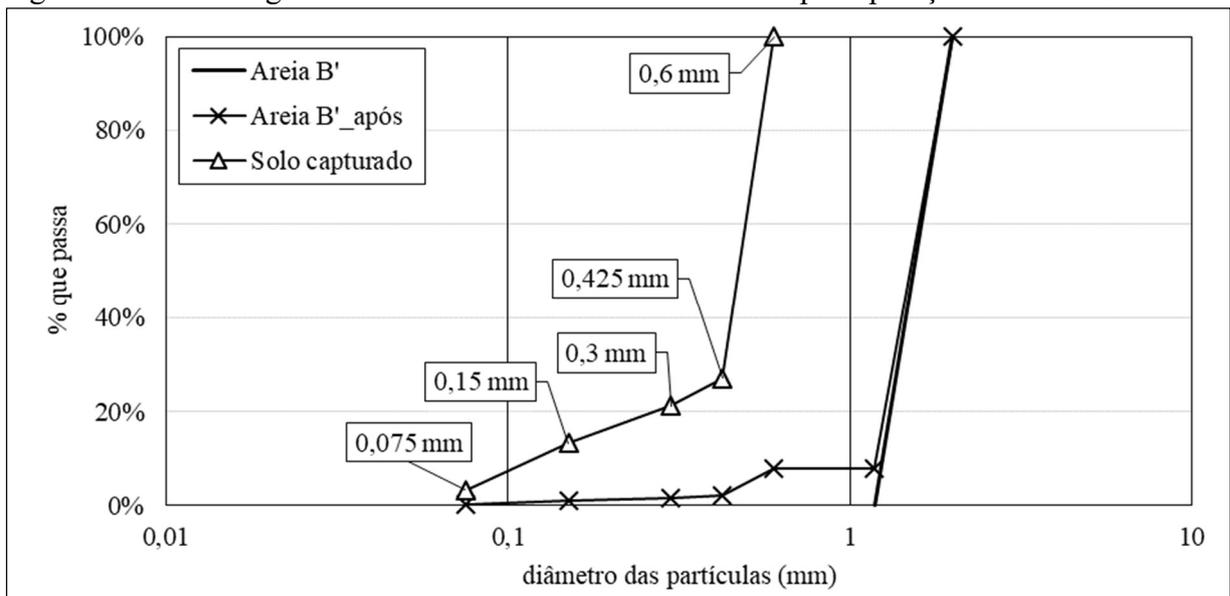
Inicialmente, o projeto preliminar do modelo experimental de barragem de terra contava com o filtro vertical, referente ao material Areia B', com uma espessura de 2,3 cm. Antes de finalizar a construção do modelo até a altura final do projeto, foi iniciado o processo de enchimento do reservatório e operação. Não foi percebido nenhum fluxo preferencial através das interfaces. Ao longo dos 30 dias, no qual o modelo permaneceu operando, com alguns ciclos de enchimento e secagem do reservatório, percebeu-se, visualmente, através da parede de acrílico, que o filtro havia sido contaminado por algumas partículas do Solo C' devido ao fluxo de percolação. Conforme pode ser visto na Figura 56, os grãos do Solo C' possuem uma coloração forte, perceptíveis quando comparados com a areia do filtro. Uma amostra do filtro, após o período em que ficou operando, foi retirada para uma análise granulométrica. As curvas do filtro granular antes e após o período de operação estão apresentadas na Figura 57, bem como a curva granulométrica do solo erodido, capturado entre as constrições internas.

Figura 56 – Filtro vertical com partículas de solo base retidas



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 57 – Análise granulométrica da areia do filtro antes e após operação inicial de 30 dias



Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 6 apresenta a quantidade em porcentagem de massa de partículas de solo capturada em função do intervalo de seus diâmetros. Nota-se que a maior fração de solo erodido capturado, em torno de 73%, foi de grãos com diâmetros entre 0,6 mm a 0,425 mm. Em contrapartida, 3,4% das partículas inferiores a 0,075 mm foram capturadas.

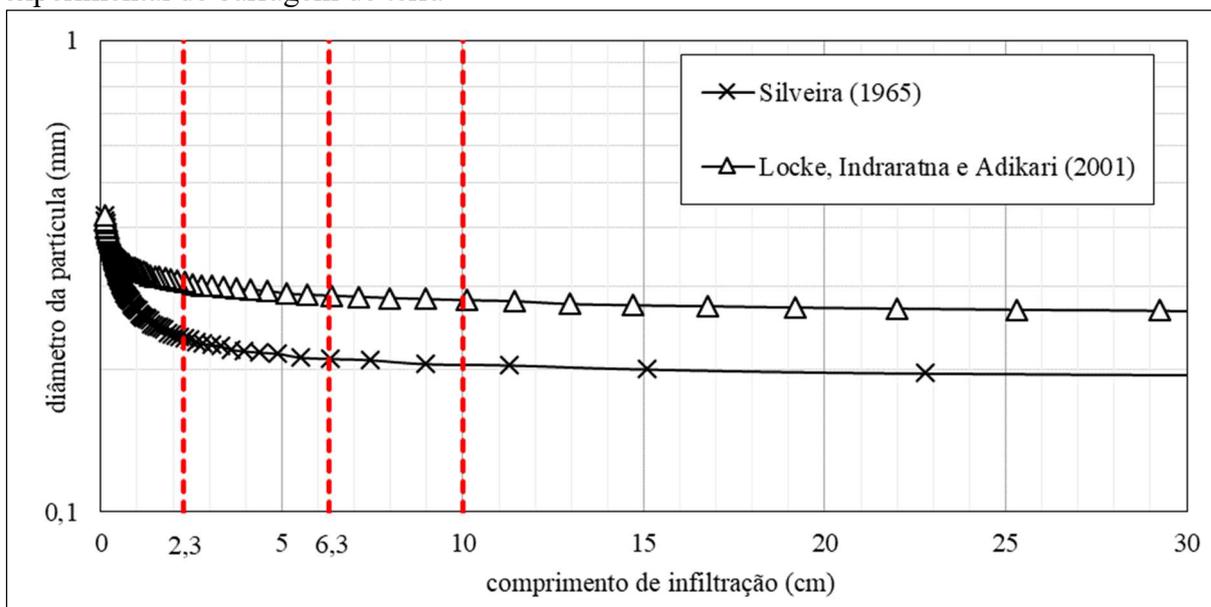
Tabela 6 – Porcentagem de solo capturada pelo filtro em função do intervalo de tamanho dos grãos

% de solo	Intervalo de tamanho
73%	0,6 mm a 0,425 mm
5,8%	0,425 mm a 0,3 mm
7,9%	0,3 mm a 0,15 mm
9,9%	0,15 mm a 0,075 mm
3,4%	< 0,075 mm

Fonte: elaborada pelo autor.

Ao analisar a curva de infiltração de partículas, obtida por meio dos dados granulométricos da Areia B', considerando, novamente, o modelo simplificado de constrições de Silveira (1965) e o modelo de rede cúbico de poros de Locke, Indraratna e Adikari (2001) para estimativa do comprimento de infiltração com N_c de 95%, apresentada na Figura 58, em função da espessura do filtro de 2,3 cm, constata-se que, em média, a distribuição das constrições internas do filtro estima a captura de partículas maiores que 0,270 mm. O modelo de Silveira (1965) estima a captura de grãos maiores que 0,234 mm, enquanto o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) estima captura de grãos maiores que 0,308 mm, considerando a espessura de 2,3 cm do filtro. Comparando-se com os dados da Tabela 6, referente ao solo erodido capturado pelo filtro, percebe-se que 80%, aproximadamente, dos grãos de solo capturado possuem diâmetro superior a 0,3 mm, ou seja, a maior quantidade de grãos capturados pelo filtro está dentro da estimativa obtida por meio dos modelos teóricos de transporte de grãos. Nesse caso, verifica-se a concordância ou correlação dos métodos analíticos de estimativa de infiltração de partículas com o resultado experimental das partículas capturadas pelo filtro.

Figura 58 – Curva de infiltração de partículas para a granulometria do filtro da modelo experimental de barragem de terra



Fonte: elaborada pelo autor.

Ainda analisando a Figura 58, percebe-se que, para as características granulométricas da Areia B', a partir de 10 cm, qualquer aumento no comprimento de infiltração não garante uma melhora na condição filtrante do material. Verificando, por meio dos modelos de Silveira (1965) e Locke, Indraratna e Adikari (2001), a captura efetiva ocorre para partículas com diâmetros maiores que 0,2 mm e 0,28 mm, respectivamente aos modelos, para um nível de confiança de 95%. Para a granulometria do solo base utilizado, Solo C', em torno de 79% dos grãos possuem diâmetro inferior a 0,28 mm. Logo, para uma efetiva filtração dos grãos menores seria necessário que o processo de autofiltração ocorresse de forma a reduzir, progressivamente, as constrições internas do filtro com a retenção de menos que 21% das partículas restantes maiores que 0,28 mm. Se considerar o valor de dc_{95} de 0,400 mm como o diâmetro máximo de entrada no filtro, a quantidade de partículas fica na ordem de 11% em massa capturada. O ideal é que este valor esteja acima de 15%.

No aumento da espessura do filtro realizado após os 30 dias de operação inicial, a espessura referente a Areia B' ficou com 6,3 cm. Para esta espessura, o modelo de Silveira (1965) estimou a captura efetiva de grãos maiores que 0,211 mm, enquanto que o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001), a captura de grãos maiores que 0,288 mm. Ao longo dos 60 dias que modelo ficou em operação, após a estabilização do regime de percolação, foi observado que o material do Solo C', em sua zona central, apresentava-se disperso, ou seja, o fluxo foi capaz de destacar as partículas finas do solo. Na Figura 59, pode-se perceber, por meio dos piezômetros instalados, as partículas finas "soltas" e invadindo os piezômetros, mesmo

estes possuindo filtros embutidos. Após dez dias, aproximadamente, as partículas do solo base foram carregadas e começaram a surgir no dreno de pé. Nos dias restantes em que o modelo continuou em operação, o material do solo base continuou sendo lavado para fora do dreno de pé. Conforme pode ser observado na Figura 60, as partículas de solo carregadas pelo fluxo foram depositadas na caixa de inspeção colocada na saída do fluxo. Portanto, no período em que o modelo permaneceu operando, o processo de autofiltração, ou melhor, a retenção progressiva de partículas ao longo do tempo, não foi eficaz para cessar o processo de carregamento de partículas pelo fluxo de água. Na Tabela 7 é apresentado um resumo dos diâmetros mínimos determinados segundos os modelos de estimativa de infiltração de partículas em função da espessura do filtro.

Figura 59 – Partículas finas “soltas” invadindo os piezômetros instalados



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Resumo dos diâmetros mínimos de captura em função da espessura do filtro para o modelo experimental

Modelo	Espessura do filtro		
	2,3 cm	6,3 cm	10 cm
Silveira (1965)	> 0,234 mm	> 0,211 mm	> 0,2 mm
Locke, Indraratna e Adikari (2001)	> 0,308 mm	> 0,288 mm	> 0,28 mm

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 60 – Partículas de solo carregadas pelo fluxo de água



Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação ao dimensionamento realizado inicialmente, o objetivo foi de projetar um modelo no qual a granulometria do filtro permitisse o contínuo carregamento de partículas do solo base, segundo o método analítico e empírico das restrições internas de Raut e Indraratna (2008). No caso, o dimensionamento determinou o dc_{35} de 0,263 mm e o d^*_{85} em 0,214 mm, com o dc_{35} maior que o d^*_{85} , e, portanto, não adequado para a filtragem eficaz de partículas erodidas. Em comparação com o critério de Terzaghi, o D_{15} do filtro era 1,277 mm e o d_{85} do solo base igual a 0,347 mm, obtendo a razão de retenção de 3,68, ou seja, dentro do intervalo granulométrico considerado eficaz para retenção de partículas. Já em relação ao critério de NRCS (1994) o solo base, no caso o Solo C', possui mais de 40% de grãos passantes na peneira N° 200, classificando-o como solo do grupo 2 (ver Tabela 2), e, portanto, necessitando de uma granulometria com D_{15} de no máximo 0,7 mm. Diante disso, percebe-se que o critério de Terzaghi não foi adequado para prever o comportamento filtrante do modelo experimental. Isso pode indicar que, para solos base muito finos, o critério de Terzaghi, somente, não é recomendado para dimensionamento de filtros.

5 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM INTERNA EM BARRAGENS DE TERRA: ESTUDO DE CASO NAS BARRAGENS BENGUÊ E ITAÚNA

Este capítulo apresenta uma proposta metodológica para avaliação de sistemas de drenagem interna em barragens de terra por meio da teoria de determinação da distribuição das constrições internas de um solo granular em comparação com a granulometria do material utilizado no maciço, chamado de solo base. O método consiste em avaliar a granulometria do filtro empregado em relação a dois aspectos: a capacidade filtrante do solo em capturar partículas erodidas e a instabilidade interna do filtro. Para tanto, a metodologia foi aplicada em duas barragens de terra do estado do Ceará e os resultados comparados com os critérios de Terzaghi (TERZAGHI; PECK, 1962) e do NRCS (1994), e com os Relatório de Segurança de Barragens da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH.

5.1 Introdução

Em estudos recentes (PIMENTA FILHO, 2013; ARAUJO, 2017; ARAUJO; MALVEIRA; SOARES, 2018; ARAUJO *et al.*, 2018), o conceito de distribuição de constrições internas foi adotado como propostas de avaliação de segurança de filtros contra erosão interna em barragens de terra. As análises consistem, resumidamente, em selecionar granulometrias dos materiais utilizados como solo base e filtro granular, aplicar o conceito de determinação das constrições, a depender do nível de compactação, e correlacionar com determinado tamanho de partícula do solo base.

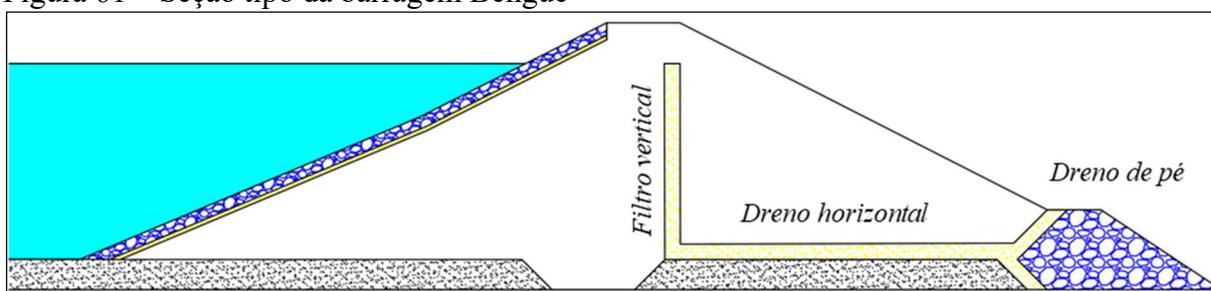
A avaliação da efetividade ocorre, aplicando-se ou o conceito de comprimento de infiltração de partículas, descrito inicialmente em Silveira (1964), por meio da estimativa de número de confrontos λ , dado na Equação (11), e identificar qual o diâmetro mínimo que a granulometria do filtro é capaz de reter ao longo de sua espessura, ou por meio de uma relação entre um tamanho específico de uma constrição e de um grão do solo base, notadamente, a relação de Raut e Indraratna (2008), dada na Equação (23).

Na metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna, que neste capítulo será apresentada, serão abordados os dois aspectos de análises, tanto o comprimento de infiltração, quanto a relação entre constrição e partícula de solo base, além de também verificar a instabilidade interna do solo granular selecionado para filtro. A metodologia será aplicada em duas barragens de terra, localizadas no estado do Ceará: Benguê e Itaúna.

5.2 Barragem Benguê

A barragem Benguê, cuja seção tipo máxima está esquematizada na Figura 61, situa-se no município de Aiuaba, localizado no extremo sul do estado do Ceará, pertencente à bacia do Alto Jaguaribe e barra o Riacho Umbuzeiro. O açude compreende uma capacidade de acumulação de 19,56 hm³ de água, com altura da seção máxima de 23,61 m e 480 m de extensão pelo coroamento. A barragem é do tipo homogênea e apresenta um filtro vertical e um dreno horizontal, ambos com 100 cm de espessura, e um dreno de pé (SRH, 1998).

Figura 61 – Seção tipo da barragem Benguê



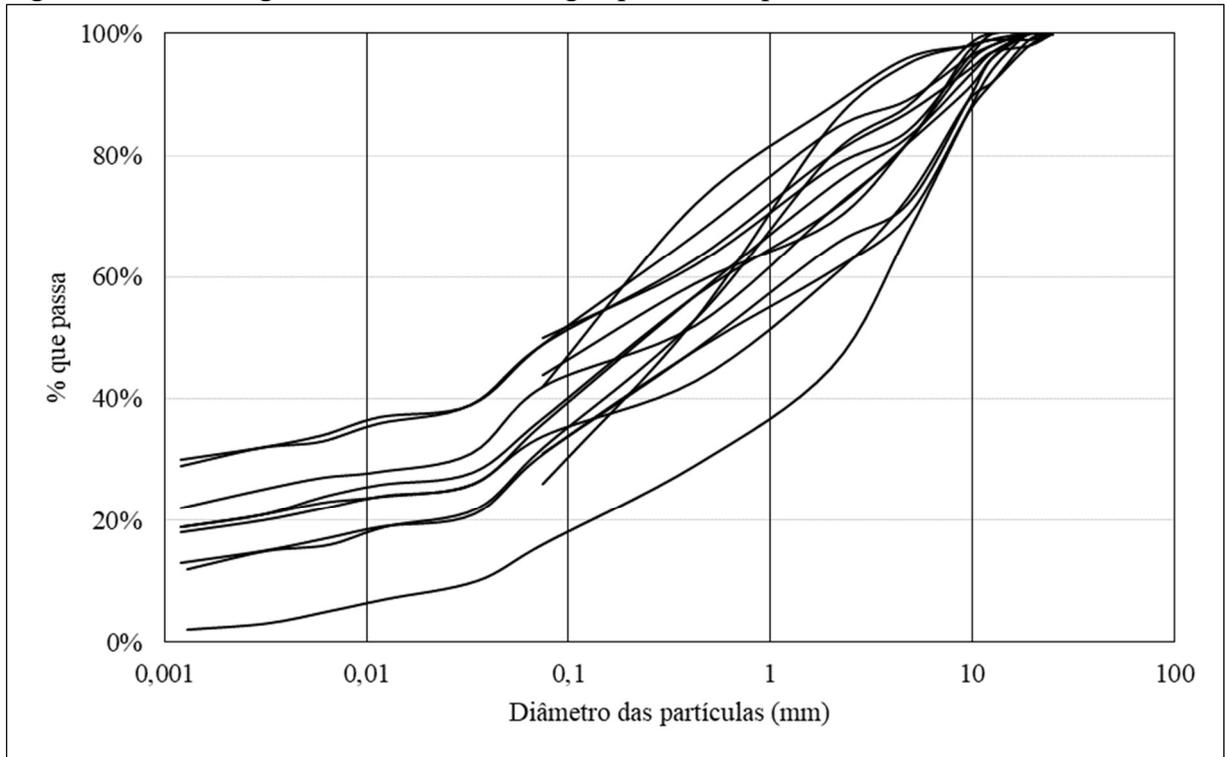
Fonte: Adaptado de SRH (1998).

5.2.1 Análise granulométrica

Os dados granulométricos dos materiais utilizados na construção do açude foram obtidos a partir da consulta no Relatório dos Estudos Básicos (SRH, 1998), fornecidos pela Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH) do Estado do Ceará. Estes dados estão disponíveis no Anexo B. O maciço é formado por solos do tipo SM (areia siltosa) e ML (silte de baixa plasticidade), todos misturados ao longo da seção. As curvas granulométricas dos materiais estão apresentadas a seguir: (a) na Figura 62 as granulometrias do solo SM; (b) na Figura 63 as granulometrias do solo ML; e, (c) na Figura 64 as granulometrias das areias do filtro vertical.

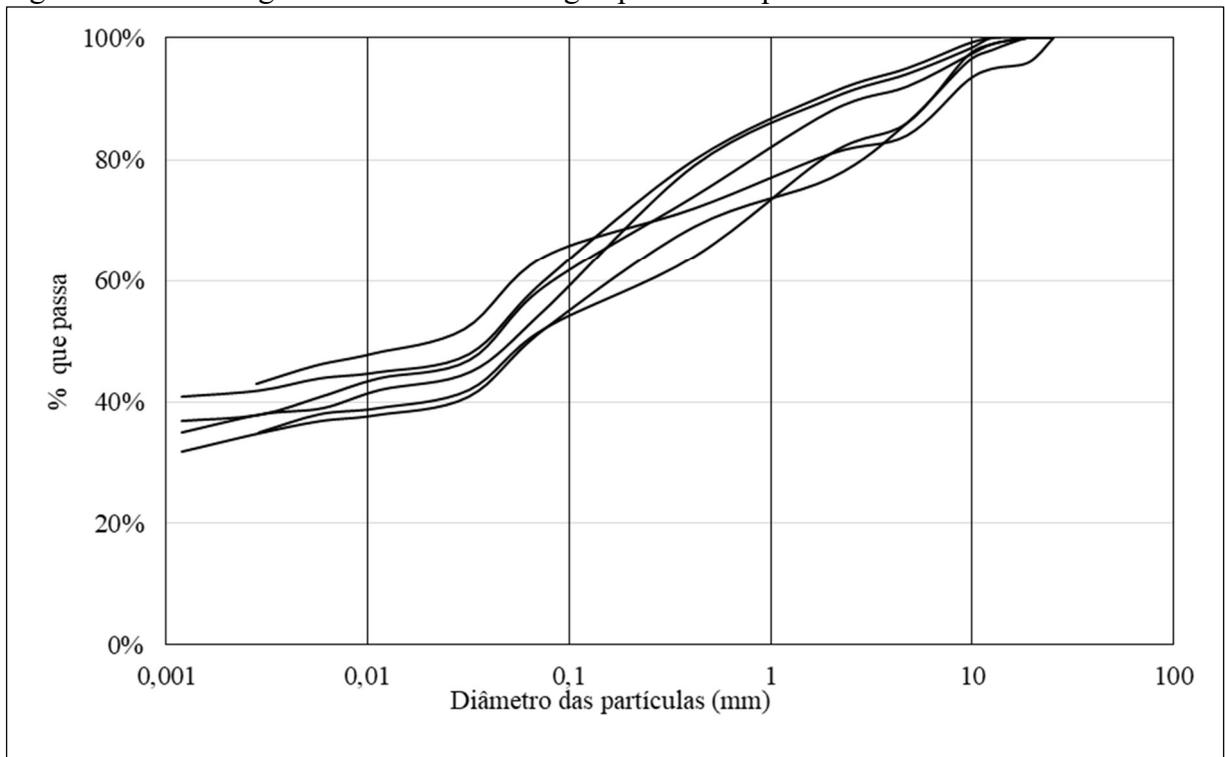
Para as análises granulométricas, escolheu-se selecionar as curvas de distribuição de partículas que representassem os limites granulométricos dos materiais. Neste caso, seriam definidas duas curvas granulométricas para cada solo base e filtro, uma para a distribuição mais fina e outra para a distribuição mais grossa dos materiais. Os dados granulométricos selecionados estão apresentados na Tabela 8 e suas curvas ilustradas na Figura 65.

Figura 62 – Curvas granulométricas de Benguê para solo tipo SM



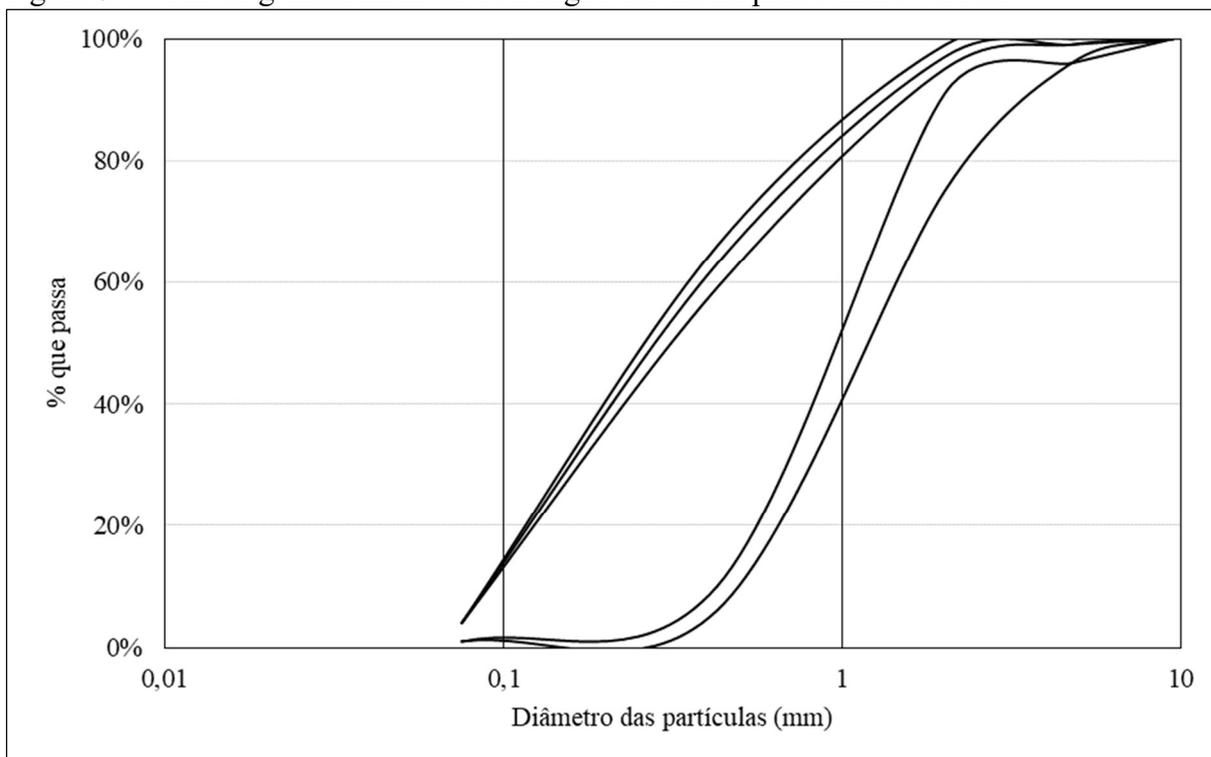
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 63 – Curvas granulométricas de Benguê para solo tipo ML



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 64 – Curvas granulométricas de Benguê das areias para o filtro vertical



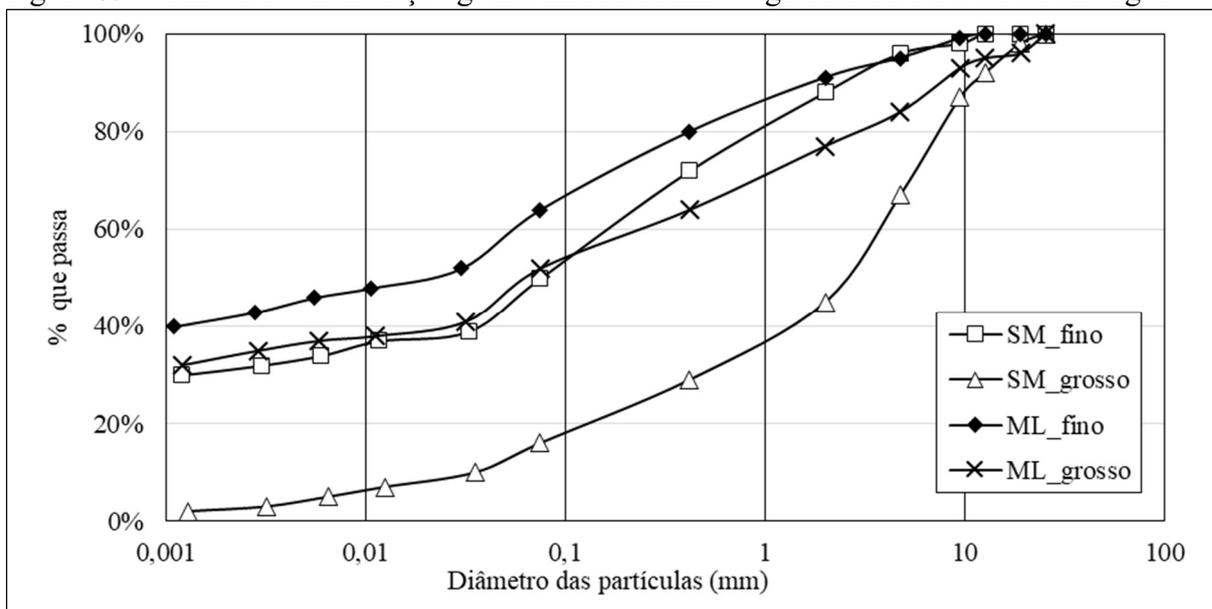
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Dados granulométricos selecionados para as análises do solo base de Benguê

SM_fino		SM_grosso		ML_fino		ML_grosso	
diâmetro (mm)	% que passa						
25,4	100%	25,4	100%	25,4	100%	25,4	100%
19,1	100%	19,1	98%	19,1	100%	19,1	96%
12,7	100%	12,7	92%	12,7	100%	12,7	95%
9,5	98%	9,5	87%	9,5	99%	9,5	93%
4,76	96%	4,76	67%	4,76	95%	4,76	84%
2	88%	2	45%	2	91%	2	77%
0,42	72%	0,42	29%	0,42	80%	0,42	64%
0,075	49%	0,075	16%	0,075	64%	0,075	52%
0,0329	39%	0,0355	10%	0,0301	52%	0,0318	41%
0,0116	37%	0,0125	7%	0,0107	48%	0,0112	38%
0,006	34%	0,0065	5%	0,0055	46%	0,0058	37%
0,003	32%	0,0032	3%	0,0028	43%	0,0029	35%
0,0012	30%	0,0013	2%	0,0011	40%	0,0012	32%

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 65 – Curvas de distribuição granulométricas finas e grossas do solo base de Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

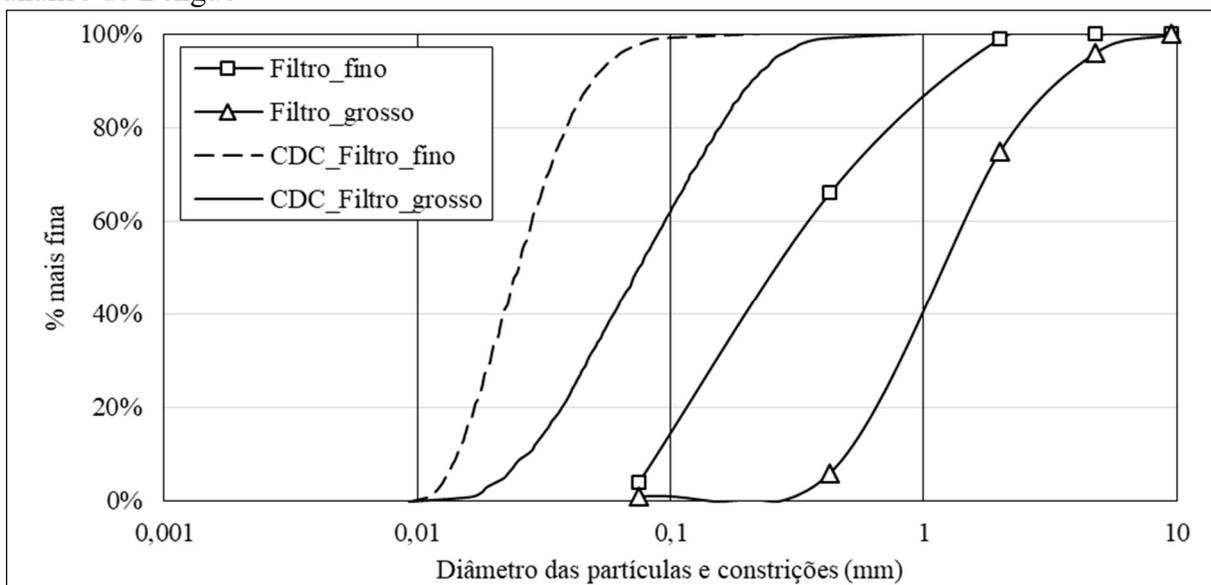
Para a determinação da distribuição das constrições internas das duas granulometrias do filtro selecionadas, foi adotado o valor de I_D de 70%, para representar o estado de compacidade real máximo de um filtro granular. Na Figura 66 são apresentadas as curvas de distribuição de partículas das areias selecionadas para representação dos limites granulométricos do filtro vertical e suas respectivas curvas de distribuição de constrições (CDC). O conjunto de dados das constrições obtidos estão disponíveis no Apêndice C. Os valores dos diâmetros de constrição de controle e autofiltração, dc_{35} e dc_{95} respectivamente, e o D_{15} estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de filtração das areias do filtro de Benguê

	Filtro_fino	Filtro_grosso
dc_{35}	0,021 mm	0,053 mm
dc_{95}	0,061 mm	0,260 mm
D_{15}	0,100 mm	0,560 mm

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 66 – Curva de distribuição de partículas e restrições das areias selecionadas para análise de Benguê

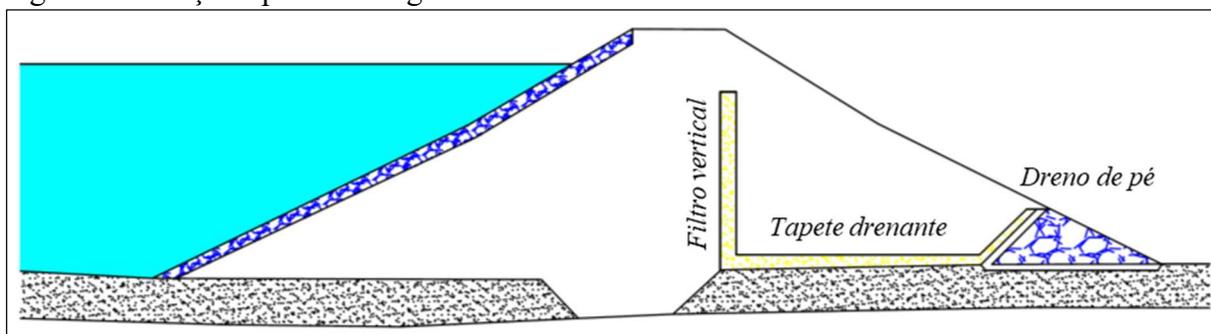


Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Barragem Itaúna

A barragem Itaúna, esquematizada na Figura 67, localiza-se na cidade de Granja, no noroeste do estado do Ceará, pertencente a bacia do Coreaú e barra o Riacho Timonha. O açude compreende uma capacidade de acumulação de 77,5 hm³ de água, com altura de seção máxima de 18 m e 436 m de extensão pelo coroamento. A barragem é do tipo homogênea e apresenta um filtro vertical a jusante do eixo central e um tapete drenante, ambos com 100 cm de espessura e um dreno de pé na saída a jusante (SRH, 1997).

Figura 67 – Seção tipo da barragem Itaúna



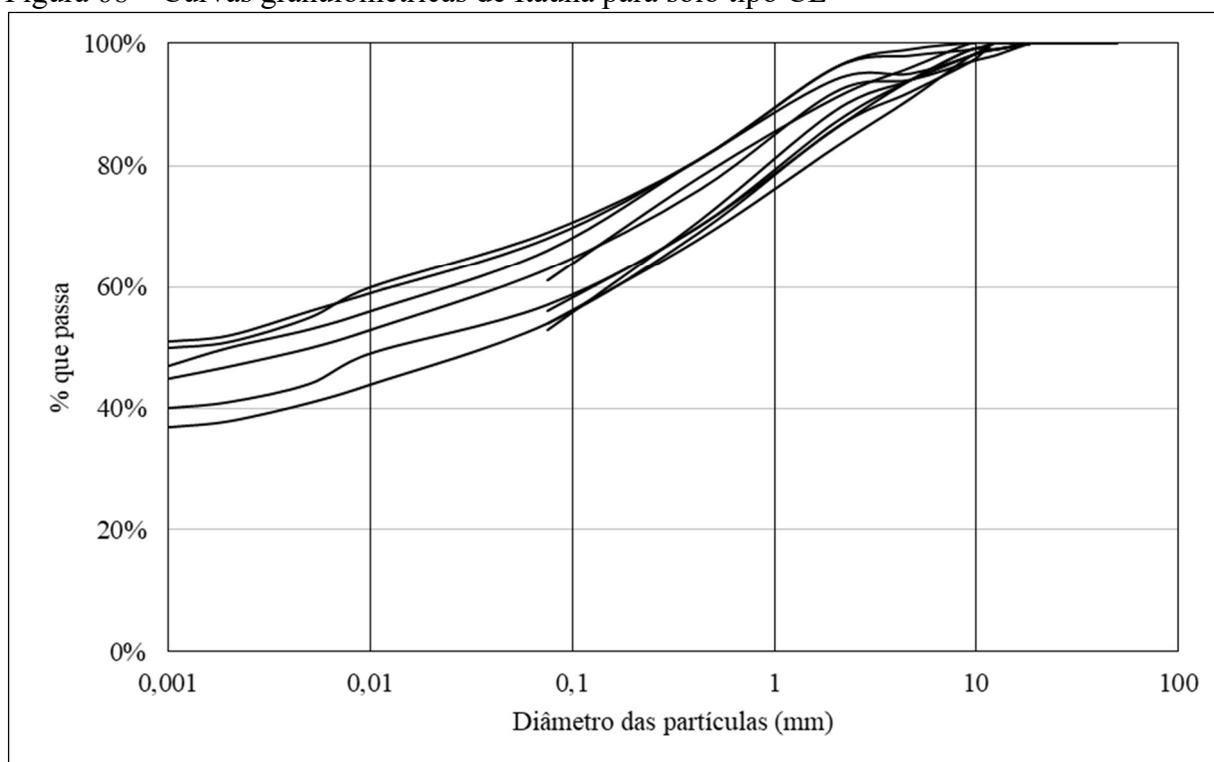
Fonte: Adaptado de SRH (1997)

5.3.1 Análise granulométrica

Os dados granulométricos dos materiais utilizados na construção do açude foram obtidos a partir da consulta no Relatório dos Estudos Básicos (SRH, 1997), fornecidos pela Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH) do Estado do Ceará. Estes dados estão disponíveis no Anexo C. O maciço é formado por solos do tipo CL (argila de baixa plasticidade), SM (areia siltosa) e SC (areia argilosa), todos misturados ao longo da seção. As curvas granulométricas dos materiais estão apresentadas a seguir, na Figura 68 as granulometrias do solo CL, na Figura 69 as granulometrias do solo SM, na Figura 70 as granulometrias do solo SC e, na Figura 71 as granulometrias das areias do filtro vertical.

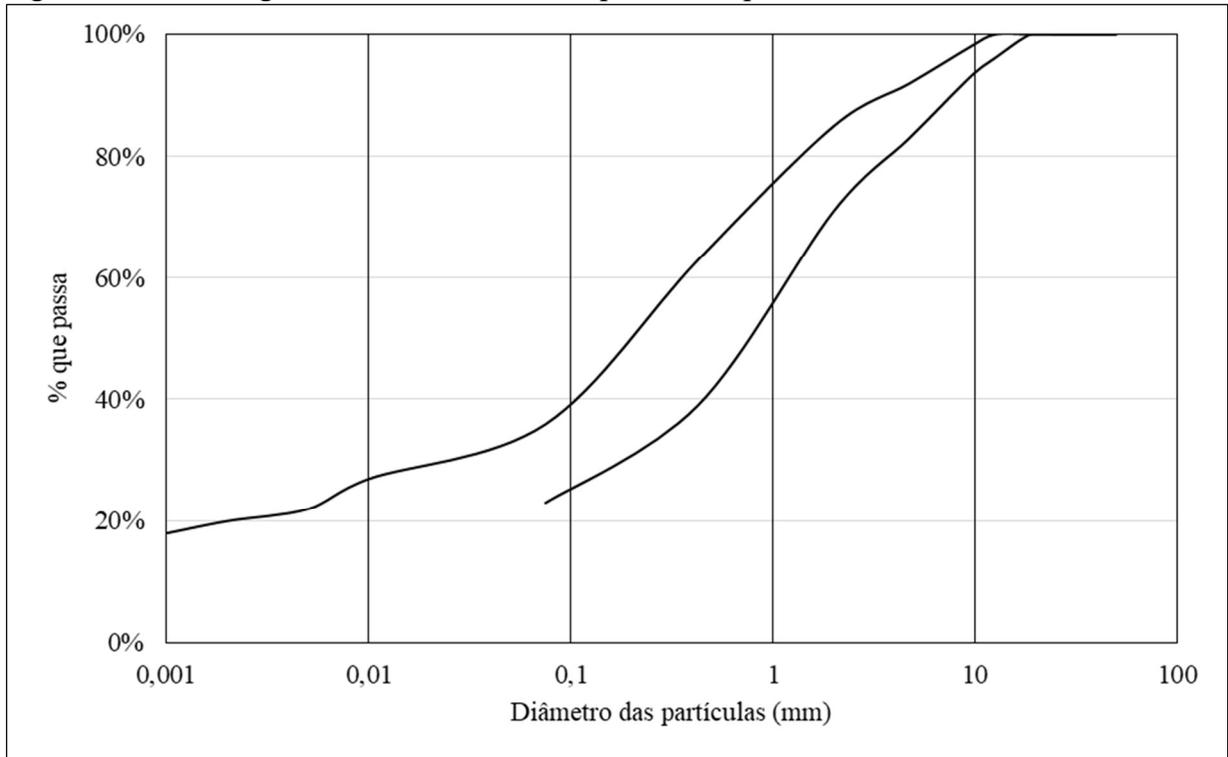
Para as análises granulométricas, escolheu-se selecionar as curvas de distribuição de partículas que representassem os limites granulométricos dos materiais. Neste caso, seriam definidas duas curvas granulométricas para cada solo base e filtro, uma para a distribuição mais fina e outra para a distribuição mais grossa dos materiais. Os dados granulométricos selecionados estão apresentados na Tabela 10 e suas curvas ilustradas na Figura 72.

Figura 68 – Curvas granulométricas de Itaúna para solo tipo CL



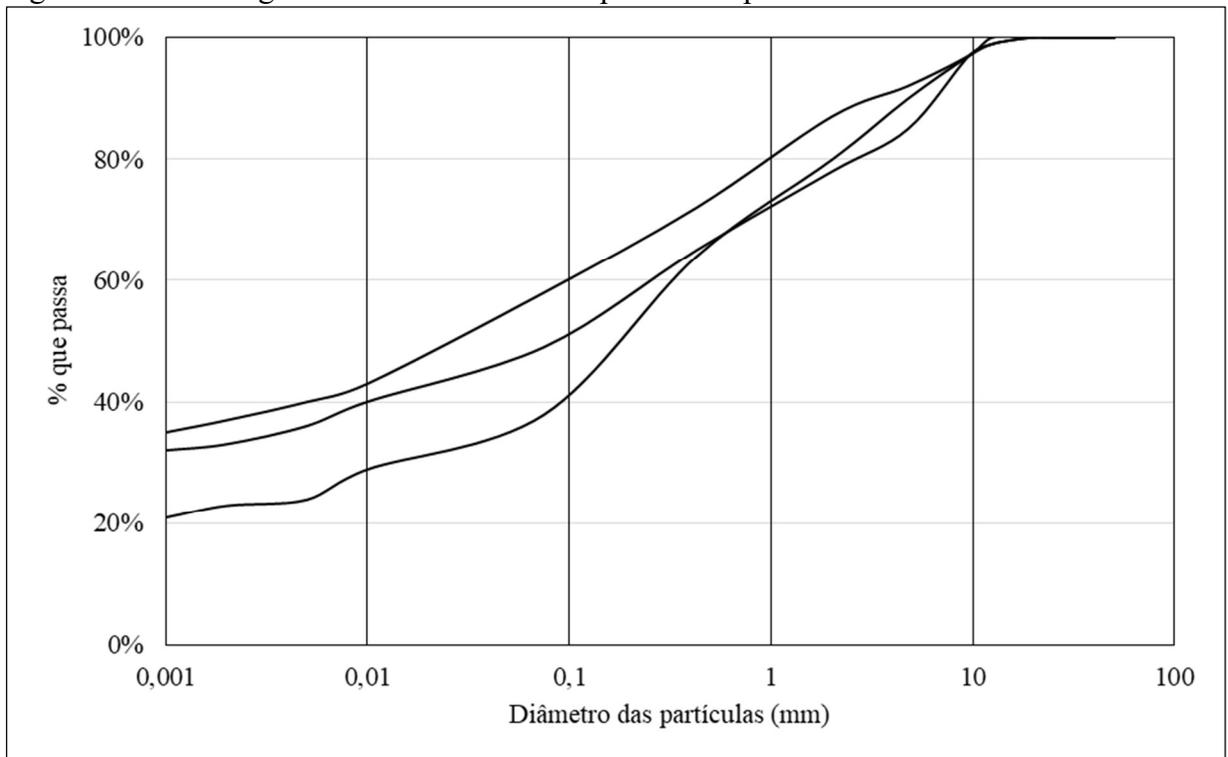
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 69 – Curvas granulométricas de Itaúna para solo tipo SM



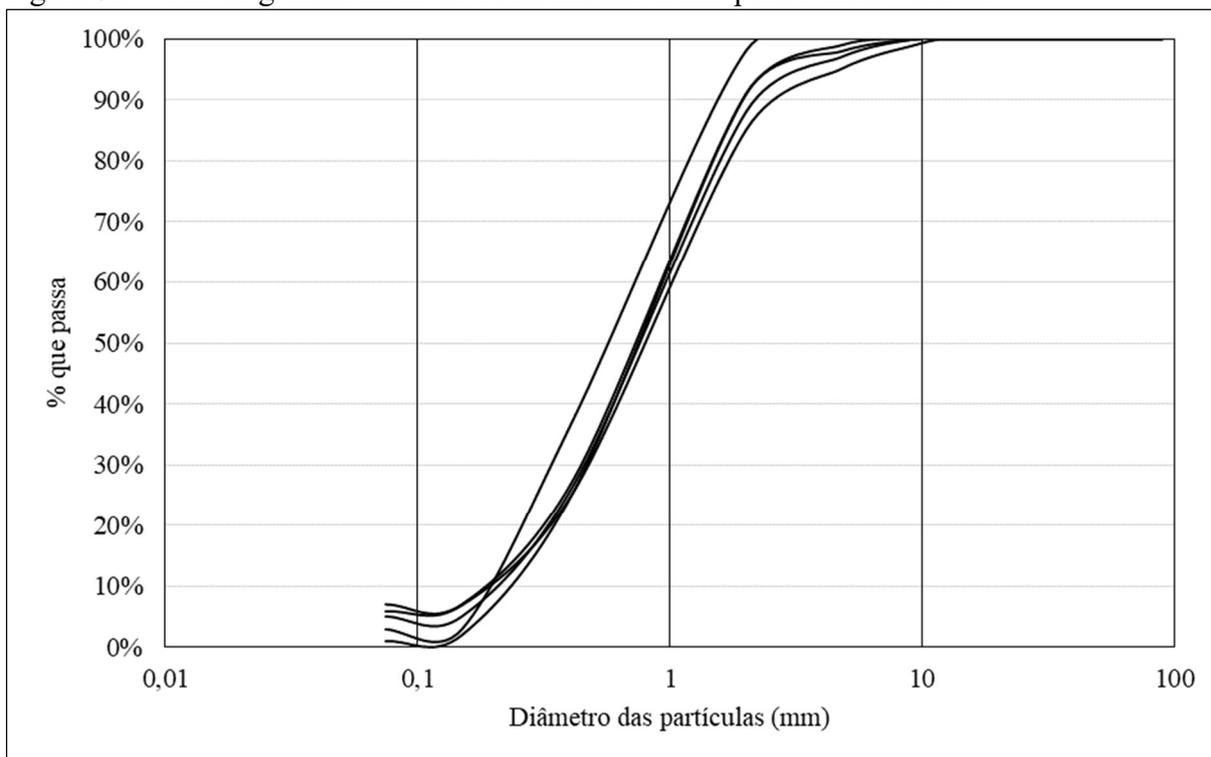
Fonte: elaborada pelo autor

Figura 70 – Curvas granulométricas de Itaúna para solo tipo SC



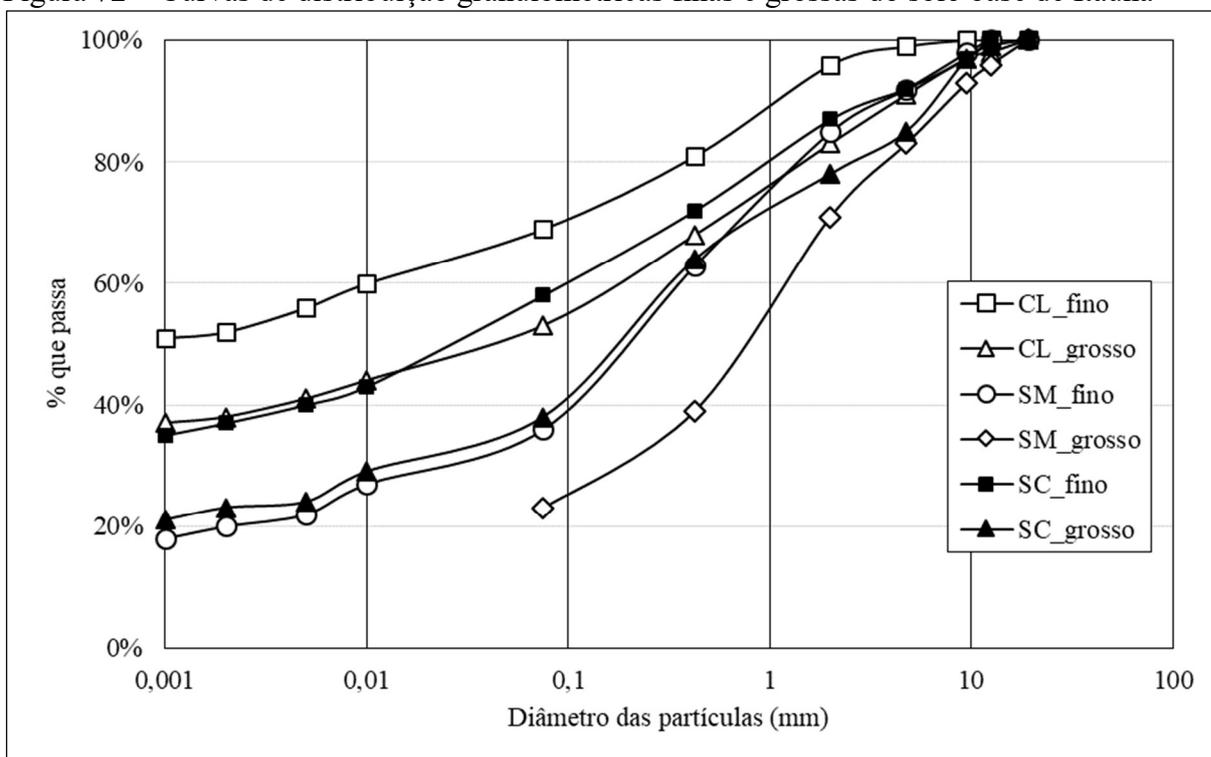
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 71 – Curvas granulométricas de Itaúna das areias para o filtro vertical



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 72 – Curvas de distribuição granulométricas finas e grossas do solo base de Itaúna



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 10 – Dados granulométricos selecionados para as análises do solo base de Itaúna

diâmetro (mm)	% que passa					
	CL_fino	CL_grosso	SM_fino	SM_grosso	SC_fino	SC_grosso
19	100%	100%	100%	100%	100%	100%
12,5	100%	98%	100%	96%	100%	99%
9,5	100%	97%	98%	93%	97%	97%
4,75	99%	91%	92%	83%	92%	85%
2	96%	83%	85%	71%	87%	78%
0,425	81%	68%	63%	39%	72%	64%
0,075	69%	53%	36%	23%	58%	38%
0,01	60%	44%	27%	-	43%	29%
0,005	56%	41%	22%	-	40%	24%
0,002	52%	38%	20%	-	37%	23%
0,001	51%	37%	18%	-	35%	21%

Fonte: elaborado pelo autor.

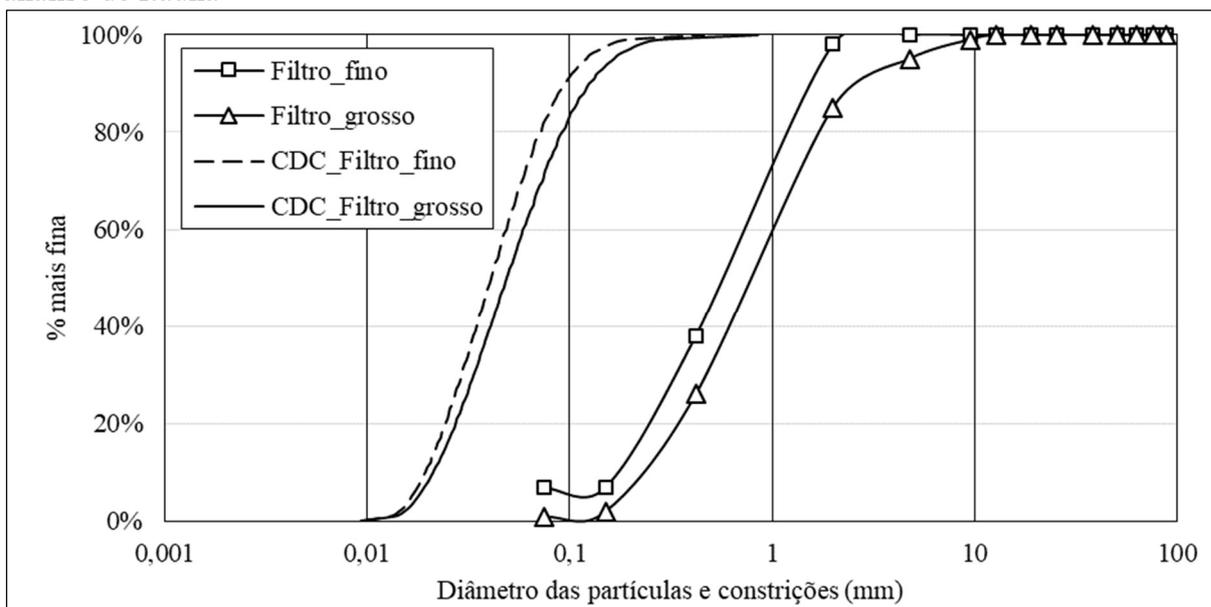
Para a determinação da distribuição das constrições internas das duas granulometrias do filtro selecionadas, foi adotado, novamente, o valor de I_D de 70%, para representar o estado de compactidade real máximo de um filtro granular. Na Figura 73 são apresentadas as curvas de distribuição de partículas das areias selecionadas para representação dos limites granulométricos do filtro vertical e suas respectivas curvas de distribuição de constrições (CDC). O conjunto de dados das constrições estão disponíveis no Apêndice D. Os valores dos diâmetros de constrição de controle e autofiltração, dc_{35} e dc_{95} respectivamente, e o D_{15} estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de filtração das areias do filtro de Itaúna

	Filtro_fino	Filtro_grosso
dc_{35}	0,032 mm	0,037 mm
dc_{95}	0,120 mm	0,164 mm
D_{15}	0,202 mm	0,280 mm

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 73 – Curva de distribuição de partículas e constrictões das areias selecionadas para análise de Itaúna



Fonte: elaborada pelo autor.

5.4 Resultados e discussões

Os resultados obtidos a partir das análises das granulometrias dos materiais utilizados na construção das barragens selecionadas neste estudo de caso serão discutidos nos itens a seguir em relação a três aspectos fundamentais: a instabilidade interna dos filtros granulares, a razão de eficiência da capacidade filtrante em função da granulometria do solo base e análise do comprimento de infiltração por meio dos modelos de estimativa de percurso de partículas erodidas.

5.4.1 Instabilidade interna dos filtros granulares

A instabilidade interna dos filtros granulares dos açudes selecionados foi avaliada por meio da aplicação do critério de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) que consiste em, inicialmente, definir, a partir da utilização do método de Kenney e Lau (1985), o ponto de separação P da curva granulométrica, correspondente ao menor valor da razão de H/F . Para tanto, é necessário primeiro usar o método de Kenney e Lau (1985) para $F \leq 30\%$ e definir o ponto de razão H/F mínima e separar a curva em uma fração fina e outra grossa, para enfim aplicar a relação de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015). Os resultados serão apresentados a seguir.

5.4.1.1 Barragem Benguê

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados da aplicação do método de Kenney e Lau (1985), para os pontos de $F \leq 30\%$, nas granulometrias selecionadas para representação das areias usadas no filtro vertical da barragem Benguê. Conforme pode ser observado, os pontos onde a razão H/F foi mínima correspondem a $F = 30\%$, em ambas as granulometrias Filtro_fino e Filtro_grosso. Portanto, o ponto de separação P das granulometrias será nos diâmetros correspondentes a 30% mais fino.

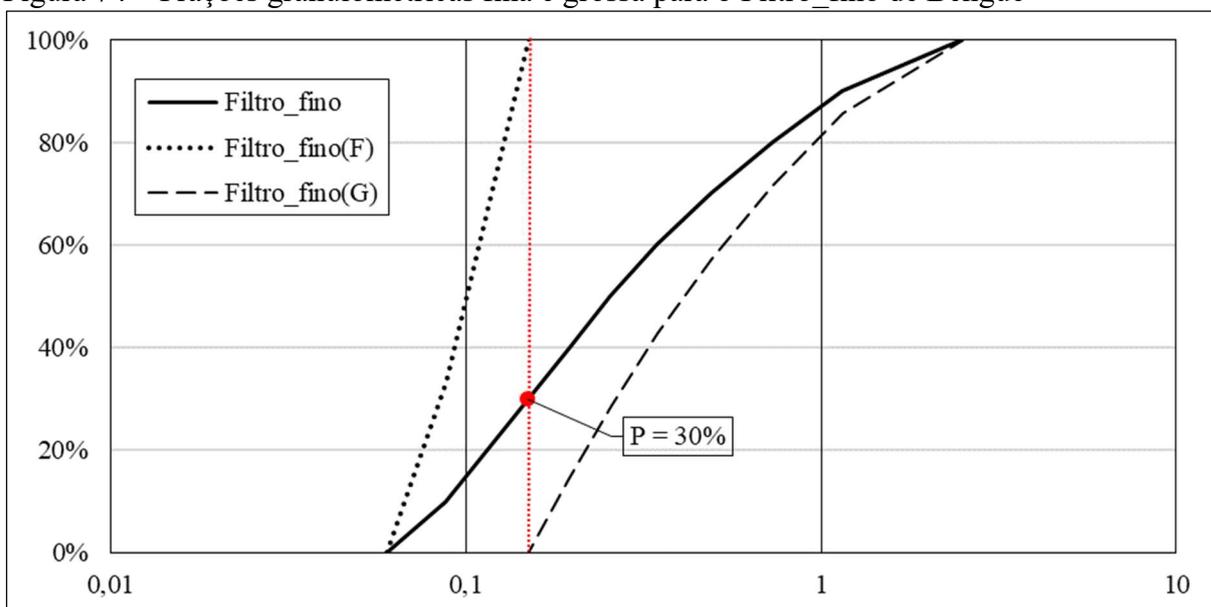
Tabela 12 – Resultado da aplicação do método de Kenney e Lau (1985) para $F \leq 30\%$ para a barragem Benguê

Filtro_fino					Filtro_grosso				
D	4D	F	H	H/F	D	4D	F	H	H/F
0,062	0,249	1%	48,04%	48,04	0,074	0,296	1%	6,60%	6,60
0,065	0,259	2%	48,40%	24,20	0,091	0,365	2%	6,60%	3,30
0,067	0,269	3%	48,69%	16,23	0,113	0,451	3%	6,60%	2,20
0,070	0,280	4%	48,97%	12,24	0,139	0,556	4%	10,73%	2,68
0,073	0,291	5%	49,26%	9,85	0,171	0,686	5%	18,10%	3,62
0,076	0,302	6%	49,54%	8,26	0,212	0,846	6%	26,76%	4,46
0,078	0,314	7%	49,82%	7,12	0,261	1,044	7%	36,12%	5,16
0,082	0,326	8%	50,11%	6,26	0,322	1,288	8%	45,73%	5,72
0,085	0,339	9%	50,39%	5,60	0,397	1,589	9%	55,72%	6,19
0,088	0,352	10%	50,57%	5,06	0,490	1,960	10%	63,78%	6,38
0,090	0,362	11%	50,34%	4,58	0,503	2,013	11%	63,72%	5,79
0,093	0,371	12%	50,10%	4,17	0,517	2,068	12%	63,65%	5,30
0,095	0,381	13%	49,86%	3,84	0,531	2,123	13%	63,59%	4,89
0,098	0,392	14%	49,62%	3,54	0,545	2,181	14%	63,53%	4,54
0,101	0,402	15%	49,39%	3,29	0,560	2,240	15%	63,47%	4,23
0,103	0,413	16%	49,15%	3,07	0,575	2,301	16%	63,40%	3,96
0,106	0,425	17%	48,91%	2,88	0,591	2,363	17%	63,27%	3,72
0,109	0,436	18%	48,67%	2,70	0,607	2,427	18%	63,01%	3,50
0,112	0,448	19%	48,44%	2,55	0,623	2,493	19%	62,75%	3,30
0,115	0,460	20%	48,20%	2,41	0,640	2,560	20%	62,48%	3,12
0,118	0,472	21%	47,96%	2,28	0,654	2,618	21%	62,10%	2,96
0,121	0,485	22%	47,71%	2,17	0,669	2,677	22%	61,72%	2,81
0,125	0,498	23%	47,41%	2,06	0,684	2,737	23%	61,33%	2,67
0,128	0,512	24%	47,08%	1,96	0,700	2,799	24%	60,95%	2,54
0,131	0,525	25%	46,75%	1,87	0,716	2,862	25%	60,57%	2,42
0,135	0,540	26%	46,41%	1,79	0,732	2,927	26%	60,18%	2,31
0,139	0,554	27%	46,08%	1,71	0,748	2,993	27%	59,80%	2,21
0,142	0,569	28%	45,75%	1,63	0,765	3,060	28%	59,42%	2,12
0,146	0,584	29%	45,41%	1,57	0,782	3,129	29%	59,03%	2,04
0,150	0,600	30%	45,08%	1,50	0,800	3,200	30%	58,65%	1,96

Fonte: elaborada pelo autor.

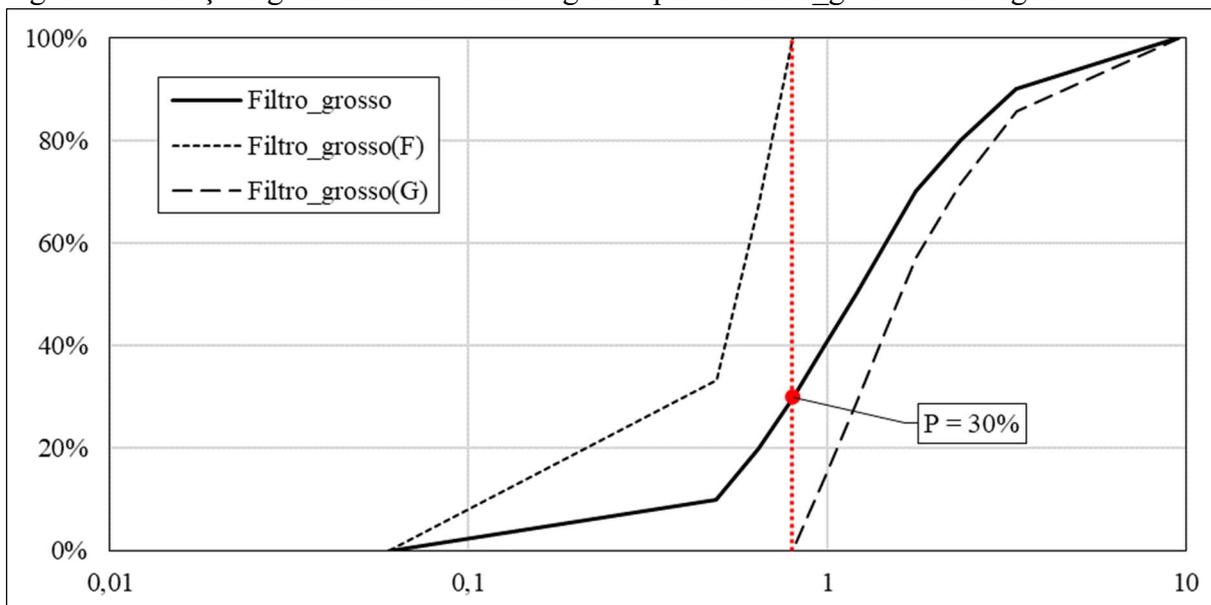
Na Figura 74 e Figura 75 são apresentadas as curvas granulométricas separadas entre frações finas (F) e frações grossas (G) a partir do ponto $P = 30\%$. As frações grossas foram analisadas como material filtrante das partículas das frações finas, segundo a relação de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015), dado na Equação (24). Para tanto, a distribuição das constrições internas das frações grossas foi determinada para um I_D de 70% e a curva das frações finas foram convertidas em função de sua área superficial. Os valores obtidos de dc_{35}^g e $d_{85,AS}^f$ para as granulometrias Filtro_fino e Filtro_grosso estão apresentados na Tabela 13.

Figura 74 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_fino de Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 75 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_grosso de Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 13 – Resultado da instabilidade interna do filtro doo açude Benguê

	dc_{35}^g	$d_{85,AS}^f$	$\frac{dc_{35}^g}{d_{85,AS}^f}$
Filtro_fino	0,044 mm	0,126 mm	0,349
Filtro_grosso	0,221 mm	0,665 mm	0,332

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se que a relação de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015) obtida nas análises de granulometria das areias utilizadas como filtro estão abaixo da unidade, Filtro_fino com 0,349 e Filtro_grosso com 0,332. Portanto, as granulometrias estão configuradas como adequadas, ou melhor, estáveis internamente, segundo o critério analítico e empírico de constrições internas. Observa-se também que em todos os pontos apresentados na Tabela 12, nenhum obteve uma relação H/F inferior a 1, portanto para o critério de Kenney e Lau (1985, 1986) a granulometria é estável internamente. Isto significa que a granulometria utilizada no filtro vertical da barragem de Benguê possui uma distribuição granulométrica capaz de evitar a perda de suas próprias partículas causadas pelo fluxo de água.

5.4.1.2 Barragem Itaúna

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados da aplicação do método de Kenney e Lau (1985), para os pontos de $F \leq 30\%$, nas granulometrias selecionadas para representação das areias usadas no filtro vertical da barragem Itaúna. Semelhante ao resultado da barragem Benguê, a razão H/F mínima foi obtida para $F = 30\%$, nas duas granulometrias selecionadas, o que torna o ponto P igual ao diâmetro correspondente a 30% mais fino.

Na Figura 76 e Figura 77 são apresentadas as curvas granulométricas separadas entre frações finas (F) e frações grossas (G) a partir do ponto $P = 30\%$. A distribuição das constrições internas das frações grossas foi determinada também para um I_D de 70% e a curva das frações finas foram convertidas em função de sua área superficial. A avaliação da instabilidade interna foi verificada por meio da relação de Indraratna, Israr e Rujikiatkamjorn (2015). Os resultados podem ser observados na Tabela 15. Como pode ser visto, a relação entre os diâmetros dc_{35}^g e $d_{85,AS}^f$ foram inferiores a unidade, o Filtro_fino com 0,391 e o Filtro_grosso com 0,397. Observa-se também que em todos os pontos apresentados na Tabela 14 nenhum obteve uma relação H/F inferior a 1, novamente, a granulometria é considerada estável internamente, segundo o critério de Kenney e Lau (1985, 1986). Neste caso, a granulometria

do filtro da barragem de Itaúna também apresenta uma distribuição de partículas internamente estável, segundo o critério analítico e empírico de restrições.

Tabela 14 – Resultado da aplicação do método de Kenney e Lau (1985) para $F \leq 30\%$ para a barragem Itaúna

Filtro_fino					Filtro_grosso				
D	4D	F	H	H/F	D	4D	F	H	H/F
0,067	0,266	1%	22,27%	22,27	0,069	0,275	1%	13,53%	13,53
0,074	0,296	2%	24,54%	12,27	0,078	0,314	2%	15,96%	7,98
0,082	0,328	3%	26,81%	8,94	0,090	0,359	3%	18,59%	6,20
0,091	0,364	4%	29,41%	7,35	0,103	0,411	4%	21,49%	5,37
0,101	0,404	5%	32,03%	6,41	0,117	0,470	5%	24,38%	4,88
0,112	0,448	6%	34,72%	5,79	0,134	0,537	6%	28,72%	4,79
0,124	0,498	7%	37,75%	5,39	0,154	0,615	7%	33,29%	4,76
0,138	0,552	8%	40,77%	5,10	0,176	0,703	8%	37,24%	4,66
0,153	0,613	9%	43,92%	4,88	0,201	0,804	9%	41,24%	4,58
0,170	0,680	10%	47,13%	4,71	0,230	0,920	10%	46,26%	4,63
0,176	0,704	11%	47,53%	4,32	0,239	0,957	11%	47,01%	4,27
0,182	0,729	12%	47,92%	3,99	0,249	0,995	12%	47,77%	3,98
0,189	0,754	13%	48,40%	3,72	0,259	1,034	13%	48,29%	3,71
0,195	0,781	14%	48,90%	3,49	0,269	1,076	14%	48,78%	3,48
0,202	0,808	15%	49,39%	3,29	0,280	1,119	15%	49,27%	3,28
0,209	0,836	16%	49,88%	3,12	0,291	1,163	16%	49,76%	3,11
0,216	0,866	17%	50,37%	2,96	0,302	1,210	17%	50,25%	2,96
0,224	0,896	18%	50,86%	2,83	0,314	1,258	18%	50,74%	2,82
0,232	0,927	19%	51,30%	2,70	0,327	1,308	19%	51,22%	2,70
0,240	0,960	20%	51,60%	2,58	0,340	1,360	20%	51,68%	2,58
0,248	0,991	21%	51,80%	2,47	0,352	1,408	21%	51,97%	2,47
0,256	1,023	22%	52,00%	2,36	0,364	1,457	22%	52,25%	2,38
0,264	1,056	23%	52,20%	2,27	0,377	1,508	23%	52,54%	2,28
0,273	1,090	24%	52,40%	2,18	0,390	1,561	24%	52,82%	2,20
0,281	1,126	25%	52,59%	2,10	0,404	1,616	25%	53,11%	2,12
0,291	1,162	26%	52,79%	2,03	0,418	1,673	26%	53,39%	2,05
0,300	1,200	27%	52,99%	1,96	0,433	1,731	27%	53,47%	1,98
0,310	1,239	28%	53,24%	1,90	0,448	1,792	28%	53,37%	1,91
0,320	1,279	29%	53,48%	1,84	0,464	1,855	29%	53,26%	1,84
0,330	1,320	30%	53,72%	1,79	0,480	1,920	30%	53,16%	1,77

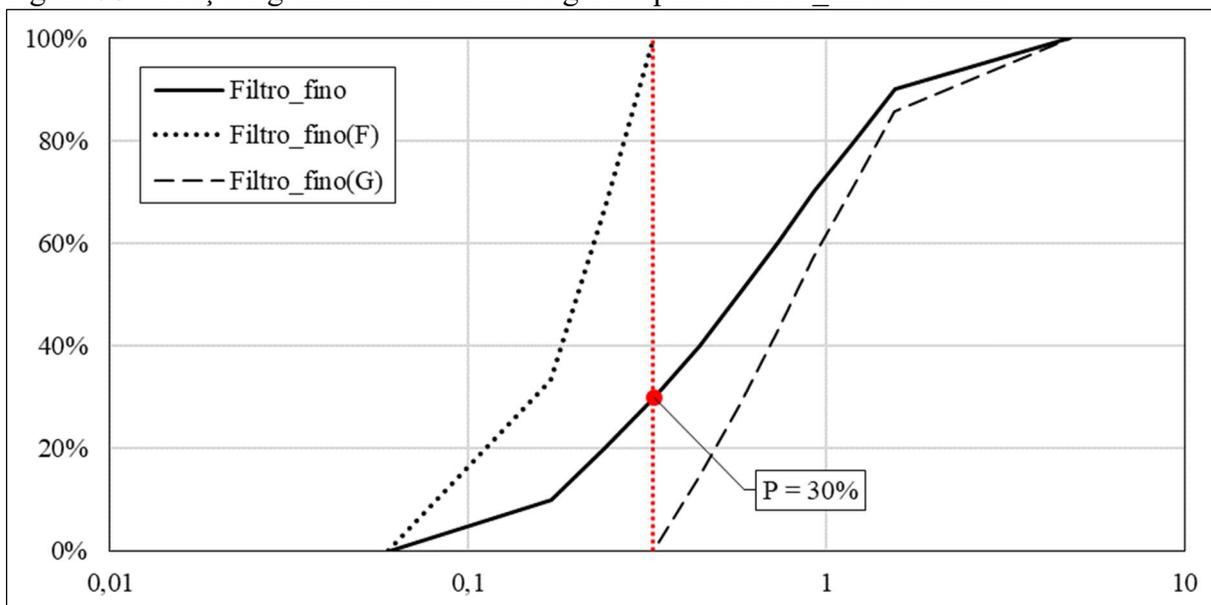
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Resultado da instabilidade interna do filtro doo açude Itaúna

	$d_{c_{35}}^g$	$d_{85,AS}^f$	$\frac{d_{c_{35}}^g}{d_{85,AS}^f} \leq 1$
Filtro_fino	0,100 mm	0,256 mm	0,391
Filtro_grosso	0,139 mm	0,350 mm	0,397

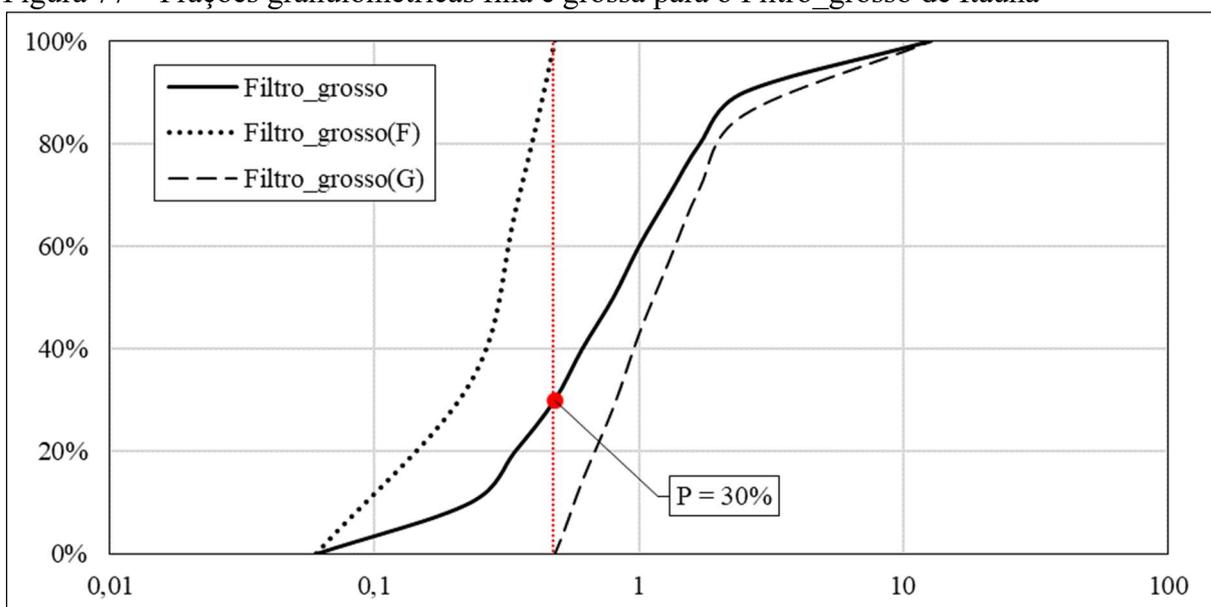
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 76 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_fino de Itaúna



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 77 – Frações granulométricas fina e grossa para o Filtro_grosso de Itaúna



Fonte: elaborada pelo autor.

5.4.2 Eficiência da capacidade filtrante

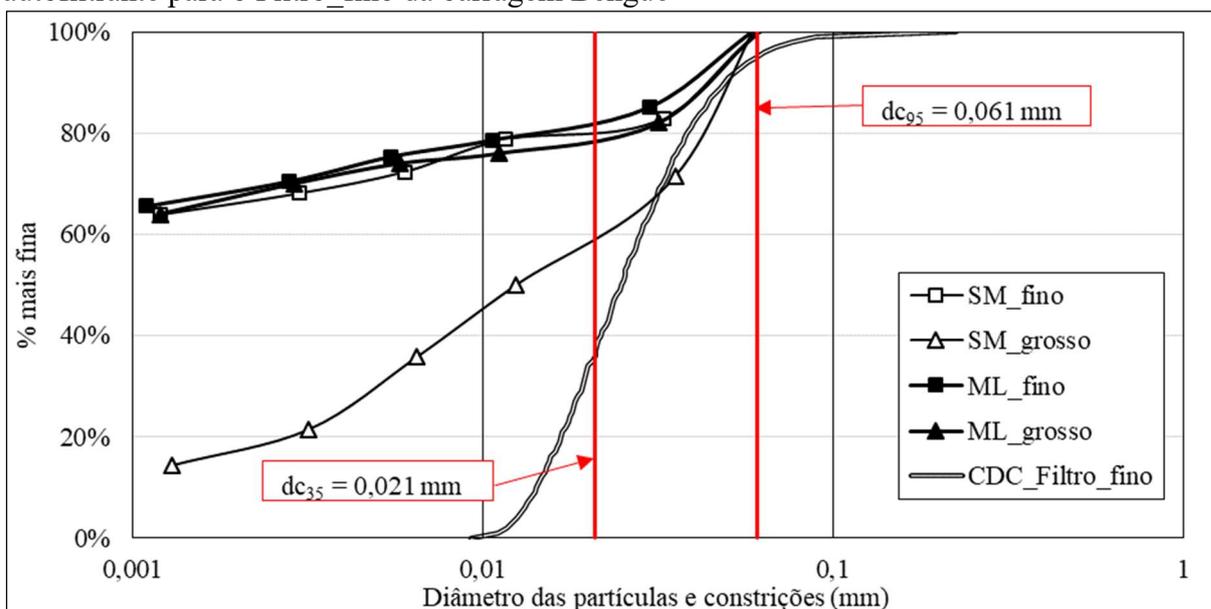
A avaliação da eficiência da capacidade filtrante dos filtros granulares das barragens selecionadas neste estudo foi realizada, aplicando-se o critério de Raut e Indraratna (2008), dado na Equação (23). Para tanto, as curvas granulométricas do solo base devem ser, inicialmente, ajustadas em função do parâmetro dc_{95} , o diâmetro da constrição autofiltrante, e, logo após, comparar o dc_{35} , diâmetro da constrição de controle, com o d^*_{85} do solo base

ajustado. Destaca-se também que foi realizado uma comparação entre o critério de constrição empregado e o critério de Terzaghi (TERZAGHI; PECK, 1962) e de NRCS (1994). Os resultados serão apresentados a seguir.

5.4.2.1 Barragem Benguê

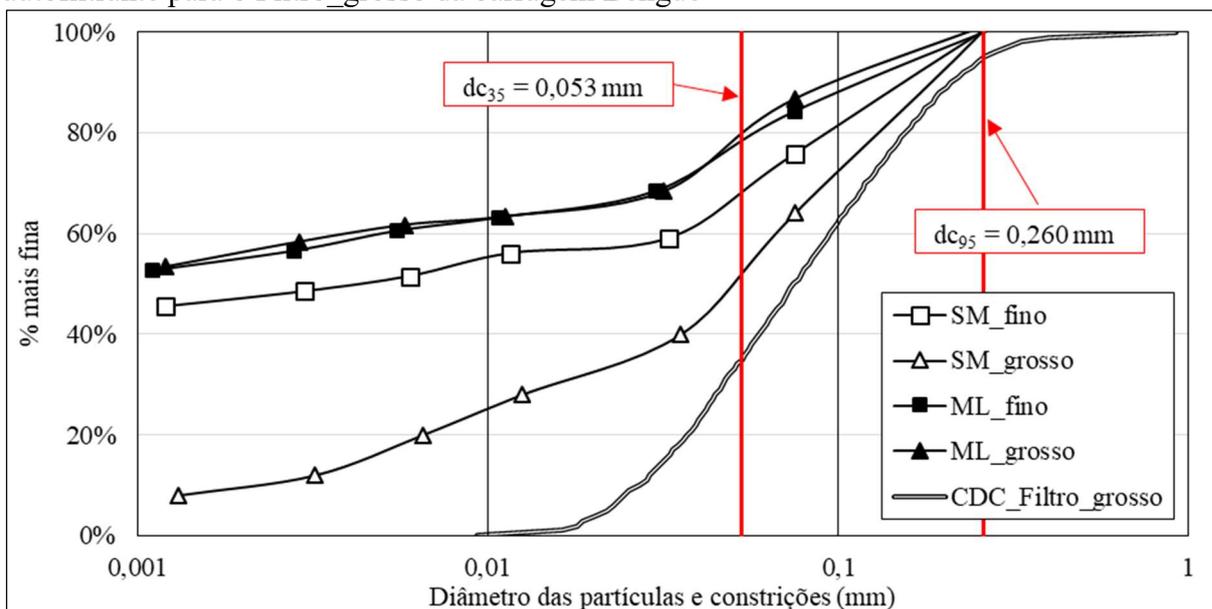
Na Figura 78 e Figura 79 estão apresentadas as curvas granulométricas dos solos bases ajustados em função do dc_{95} do Filtro_fino e Filtro_grosso, respectivamente. Numa primeira análise gráfica, pode-se perceber que dc_{35} corresponde a, no máximo, 80% dos grãos para as granulometrias selecionadas do solo base de Benguê. O que seria um indício de que a granulometria do filtro estaria adequada ao solo base do maciço da barragem. Os resultados da aplicação do critério de Raut e Indraratna (2008) são apresentados na Tabela 16. Percebe-se que nas combinações das granulometrias do filtro e do solo base, em nenhum deles a razão foi maior que um. O maior valor da razão encontrado foi 0,803, correspondente a análise N° 08 do Filtro_grosso com ML_grosso. Portanto, na análise de efetividade da capacidade dos filtros de paralisarem o transporte de partículas do solo base, o critério de Raut e Indraratna (2008) atestou que as granulometrias estão adequadas.

Figura 78 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_fino da barragem Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 79 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_grosso da barragem Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Resultados do critério de Raut e Indraratna (2008) do açude Benguê

Nº	Filtro	Solo base	dc_{35} (mm)	d^*_{85} (mm)	$\frac{dc_{35}}{d^*_{85}}$	Resultado
01	Filtro_fino	SM_fino	0,021	0,036	0,583	√
02	Filtro_fino	SM_grosso	0,021	0,046	0,457	√
03	Filtro_fino	ML_fino	0,021	0,030	0,700	√
04	Filtro_fino	ML_grosso	0,021	0,037	0,568	√
05	Filtro_grosso	SM_fino	0,053	0,120	0,442	√
06	Filtro_grosso	SM_grosso	0,053	0,150	0,353	√
07	Filtro_grosso	ML_fino	0,053	0,080	0,663	√
08	Filtro_grosso	ML_grosso	0,053	0,066	0,803	√

Nota: √ = eficaz.

Fonte: elaborada pelo autor.

Nas análises das granulometrias também foi verificado a eficiência do filtro granular em relação aos critérios de Terzaghi e NRCS (1994). Os resultados estão apresentados na Tabela 17. Conforme pode ser visto, a granulometria do filtro também foi atestada como adequada segundo os critérios empíricos de tamanho de partículas. Neste caso, as duas abordagens metodológicas, partículas e constrições, apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 17 – Resultados para os critérios de Terzaghi e NRCS (1994) de Benguê

Nº	Filtro	Solo base	D ₁₅ (mm)	d ₈₅ (mm)	$\frac{D_{15}}{d_{85}}$	NRCS (1994)	Resultado
						$\frac{D_{15max}}{d_{85}}$ (mm)	
01	Filtro_fino	SM_fino	0,100	1,5	0,067	0,7	√
02	Filtro_fino	SM_grosso	0,100	8,6	0,012	12,89	√
03	Filtro_fino	ML_fino	0,100	0,8	0,125	0,7	√
04	Filtro_fino	ML_grosso	0,100	5,1	0,020	0,7	√
05	Filtro_grosso	SM_fino	0,560	1,5	0,373	0,7	√
06	Filtro_grosso	SM_grosso	0,560	8,6	0,065	12,89	√
07	Filtro_grosso	ML_fino	0,560	0,8	0,700	0,7	√
08	Filtro_grosso	ML_grosso	0,560	5,1	0,110	0,7	√

Nota: √ = eficaz.

Fonte: elaborada pelo autor.

5.4.2.2 Barragem Itaúna

Na Figura 80 e Figura 81 estão apresentadas as curvas granulométricas ajustadas em função do dc_{95} do Filtro_fino e Filtro_grosso, respectivamente. Na análise gráfica, percebe-se que o tamanho de dc_{35} representa em torno de 75% dos grãos de SM_fino e SC_grosso, o que indica que a granulometria do filtro é adequada a estas duas curvas de solo base. Os resultados da avaliação da eficiência pelo critério de Raut e Indraratna (2008) estão apresentados na Tabela 18. Houve quatro combinações de granulometrias que não atenderam ao critério de constrição, que foram para os solos base do tipo CL e SC. Para a granulometria mais fina de CL, o Filtro_fino, que deveria ser a granulometria com maior eficiência de filtração por ser a distribuição mais fina do filtro, apresentou o maior valor na razão de 3,2. Quando comparado com a granulometria mais grossa de CL, a razão obtida foi de 1,231, ou seja, para toda a extensão granulométrica do solo CL, a granulometria mais fina do filtro torna-se ineficaz para controlar a erosão de suas partículas. Um ponto importante que deve ser destacado é a análise N° 08, entre o CL_grosso e Filtro_grosso, que atendeu ao critério, mesmo não sendo eficaz para o Filtro_fino (análise N° 02). Neste caso, entra a definição de dc_{95} , que determina o tamanho máximo da partícula que é capaz de entrar no interior do filtro. Para o Filtro_grosso, o dc_{95} vale 0,260 mm que é maior que o dc_{95} do Filtro_fino de 0,061 mm, portanto a granulometria mais grossa do filtro permite que partículas maiores entrem em seus poros, o que melhora o efeito progressivo da diminuição das constrições com a captura sua captura, tornando-o eficaz na análise realizada, segundo o critério de Raut e Indraratna (2008).

Figura 80 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_fino da barragem Itaúna

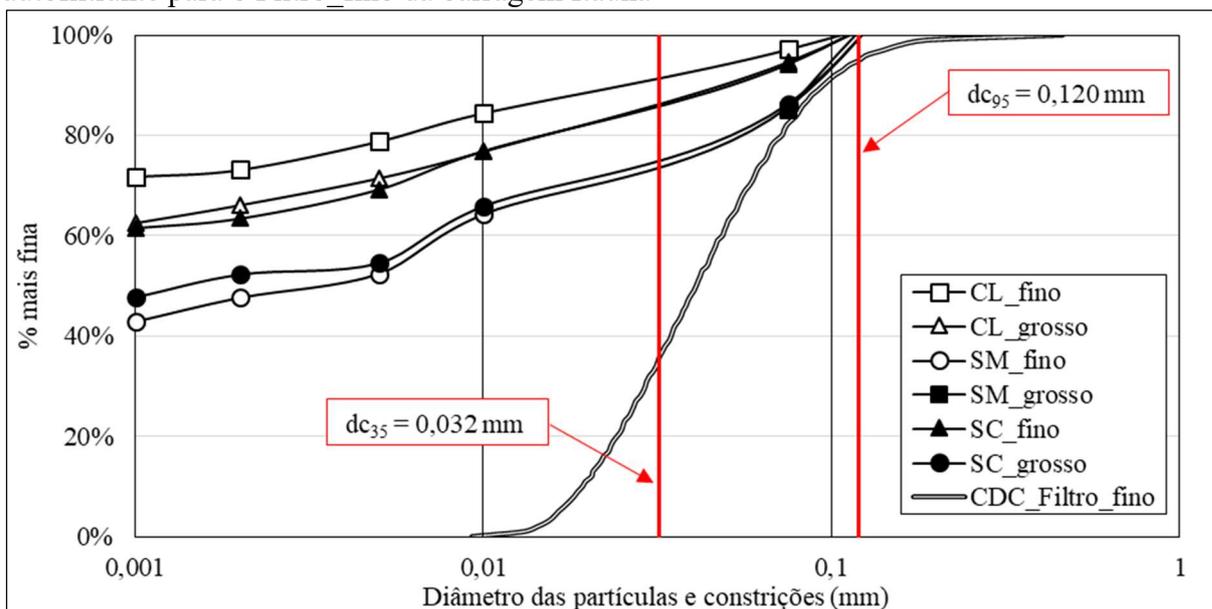
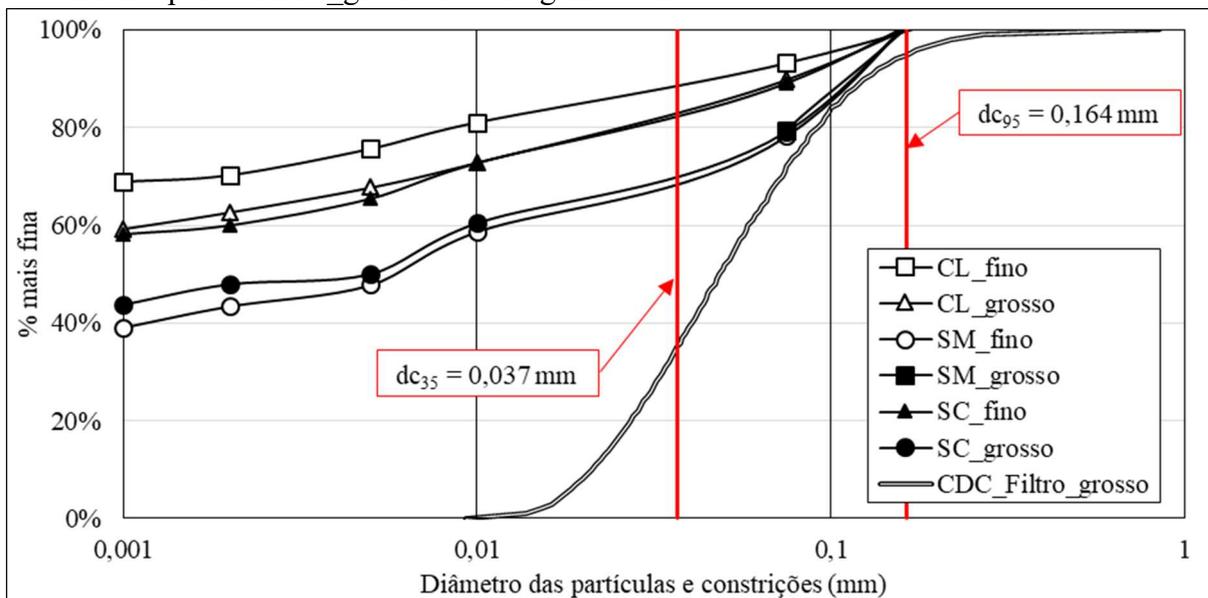


Figura 81 – Curvas granulométricas dos solos base ajustadas em função do diâmetro autofiltrante para o Filtro_grosso da barragem Itaúna



Em relação aos critérios de Terzaghi (TERZAGHI; PECK, 1962) e NRCS (1994), as análises realizadas apontaram que em nenhuma das combinações granulométricas houve uma situação de ineficácia da capacidade do filtro granular, conforme pode ser observado na Tabela 19. Nas análises N° 01, 02, 05 e 06, que foram atestadas como ineficazes pelo critério de Raut e Indraratna (2008), foram julgadas eficazes pelos dois critérios empíricos de partículas. Pela relação de Terzaghi, a razão de retenção mal se aproximava da unidade, todos bem inferiores a

quatro. Já o método do NRCS (1994) definiu um D_{15} de no mínimo igual a 0,700 mm, tendo as granulometrias do filtro o D_{15} de 0,202 mm e 0,280 mm, ou seja, dentro do recomendado. Portanto, percebe-se que houve divergências entre os critérios aplicados, os critérios empíricos de partículas definindo o filtro com granulometria eficiente, enquanto que o critério analítico e empírico de constricção definiu a granulometria ineficiente, principalmente para as granulometrias do solo base tipo CL.

Tabela 18 – Resultados do critério de Raut e Indraratna (2008) do açude Itaúna

Nº	Filtro	Solo base	d_{c35} (mm)	d^*_{85} (mm)	$\frac{d_{c35}}{d^*_{85}}$	Resultado
01	Filtro_fino	CL_fino	0,032	0,010	3,200	X
02	Filtro_fino	CL_grosso	0,032	0,026	1,231	X
03	Filtro_fino	SM_fino	0,032	0,074	0,432	√
04	Filtro_fino	SM_grosso	0,032	0,075	0,427	√
05	Filtro_fino	SC_fino	0,032	0,027	1,185	X
06	Filtro_fino	SC_grosso	0,032	0,072	0,444	√
07	Filtro_grosso	CL_fino	0,037	0,018	2,056	X
08	Filtro_grosso	CL_grosso	0,037	0,045	0,822	√
09	Filtro_grosso	SM_fino	0,037	0,100	0,370	√
10	Filtro_grosso	SM_grosso	0,037	0,090	0,411	√
11	Filtro_grosso	SC_fino	0,037	0,050	0,740	√
12	Filtro_grosso	SC_grosso	0,037	0,095	0,389	√

Nota: X = ineficaz; √ = eficaz.

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 19 – Resultados para os critérios de Terzaghi e NRCS (1994) de Itaúna

Nº	Filtro	Solo base	D_{15} (mm)	d_{85} (mm)	$\frac{D_{15}}{d_{85}}$	$\frac{NRCS(1994)}{D_{15max}}$ (mm)	Resultado
01	Filtro_fino	CL_fino	0,202	0,650	0,311	0,700	√
02	Filtro_fino	CL_grosso	0,202	2,500	0,081	0,700	√
03	Filtro_fino	SM_fino	0,202	2,000	0,101	1,360	√
04	Filtro_fino	SM_grosso	0,202	5,400	0,037	5,660	√
05	Filtro_fino	SC_fino	0,202	3,000	0,067	0,700	√
06	Filtro_fino	SC_grosso	0,202	4,700	0,043	0,950	√
07	Filtro_grosso	CL_fino	0,280	0,650	0,431	0,700	√
08	Filtro_grosso	CL_grosso	0,280	2,500	0,112	0,700	√
09	Filtro_grosso	SM_fino	0,280	2,000	0,140	1,360	√
10	Filtro_grosso	SM_grosso	0,280	5,400	0,052	5,660	√
11	Filtro_grosso	SC_fino	0,280	3,000	0,093	0,700	√
12	Filtro_grosso	SC_grosso	0,280	4,700	0,060	0,950	√

Nota: √ = eficaz.

Fonte: elaborada pelo autor.

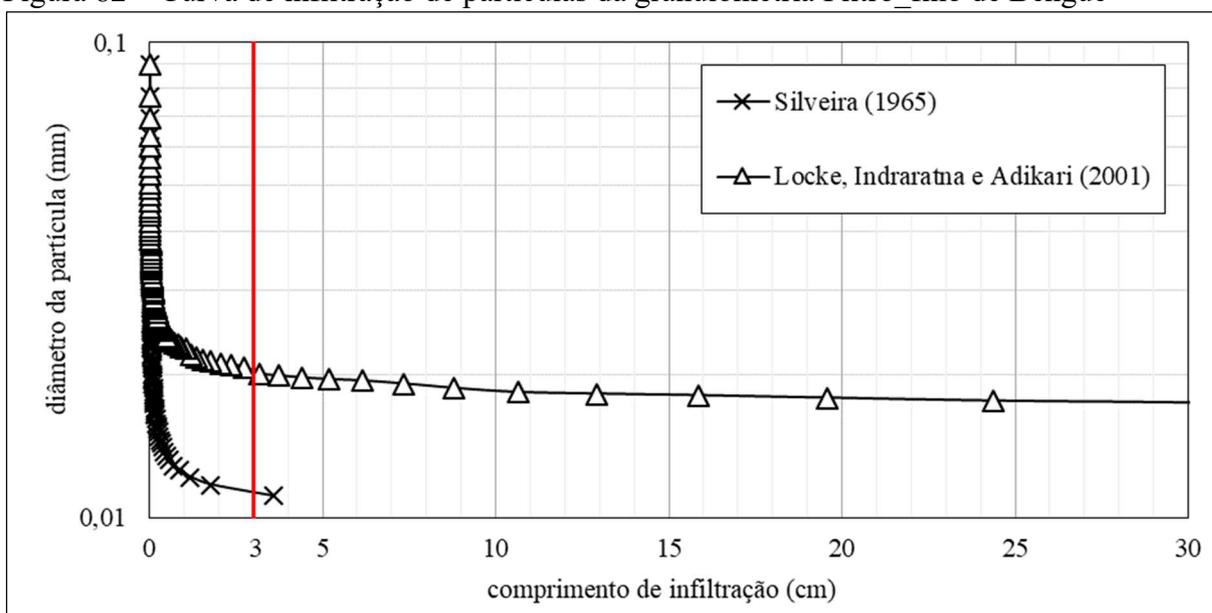
5.4.3 Análise do comprimento de infiltração

A análise do comprimento de infiltração das partículas erodidas foi realizado aplicando-se a abordagem analítica de estimativa de percurso de partículas, segundo o modelo simplificado de constrições de Silveira (1965) e o modelo de rede cúbico de poros de Locke, Indraratna e Adikari (2001), ambos considerando um nível de confiança N_c de 95%. Os resultados serão descritos a seguir.

5.4.3.1 Barragem Benguê

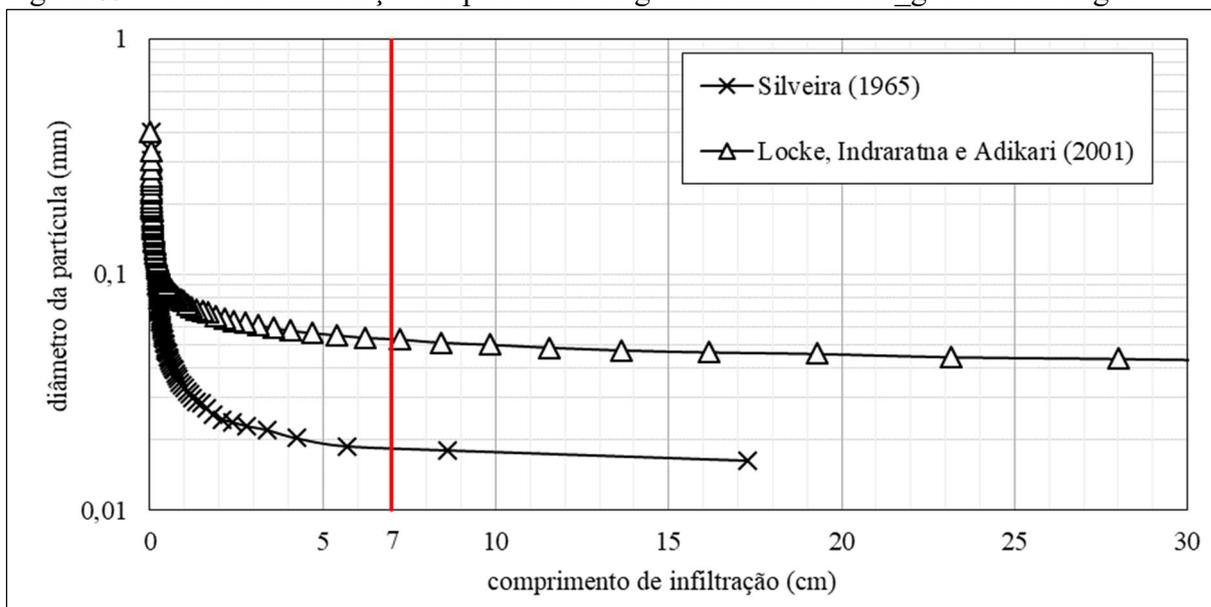
Na Figura 82 e Figura 83 estão apresentadas as curvas de infiltração de partículas para as granulometrias Filtro_fino e Filtro_grosso, respectivamente. Observa-se que, a partir de 3 cm para o Filtro_fino e 7 cm para o Filtro_grosso, o aumento na espessura do filtro já não melhora as condições filtrantes do material, segundo os modelos de estimativa de percurso de Silveira (1965) e Locke, Indraratna e Adikari (2001). Para a granulometria Filtro_fino, o modelo de Silveira (1965) estima a captura de grãos superiores a 0,011 mm, enquanto o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) estima a captura de grãos superiores a 0,021 mm para o comprimento de 3 cm. Para a granulometria Filtro_grosso, modelo de Silveira (1965) estima a captura de grãos superiores a 0,019 mm, enquanto o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) estima a captura de grãos superiores a 0,053 mm para o comprimento de 7 cm.

Figura 82 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_fino de Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 83 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_grosso de Benguê



Fonte: elaborada pelo autor.

Ao analisar as curvas granulométricas dos solos base ajustadas a partir do dc_{95} (Figura 78 e Figura 79), ou seja, somente a distribuição granulométrica das partículas que efetivamente podem adentrar o interior do filtro granular, pode-se ter uma noção da quantidade de partículas que o filtro tem capacidade de paralisar o eventual transporte e auxiliar no processo autofiltrante. Esses resultados estão apresentados na Tabela 20. O conceito ideal para uma análise de carreamento de partículas é limitar a quantidade de partículas a no mínimo 15% em massa, vindo esta recomendação desde o critério de Terzaghi com o d_{85} , ou seja, garantir que haja a captura mínima de 15% das partículas erodidas para um dimensionamento eficiente.

Tabela 20 – Porcentagem de partículas em massa que podem ser capturadas pelo filtro granular da barragem Benguê

Nº	Filtro	Solo base	Silveira (1965)	Locke, Indraratna e Adikari (2001)	Resultado
01	Filtro_fino	SM_fino	21%	20%	√
02	Filtro_fino	SM_grosso	53%	41%	√
03	Filtro_fino	ML_fino	21%	18%	√
04	Filtro_fino	ML_grosso	24%	21%	√
05	Filtro_grosso	SM_fino	43%	31%	√
06	Filtro_grosso	SM_grosso	68%	47%	√
07	Filtro_grosso	ML_fino	35%	22%	√
08	Filtro_grosso	ML_grosso	35%	20%	√

Nota: √ = eficaz.

Fonte: elaborada pelo autor.

Observa-se nos resultados da Tabela 20 que, em todas as combinações de granulometrias, a quantidade de partículas que podem ser capturadas pelo filtro granular são superiores a 15%, portanto a granulometria do filtro apresenta ser adequada aos solos bases utilizados, permitindo um processo autofiltrante eficaz e estabilizante do processo de carreamento, segundo os modelos de estimativa adotados. Verifica-se também que os mesmos resultados de eficácia foram obtidos nas análises de eficiência da capacidade filtrante, o que demonstra a correlação entre os métodos utilizados.

5.4.3.2 Barragem Itaúna

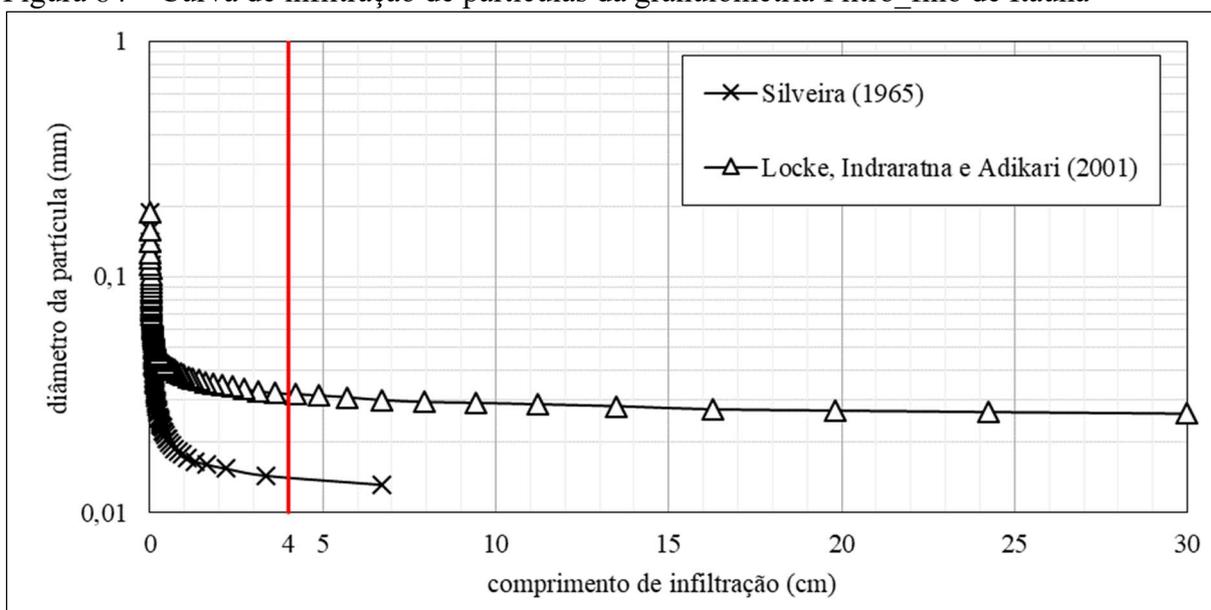
Na Figura 84 e Figura 85 estão apresentadas as curvas de infiltração de partículas para as granulometrias Filtro_fino e Filtro_grosso, respectivamente. Observa-se que, a partir de 4 cm para o Filtro_fino e 5 cm para o Filtro_grosso, o aumento na espessura do filtro já não melhora as condições filtrantes do material, segundo os modelos de estimativa de percurso de Silveira (1965) e Locke, Indraratna e Adikari (2001). Para a granulometria Filtro_fino, o modelo de Silveira (1965) estima a captura de grãos superiores a 0,014 mm, enquanto o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) estima a captura de grãos superiores a 0,032 mm para o comprimento de 4 cm. Para a granulometria Filtro_grosso, modelo de Silveira (1965) estima a captura de grãos superiores a 0,015 mm, enquanto o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) estima a captura de grãos superiores a 0,037 mm para o comprimento de 5 cm.

Em relação a quantidade de partículas que o filtro é capaz de capturar em seu interior e influenciar no processo de autofiltragem, algumas combinações de granulometrias apresentaram quantidade inferior a 15%, conforme pode ser visto na Tabela 21. Na análise de N° 01, combinação entre Filtro_fino e CL_fino, a quantidade de partículas determinada foi a menor, com 13% para o modelo de Silveira (1965) e 8% para o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001). Apesar de nas análises N° 02, 05 e 07 o modelo de Silveira (1965) apresentar uma quantidade de grãos superior a 15%, o modelo de Locke, Indraratna e Adikari (2001) mostrou o contrário. Nestes casos, julgou-se como granulometrias ineficazes, por considerar o modelo de rede cúbico de poros mais realista para análise de carreamento.

Ressalta-se que nas análises de N° 04 e 10 não foi possível determinar a quantidade de partículas a ser capturada pelo filtro granular, pois nos dados disponíveis no Relatório dos Estudos Básicos (SRH, 1997) não há os valores granulométricos de sedimentação. Com isso, durante o processo de ajuste granulométrico pelo d_{c95} , a curva de SM_grosso ficou limitada, não apresentando as porcentagens passante de partículas inferiores a 0,075 mm.

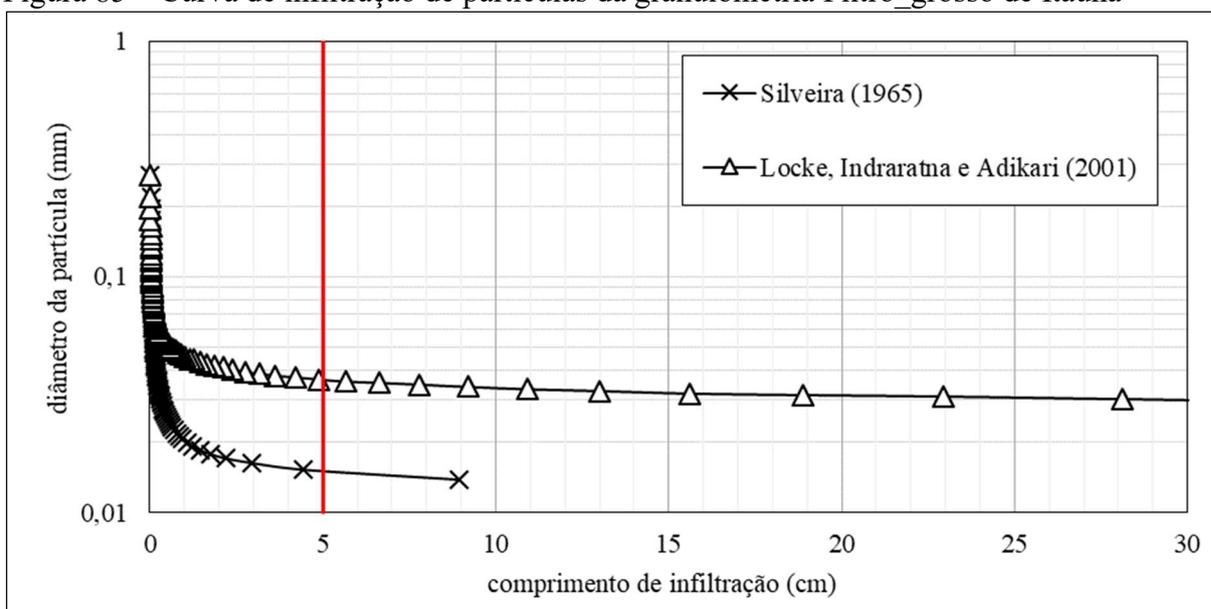
Percebe-se que as mesmas combinações que foram julgadas como ineficazes nesta análise também foram apontadas na análise de eficiência da capacidade filtrante. O que demonstra, novamente, a correlação das análises de carreamento com o critério de Raut e Indraratna (2008), do mesmo modo que ocorreu na barragem Benguê.

Figura 84 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_fino de Itaúna



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 85 – Curva de infiltração de partículas da granulometria Filtro_grosso de Itaúna



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Porcentagem de partículas em massa que podem ser capturadas pelo filtro granular da barragem Itaúna

Nº	Filtro	Solo base	Silveira (1965)	Locke, Indraratna e Adikari (2001)	Resultado
01	Filtro_fino	CL_fino	13%	8%	X
02	Filtro_fino	CL_grosso	20%	14%	X
03	Filtro_fino	SM_fino	33%	26%	√
04	Filtro_fino	SM_grosso	-	-	-
05	Filtro_fino	SC_fino	20%	14%	X
06	Filtro_fino	SC_grosso	31%	25%	√
07	Filtro_grosso	CL_fino	16%	11%	X
08	Filtro_grosso	CL_grosso	24%	17%	√
09	Filtro_grosso	SM_fino	38%	31%	√
10	Filtro_grosso	SM_grosso	-	-	-
11	Filtro_grosso	SC_fino	24%	18%	√
12	Filtro_grosso	SC_grosso	36%	30%	√

Nota: √ = eficaz; X = ineficaz.

Fonte: elaborada pelo autor.

5.4.4 Comparação dos resultados com o comportamento real das barragens

Ao analisar os Relatórios de Segurança de Barragens da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH do estado do Ceará dos anos de 2009 a 2015, percebe-se que a barragem Itaúna esteve sempre apresentando problemas relacionados a erosão interna, principalmente, relacionados a surgências de água no talude de jusante, além de afundamentos (*sinkhole*) observados no coroamento. Enquanto que a barragem Benguê, nenhuma anomalia observada correspondia a um problema de erosão interna causada por uma deficiência da granulometria do filtro. A maioria das anomalias observadas em Benguê foram sinais de fuga d'água ocorrendo na região a jusante da barragem, o que pode ser atribuído a problemas de erosão interna na interface do maciço compactado e fundação da barragem, onde deveria ter sido previsto uma transição para filtragem deste caminho preferencial.

Diante disso, percebe-se que os resultados obtidos a partir dos critérios baseados na distribuição de restrições foram mais realistas com o comportamento das barragens avaliados nos relatórios de segurança que os critérios baseados na distribuição de partículas. Portanto, a abordagem baseada na distribuição de restrição é o mais indicado para um dimensionamento ou uma avaliação de segurança de granulometria de um filtro granular mais realista e segura.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho obtidas a partir do estudo dos modelos experimentais analisados, da metodologia de determinação da distribuição das constrições proposta e da aplicação de uma metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna baseado na abordagem de distribuição de constrições internas do filtro granular. Serão também recomendados sugestões de pesquisas futuras para melhoria e continuação da pesquisa realizada.

6.1 Modelagem matemática de curvas de distribuição de constrições

A presente dissertação permitiu desenvolver uma proposta de metodologia para determinação das curvas de distribuição das constrições internas para filtros granulares. Nessa metodologia, foram adotados: o conceito da curva de distribuição de partículas em termos de área superficial dos grãos; a expressão simplificada de Musso e Federico (1982) para cálculo do diâmetro das constrições para o estado denso, em forma de uma equação de 2º grau; e a influência do índice de densidade I_D na formação das constrições.

A metodologia proposta foi comparada com os resultados da modelagem matemática apresentada em Raut (2006), no qual se obteve uma boa correlação entre as curvas de distribuição de constrições definidas. Apesar de a modelagem de Raut (2006) utilizar a equação para o cálculo do diâmetro da constrição de Silveira (1965) e a modelagem proposta neste trabalho utilizar a de Musso e Federico (1982), em forma de uma equação de 2º grau, houve uma pequena diferença entre os resultados dos diâmetros de constrições calculados.

Quando relacionado a uma curva de distribuição de constrição definida experimentalmente, o modelo proposto também apresentou uma boa aproximação da curva experimental, evidenciando a abordagem de Humes (1998), das frequências em áreas superficiais, como proposta mais realista para a análise de filtração que a de Silveira (1965) em massa.

6.2 Modelos experimentais

Em relação aos modelos experimentais desenvolvidos, foi apresentado todo o processo de concepção e dimensionamento dos materiais e construção. Foi utilizado no dimensionamento dos modelos as duas abordagens apresentadas neste trabalho, os métodos

baseados na distribuição de partículas e das constrições. No modelo da calha de percolação, percebeu-se, inicialmente, o problema de interface com o surgimento do fluxo preferencial, que foi corrigido com a utilização da cortina impermeável. Em relação ao carreamento de grãos, as granulometrias foram dimensionadas para evitar o transporte de grãos para fora do filtro, segundo os critérios do NRCS (1994) e Raut e Indraratna (2008). Nas observações realizadas na saída do dreno, não foi encontrado nenhum material carreado pelo fluxo, ao longo do período de operação do modelo. Isto demonstra que a combinação dos dois critérios foi adequada para previsão o comportamento do filtro.

Quando analisada a quantidade de partículas com possibilidade de serem capturadas pelas constrições internas do filtro, nota-se que o valor era superior a 50% em massa, valor julgado satisfatório para ação eficaz do efeito da autofiltração em reduzir progressivamente as constrições até a estabilidade da filtração. O resultado da análise de carreamento realizada foi coerente com o resultado experimental obtido.

Para o modelo experimental de barragem de terra, procurou-se dimensionar os materiais para que permitissem o carreamento de grãos do solo base. Para tanto, um processo de refinamento das granulometrias foi proposto, para atender o objetivo do modelo com os materiais disponíveis no LabSolos. Neste modelo, foi aplicado somente o critério de Raut e Indraratna (2008). O objetivo do dimensionamento foi atingido, havendo carreamento de solo com uma fração capturada pelo filtro. A granulometria da fração capturada foi analisada e comparada com os métodos analíticos de estimativa de infiltração de partículas, no qual verificou a correlação entre os seus resultados.

Em relação à quantidade de partículas com possibilidade de serem capturadas, para os modelos analíticos adotados, a porcentagem em massa dessas partículas foi na ordem de 11%. A porcentagem ideal, que vem desde o critério de Terzaghi, é garantir que pelo menos 15% em massa das partículas sejam retidas. O que não foi atendido na análise realizada. Neste caso, a aplicação do critério de Raut e Indraratna (2008) foi eficaz em prever o comportamento do modelo em verificar que granulometria do filtro permitiria o carreamento de partículas erodidas.

A granulometria do modelo experimental de barragem de terra foi avaliada também por dois critérios baseados na distribuição das partículas, o critério de Terzaghi e o NRCS (1994). Para o critério de retenção de Terzaghi, a razão obtida foi abaixo de 4, portanto, caracterizando a granulometria adequada. Para o critério de NRCS (1994), a granulometria do filtro possuía o D_{15} acima do recomendado, portanto, não adequado. Neste caso, o critério de

Terzaghi não foi satisfatório em prever o comportamento do filtro, recomendando-se não o utilizar, unicamente, para projetar filtros granulares.

6.3 Metodologia de avaliação de sistema de drenagem interna

Nesta dissertação, foi proposta uma metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna capaz de avaliar a granulometria do filtro em relação a capacidade filtrante e instabilidade interna, por meio de critérios baseados na distribuição de constrictões. A metodologia consistiu em selecionar as granulometrias dos materiais utilizados na construção de uma barragem que representem a distribuição granulométrica mais fina e mais grossa para cada tipo de solo classificado. A metodologia foi aplicada em duas barragens de terra do estado do Ceará: Benguê e Itaúna.

Na avaliação da barragem Benguê, os métodos baseados na distribuição das constrictões aplicados concluíram que a granulometria do filtro possui estabilidade interna e atende, adequadamente, a capacidade filtrante necessária para evitar a erosão dos solos bases utilizados. Segundo os critérios baseados na distribuição das partículas, utilizados para comparação entre os resultados, a granulometria do filtro foi apontada com capacidade filtrante eficaz. Dessa forma, as duas abordagens de métodos concluíram os mesmos resultados, eficácia da granulometria do filtro.

Na avaliação da barragem Itaúna, a granulometria do filtro foi atestada como estável internamente, entretanto a capacidade filtrante foi julgada como inadequada para evitar a erosão das partículas. Quando analisada por meio dos critérios baseados na distribuição de partículas, foi apontado que a granulometria do filtro era eficaz. Neste caso, houve uma discordância entre os resultados apresentados por meio das duas abordagens de critérios avaliados.

Quando comparados os resultados da aplicação da metodologia de avaliação do sistema de drenagem interna proposta com os relatórios de segurança de barragens, nota-se que a abordagem dos métodos baseados na distribuição de constrictões é mais realista, uma vez que apontou deficiência na granulometria do filtro de Itaúna que está sempre em situação de perigo, apresentando sempre surgências no talude de jusante.

Portanto, recomenda-se que a abordagem dos métodos baseados na distribuição das constrictões seja utilizada, pelo menos em conjunto, com os critérios usualmente utilizados baseados na distribuição das partículas, como o NRCS (1994) e ICOLD (1994). A confiança das análises pelas constrictões se torna mais adequada, uma vez que parâmetros como a

distribuição das contrações internas, a influência da gradação dos grãos e do estado de compactação são considerados como variáveis importantes na análise de filtração.

6.4 Sugestão para pesquisas futuras

Sugere-se para melhoria e continuação da pesquisa realizada na presente dissertação para futuros trabalhos baseados neste:

- a) Refinar a metodologia de determinação de Curvas de Distribuição das Condições - CDC internas em forma de um programa computacional capaz de definir os diâmetros de contração de controle (dc_{35}) e autofiltrante (dc_{95}), realizar o ajuste granulométrico dos solos bases em função de dc_{95} e aplicar o critério de Raut e Indraratna (2008) atestando a adequação ou não da granulometria do filtro granular;
- b) Reproduzir os modelos experimentais desenvolvidos para outros tipos de solo base e avaliar, novamente, as propostas de metodologias de dimensionamento baseadas na distribuição de partículas e contrações, submetendo-os a cargas hidráulicas mais elevadas;
- c) Reproduzir os modelos experimentais desenvolvidos substituindo o filtro granular por um filtro de geotêxtil para avaliar as metodologias de dimensionamento de tais estruturas;
- d) Aplicar a metodologia de avaliação de sistemas de drenagem interna para outras barragens de terra e correlacionar os resultados obtidos com o comportamento real apresentado por elas baseados em vistorias realizadas ou apresentadas em relatórios de segurança de barragens;
- e) Aplicar o conceito da distribuição de contrações internas de solos granulares para estimar a permeabilidade de solos uniformes e bem graduados, a partir de um diâmetro característico de contração;
- f) Desenvolver uma abordagem analítica de dimensionamento de filtros de geotêxtil para uma análise de carreamento de partículas capturadas;
- g) Desenvolver uma metodologia de análise de filtros granulares que considere a alteração da granulometria do filtro devido a captura progressiva de partículas erodidas ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182/2016: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- ARAUJO, A. A. F.. **Segurança geotécnica de filtros contra erosão interna em barragens de terra**. 2017. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, CE, 2017.
- ARAUJO, A. A. F. *et al.* Assessment of the efficiency and stability of drains according to the constriction size concept. *In: THIRD INTERNATIONAL DAM WORLD CONFERENCE*, 2018. Foz do Iguaçu. **Anais....** Foz do Iguaçu: DAM WORLD 2018, 2018.
- ARAUJO, A. A. F.; MALVEIRA, V. T. C; SOARES, A. B.. Eficiência e Estabilidade da Filtragem em Barragens de Terra. *In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO*, 2018. Salvador. **Anais....** Salvador: IX CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 2018.
- BARRERA, M. E. O.. **Correlaciones geométricas en suelos internamente inestables**. 2010. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile, 2010.
- SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS (SRH). **Projeto executivo da barragem Benguê**. Fortaleza, 1998.
- _____. **Projeto executivo da barragem Itaúna**. Fortaleza, 1997.
- COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2009**. 382 p. COGERH, Fortaleza, 2009.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2010**. 355 p. COGERH, Fortaleza, 2010.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2011**. 365 p. COGERH, Fortaleza, 2011.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2012**. 355 p. COGERH, Fortaleza, 2012.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2013**. 362 p. COGERH, Fortaleza, 2013.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2014**. 428 p. COGERH, Fortaleza, 2014.
- _____. **Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções 2015**. 423 p. COGERH, Fortaleza, 2015.
- CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 647p.

DE MELLO, F. B.. Some lessons learned from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil. *In: 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. II, 1975, Durban, S. Africa. **Anais...** Durban, 1975, p. 285-304.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). **Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion**. Interagency Committee on Dam Safety (ICODS). U.S. Department of Homeland Security. 2015.

FERREIRA, C. R. C. D. P.. **Desenvolvimento de um equipamento laboratorial para o estudo de problemas de percolação em modelo reduzido**. 2008. 110 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento Integrado em Engenharia Civil, Porto, Portugal.

FOSTER, M.; FELL, R.. Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE** v. 127, n. 5, p. 398–407, 2001.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents**. UNICIV. Report N°. R-374, 1998. The University of New South Wales, Sydney, Australia. 282 p. 1998.

HONJO, Y; VENEZIANO, D. Improved filter criterion for cohesionless soils. **Journal of Geotechnical Engineering - ASCE**, v. 115, n. 1, p. 75-94, 1989.

HUMES, C.. Um Novo Enfoque para a Determinação da Curva de Vazios de Filtros Granulares. 1998. *In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: COBRAMSEG, v. II, 1998, p. 983-991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). 2017. **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations**. Bulletin 164. Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment. 2017. 288 p.

INDRARATNA, B.; ISRAR, J.; RUJIKIATKAMJORN, C.. Geometrical Method for Evaluating the Internal Instability of Granular Filters Based on Constriction Size Distribution. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE**, v. 141, n. 10, 2015.

INDRARATNA, B.; VAFAI, F.. Analytical model for particle migration within base soil-filter system.. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE**, v. 123, n.2, p. 100–109, 1997.

LAFLEUR, J; MLYNAREK, J.; ROLLIN, A. L. Filtration of broadly graded cohesionless soils. **Journal of Geotechnical Engineering - ASCE**, v. 115, n. 12, p. 1747-1768, 1989.

LI, M.. **Seepage induced instability in widely graded soils**. 2008. 300 f. PhD thesis. The Faculty of Graduate Studies, Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2008.

LOCKE, M. R.. **Analytical and laboratory modelling of granular filters for embankment dams**. 2001. 334 f. PhD thesis. Faculty of Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2001.

LOCKE, M.; INDRARATNA, B.; ADIKARI, G.. Time-dependent particle transport through granular filters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** - ASCE, v. 127, n. 6, p. 521-529, 2001.

MOFFAT, R.. **A laboratory study of particle migration in cohesionless soils**. 2002. 119 p. Master thesis. The Faculty of Graduate Studies, Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2002.

MOFFAT, R.. **Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils**. 2005. 279 p. PhD thesis. The Faculty of Graduate Studies, Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2005.

MUSSO, A.; FEDERICO, F.. Un método geométrico-probabilístico per la verifica dei filtri.. **Rivista Italiana di Geotecnica**, v. XVII, n. 4, p. 177-193, 1983.

NGUYEN, V. T.; RUJIKIATKAMJORN, C.; INDRARATNA, B.. Analytical solutions for filtration process based on constriction size concept. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** - ASCE, v. 139, n. 7, p. 1049–1061, 2013.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICES (NRCS). **Gradation design of sand and gravel filters**. Part 633 National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture - USDA, Washington, DC, 1994.

PIMENTA FILHO, M. A.. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. 2013. 124 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnica e Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnica e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.

RAUT, A. K.. **Mathematical modelling of granular filters and constriction-based filter design criteria**. 2006. 229 f. PhD thesis. Department of Civil Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2006.

RAUT, A. K.; INDRARATNA, B.. Further Advancement in Filtration Criteria through Constriction-Based Techniques.. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** - ASCE, v. 134, n. 6, p. 883-887, 2008.

RIBEIRO, K. D.. **Distribuição de vazios determinada pela teoria geométrica probabilística e sua influência na caracterização físico-hídrica dos solos**. 2008. 171 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais

RÖNNQVIST, H.; VIKLANDER, P.. On the Kenney-Lau approach to internal stability evaluation of soils. **Geomaterials**, n. 4, p. 129-140, 2014.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P. Critical filters for impervious soils. **Journal of Geotechnical Engineering** - ASCE, v. 115, n. 7, p. 927-947, 1989.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R.. Basic properties of sand and gravel filters. **Journal of Geotechnical Engineering** – ASCE, v. 110, n. 6, p. 684-700, 1984a.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R.. Filters for silts and clays. **Journal of Geotechnical Engineering** – ASCE, v. 110, n. 6, p. 701-718, 1984b.

SILVEIRA, A.. An Analysis of the Problem of Washing Through in Protective Filters. In: 6th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 2, 1965, Montreal, Canada.
Anais... Montreal: ICSMFE, 1965, p. 551-555.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.. **Mecânica dos solos na prática da engenharia**. Tradução A. J. da Costa Nunes e M. de L. C. Campello. 1.ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.

UNITED STATE BUREAU OF RECLAMATION (USBR). 1963. **Earth manual**. First Edition, Revised. US Govt. Printing Office, Washington D.C., 751 p.

VAZQUEZ, M. A.. **Modelling Internal Erosion Within An Embankment Dam Prior To Breaching**. 2014. 52 p. Master Thesis, Master's Programme: Civil and Architectural Engineering, KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

**APÊNDICE A – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLOS UTILIZADOS NO
DESENVOLVIMENTO DO MODELO EXPERIMENTAL DE CALHA DE
PERCOLAÇÃO**

Tabela 22 – Ensaio de peneiramento do material Solo A1

Peneiras	(mm)	Massa retida (g)	Retida acumulada (g)	Passante (g)	% que passa
1/4"	6,3	2,2	2,2	487,1	100%
4	4,75	6,4	8,6	480,7	98%
10	2	37,8	46,4	442,9	91%
16	1,18	71	117,4	371,9	76%
30	0,6	82,1	199,5	289,8	59%
40	0,425	34,9	234,4	254,9	52%
50	0,3	40,5	274,9	214,4	44%
100	0,15	77,4	352,3	137	28%
200	0,075	65,5	417,8	71,5	15%
Massa total (g)		489,3			

Tabela 23 – Ensaio de limite de liquidez do material Solo A1

Cápsula	Massa da cápsula (g)	Massa da cápsula + solo úmido (g)	Massa da cápsula+ solo seco (g)	Nº de golpes	Massa do solo úmido (g)	Massa do solo seco (g)	Massa de água (g)	Umidade
10	10,9690	15,2394	14,1320	36	4,2704	3,1630	1,1074	35,01%
20	10,5580	14,4996	13,4190	16	3,9416	2,8610	1,0806	37,77%
46	10,2470	14,3864	13,3740	63	4,1394	3,1270	1,0124	32,38%
27	10,4923	14,3589	13,2820	13	3,8666	2,7897	1,0769	38,60%
LL	36%							

Tabela 24 – Ensaio de limite de plasticidade do material Solo A1

Capsula	Massa da capsula (g)	Massa da capsula + solo úmido (g)	Massa da capsula+ solo seco (g)	Massa do solo úmido (g)	Massa do solo seco (g)	Massa de água (g)	Umidade
97	10,5159	12,6417	12,1650	2,1258	1,6491	0,4767	28,91%
5	10,7056	11,8551	11,6160	1,1495	0,9104	0,2391	26,26%
24	10,4823	11,2716	11,1060	0,7893	0,6237	0,1656	26,55%
LP	36,41%						

Tabela 25 – Resultado do ensaio de compactação do material Solo A1

Pontos	Molde	Determinação da umidade de moldagem						Densidade específica aparente solo seco (kg/m ³)
	Massa bruta úmida (g)	Massa bruta úmida (g)	Massa bruta seca (g)	Massa da cápsula (g)	Massa de água (g)	Massa de solo seco (g)	Umidade	
01	9625,80	81,11	73,45	23,85	7,67	49,60	15%	1675,47
02	9795,90	83,05	75,40	32,26	7,65	43,15	18%	1714,31
03	9778,20	43,26	39,93	23,38	3,33	16,55	20%	1672,44
04	9693,10	47,55	43,07	23,14	4,48	19,93	22%	1606,44
ρ_d (kg/m³)	1720							
w_{ot}	18,30%							

Tabela 26 – Ensaio de peneiramento da Areia B1

Peneiras	(mm)	% que passa
1/4"	6,3	100,00%
4	4,75	99,98%
10	2	99,35%
16	1,18	76,96%
30	0,6	40,03%
40	0,425	24,30%
50	0,3	11,53%
100	0,15	2,33%
200	0,075	0,9%

Tabela 27 – Dimensionamento do filtro granular segundo o NRCS (1994)

Limite fino		Limite grosso	
% que passa	Diâmetro do grão (mm)	% que passa	Diâmetro do grão (mm)
0%	-	0%	3
5%	0,075	10%	5,33
10%	1,066	15%	6,4
15%	1,28	60%	26,65
60%	6,396	90%	30
100%	10	100%	75

Tabela 28 – Granulometria das britas

Brita 1			Brita 2		
Peneiras (mm)		% que passa	Peneiras (mm)		% que passa
1/2	12,5	100,0%	1/2	12,5	100,0%
3/8	9,5	9,0%	3/8	9,5	100,0%
4	4,75	0,0%	4	4,75	91,4%

Tabela 29 – Determinação da distribuição de restrições da Areia B1 “contínua”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
0	0%	0,009	0,026	0,009
1	1%	0,014	0,047	0,014
2	2%	0,016	0,052	0,016
3	3%	0,017	0,056	0,017
4	4%	0,018	0,059	0,018
5	5%	0,018	0,061	0,019
6	6%	0,019	0,064	0,020
7	7%	0,020	0,066	0,021
8	8%	0,020	0,069	0,021
9	9%	0,021	0,070	0,022
10	10%	0,021	0,072	0,023
11	11%	0,022	0,074	0,024
12	12%	0,023	0,076	0,024
13	13%	0,023	0,078	0,025
14	14%	0,024	0,079	0,026
15	15%	0,024	0,082	0,027
16	16%	0,025	0,082	0,027
17	17%	0,025	0,084	0,028
18	18%	0,026	0,085	0,029
19	19%	0,026	0,087	0,030
20	20%	0,027	0,088	0,030
21	21%	0,027	0,089	0,031
22	22%	0,028	0,092	0,032
23	23%	0,028	0,092	0,033
24	24%	0,028	0,094	0,033
25	25%	0,029	0,096	0,034
26	26%	0,029	0,097	0,035
27	27%	0,030	0,099	0,035
28	28%	0,030	0,100	0,036
29	29%	0,031	0,101	0,037
30	30%	0,031	0,103	0,038
31	31%	0,031	0,105	0,038
32	32%	0,032	0,106	0,039
33	33%	0,032	0,107	0,040
34	34%	0,033	0,109	0,041
35	35%	0,033	0,111	0,041
36	36%	0,034	0,111	0,042
37	37%	0,035	0,113	0,043
38	38%	0,035	0,115	0,044
39	39%	0,035	0,116	0,044
40	40%	0,036	0,118	0,046
41	41%	0,036	0,118	0,046
42	42%	0,037	0,121	0,047
43	43%	0,037	0,123	0,048
44	44%	0,038	0,123	0,049
45	45%	0,038	0,124	0,050
46	46%	0,039	0,126	0,051
47	47%	0,039	0,129	0,052
48	48%	0,040	0,130	0,053
49	49%	0,041	0,131	0,054
50	50%	0,041	0,132	0,055
51	51%	0,042	0,136	0,056
52	52%	0,043	0,137	0,057
53	53%	0,043	0,138	0,058

Tabela 29 – Determinação da distribuição de restrições da Areia B1 “conclusão”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
54	54%	0,044	0,139	0,059
55	55%	0,045	0,140	0,061
56	56%	0,045	0,144	0,062
57	57%	0,046	0,145	0,063
58	58%	0,046	0,147	0,064
59	59%	0,048	0,148	0,066
60	60%	0,049	0,150	0,067
61	61%	0,049	0,152	0,068
62	62%	0,051	0,153	0,070
63	63%	0,051	0,155	0,071
64	64%	0,052	0,159	0,072
65	65%	0,052	0,160	0,073
66	66%	0,054	0,161	0,075
67	67%	0,055	0,164	0,077
68	68%	0,055	0,166	0,078
69	69%	0,058	0,170	0,081
70	70%	0,058	0,170	0,081
71	71%	0,059	0,173	0,083
72	72%	0,061	0,175	0,086
73	73%	0,062	0,179	0,087
74	74%	0,062	0,180	0,088
75	75%	0,063	0,182	0,090
76	76%	0,066	0,186	0,093
77	77%	0,066	0,189	0,095
78	78%	0,067	0,191	0,096
79	79%	0,071	0,194	0,100
80	80%	0,071	0,195	0,101
81	81%	0,072	0,201	0,103
82	82%	0,072	0,203	0,105
83	83%	0,077	0,206	0,109
84	84%	0,077	0,209	0,110
85	85%	0,077	0,216	0,113
86	86%	0,078	0,219	0,115
87	87%	0,083	0,222	0,120
88	88%	0,084	0,228	0,122
89	89%	0,085	0,232	0,124
90	90%	0,091	0,239	0,131
91	91%	0,091	0,245	0,133
92	92%	0,092	0,250	0,136
93	93%	0,099	0,261	0,144
94	94%	0,100	0,266	0,147
95	95%	0,109	0,276	0,156
96	96%	0,110	0,288	0,161
97	97%	0,120	0,303	0,173
98	98%	0,121	0,323	0,181
99	99%	0,134	0,351	0,199
100	100%	0,172	0,557	0,288

**APÊNDICE B – DADOS GRANULOMÉTRICOS DOS SOLOS UTILIZADOS NO
MODELO EXPERIMENTAL DE BARRAGEM DE TERRA**

Tabela 30 – Granulometria dos solos utilizados no modelo

Peneira	(mm)	% que passa		
		Solo A2	Solo A3	Areia B2
10	2	100%	100%	100%
16	1,18	100%	91%	80%
30	0,6	96%	73%	35%
40	0,425	81%	64%	17%
50	0,3	54%	63%	9%
100	0,15	23%	44%	4%
200	0,075	17%	31%	4%

Tabela 31 – Granulometria ajustada do Solo A3'

Peneira	(mm)	% que passa
30	0,6	100%
40	0,425	91%
50	0,3	81%
100	0,15	61%
200	0,075	43%

Tabela 32 – Granulometria das areias ajustadas

% que passa	Diâmetro do grão (mm)	
	Areia B2'	Areia B3
100%	2	2,38
0%	1,18	2

Tabela 33 – Determinação da distribuição de restrições da Areia B2’ “continua”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
0	0%	0,1825	0,5058	0,1825
1	1%	0,1918	0,5454	0,1929
2	2%	0,1947	0,5521	0,1968
3	3%	0,1975	0,5584	0,2007
4	4%	0,2004	0,5645	0,2048
5	5%	0,2005	0,5703	0,2061
6	6%	0,2035	0,5714	0,2101
7	7%	0,2036	0,5736	0,2113
8	8%	0,2037	0,5779	0,2127
9	9%	0,2066	0,5787	0,2167
10	10%	0,2067	0,5836	0,2180
11	11%	0,2068	0,5849	0,2193
12	12%	0,2072	0,5858	0,2209
13	13%	0,2099	0,5879	0,2247
14	14%	0,2101	0,5915	0,2261
15	15%	0,2102	0,5924	0,2274
16	16%	0,2104	0,5933	0,2288
17	17%	0,2132	0,5949	0,2327
18	18%	0,2133	0,5985	0,2341
19	19%	0,2135	0,5994	0,2355
20	20%	0,2136	0,6002	0,2368
21	21%	0,2138	0,6015	0,2382
22	22%	0,2144	0,6035	0,2401
23	23%	0,2167	0,6062	0,2436
24	24%	0,2169	0,6071	0,2450
25	25%	0,2170	0,6078	0,2463
26	26%	0,2171	0,6091	0,2477
27	27%	0,2173	0,6106	0,2492
28	28%	0,2176	0,6131	0,2508
29	29%	0,2203	0,6142	0,2546
30	30%	0,2204	0,6151	0,2559
31	31%	0,2205	0,6160	0,2573
32	32%	0,2207	0,6171	0,2587
33	33%	0,2208	0,6182	0,2602
34	34%	0,2210	0,6210	0,2618
35	35%	0,2213	0,6220	0,2634
36	36%	0,2240	0,6232	0,2671
37	37%	0,2241	0,6237	0,2685
38	38%	0,2243	0,6250	0,2700
39	39%	0,2244	0,6259	0,2714
40	40%	0,2246	0,6286	0,2731
41	41%	0,2247	0,6298	0,2745
42	42%	0,2249	0,6308	0,2761
43	43%	0,2278	0,6316	0,2799
44	44%	0,2279	0,6325	0,2813
45	45%	0,2281	0,6334	0,2828
46	46%	0,2282	0,6348	0,2843
47	47%	0,2283	0,6373	0,2860
48	48%	0,2285	0,6385	0,2876
49	49%	0,2286	0,6391	0,2890
50	50%	0,2288	0,6402	0,2905
51	51%	0,2318	0,6411	0,2944
52	52%	0,2320	0,6421	0,2960
53	53%	0,2322	0,6439	0,2976
54	54%	0,2323	0,6459	0,2993

Tabela 33 – Determinação da distribuição de constrições da Areia B2’ “conclusão”

i	% mais fina	Diâmetro da constrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
55	55%	0,2324	0,6470	0,3008
56	56%	0,2326	0,6481	0,3024
57	57%	0,2327	0,6490	0,3039
58	58%	0,2358	0,6498	0,3079
59	59%	0,2360	0,6512	0,3095
60	60%	0,2362	0,6537	0,3114
61	61%	0,2363	0,6551	0,3129
62	62%	0,2365	0,6561	0,3145
63	63%	0,2366	0,6569	0,3160
64	64%	0,2369	0,6582	0,3178
65	65%	0,2390	0,6592	0,3210
66	66%	0,2402	0,6612	0,3235
67	67%	0,2404	0,6634	0,3254
68	68%	0,2406	0,6646	0,3271
69	69%	0,2407	0,6658	0,3287
70	70%	0,2409	0,6670	0,3304
71	71%	0,2413	0,6684	0,3322
72	72%	0,2444	0,6703	0,3364
73	73%	0,2446	0,6726	0,3383
74	74%	0,2448	0,6739	0,3400
75	75%	0,2450	0,6752	0,3418
76	76%	0,2451	0,6764	0,3434
77	77%	0,2455	0,6780	0,3454
78	78%	0,2460	0,6813	0,3479
79	79%	0,2492	0,6826	0,3519
80	80%	0,2493	0,6838	0,3536
81	81%	0,2495	0,6856	0,3554
82	82%	0,2498	0,6880	0,3576
83	83%	0,2502	0,6911	0,3600
84	84%	0,2538	0,6926	0,3644
85	85%	0,2539	0,6940	0,3662
86	86%	0,2541	0,6962	0,3682
87	87%	0,2544	0,7008	0,3709
88	88%	0,2553	0,7023	0,3733
89	89%	0,2588	0,7042	0,3777
90	90%	0,2590	0,7091	0,3805
91	91%	0,2593	0,7117	0,3828
92	92%	0,2638	0,7143	0,3881
93	93%	0,2640	0,7205	0,3913
94	94%	0,2643	0,7225	0,3935
95	95%	0,2692	0,7284	0,4000
96	96%	0,2694	0,7333	0,4030
97	97%	0,2747	0,7426	0,4108
98	98%	0,2751	0,7535	0,4157
99	99%	0,2806	0,7656	0,4247
100	100%	0,2992	0,8289	0,4581

**APÊNDICE C – DADOS DOS DIÂMETROS DAS CONSTRIÇÕES DAS
GRANULOMETRIAS DOS FILTROS GRANULARES DA BARRAGEM
BENGUÊ**

Tabela 34 – Determinação da distribuição de constrições do Filtro fino “continua”

i	% mais fina	Diâmetro da constrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
0	0%	0,0093	0,0257	0,0093
1	1%	0,0110	0,0328	0,0111
2	2%	0,0116	0,0341	0,0117
3	3%	0,0119	0,0352	0,0122
4	4%	0,0123	0,0364	0,0126
5	5%	0,0125	0,0371	0,0128
6	6%	0,0128	0,0377	0,0132
7	7%	0,0129	0,0382	0,0135
8	8%	0,0131	0,0390	0,0137
9	9%	0,0134	0,0392	0,0141
10	10%	0,0135	0,0402	0,0143
11	11%	0,0137	0,0405	0,0145
12	12%	0,0138	0,0408	0,0148
13	13%	0,0141	0,0416	0,0152
14	14%	0,0141	0,0419	0,0153
15	15%	0,0143	0,0422	0,0156
16	16%	0,0143	0,0425	0,0157
17	17%	0,0147	0,0433	0,0162
18	18%	0,0148	0,0435	0,0164
19	19%	0,0149	0,0439	0,0166
20	20%	0,0150	0,0442	0,0167
21	21%	0,0150	0,0450	0,0169
22	22%	0,0154	0,0451	0,0174
23	23%	0,0155	0,0454	0,0176
24	24%	0,0157	0,0459	0,0178
25	25%	0,0158	0,0465	0,0181
26	26%	0,0158	0,0468	0,0182
27	27%	0,0158	0,0470	0,0183
28	28%	0,0161	0,0474	0,0187
29	29%	0,0164	0,0477	0,0191
30	30%	0,0165	0,0484	0,0194
31	31%	0,0165	0,0487	0,0195
32	32%	0,0166	0,0489	0,0197
33	33%	0,0166	0,0494	0,0199
34	34%	0,0167	0,0496	0,0201
35	35%	0,0172	0,0505	0,0207
36	36%	0,0174	0,0507	0,0210
37	37%	0,0174	0,0508	0,0211
38	38%	0,0175	0,0514	0,0213
39	39%	0,0175	0,0515	0,0215
40	40%	0,0176	0,0523	0,0217
41	41%	0,0177	0,0528	0,0220
42	42%	0,0183	0,0529	0,0226
43	43%	0,0184	0,0533	0,0229
44	44%	0,0184	0,0536	0,0231
45	45%	0,0184	0,0543	0,0233
46	46%	0,0185	0,0548	0,0235

Tabela 34 – Determinação da distribuição de constrições do Filtro fino “conclusão”

i	% mais fina	Diâmetro da constrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
47	47%	0,0186	0,0551	0,0237
48	48%	0,0188	0,0555	0,0240
49	49%	0,0194	0,0557	0,0247
50	50%	0,0195	0,0566	0,0250
51	51%	0,0195	0,0570	0,0253
52	52%	0,0196	0,0575	0,0255
53	53%	0,0196	0,0578	0,0257
54	54%	0,0197	0,0581	0,0259
55	55%	0,0199	0,0589	0,0263
56	56%	0,0204	0,0592	0,0270
57	57%	0,0207	0,0600	0,0274
58	58%	0,0208	0,0605	0,0277
59	59%	0,0209	0,0607	0,0279
60	60%	0,0210	0,0615	0,0282
61	61%	0,0210	0,0618	0,0285
62	62%	0,0212	0,0626	0,0289
63	63%	0,0218	0,0633	0,0296
64	64%	0,0219	0,0638	0,0300
65	65%	0,0223	0,0644	0,0305
66	66%	0,0224	0,0649	0,0308
67	67%	0,0225	0,0658	0,0312
68	68%	0,0226	0,0663	0,0315
69	69%	0,0227	0,0668	0,0318
70	70%	0,0233	0,0677	0,0326
71	71%	0,0236	0,0688	0,0333
72	72%	0,0240	0,0693	0,0337
73	73%	0,0242	0,0698	0,0342
74	74%	0,0243	0,0708	0,0346
75	75%	0,0244	0,0720	0,0351
76	76%	0,0250	0,0727	0,0359
77	77%	0,0254	0,0734	0,0365
78	78%	0,0258	0,0751	0,0374
79	79%	0,0261	0,0759	0,0379
80	80%	0,0265	0,0763	0,0385
81	81%	0,0270	0,0782	0,0394
82	82%	0,0273	0,0792	0,0401
83	83%	0,0277	0,0800	0,0407
84	84%	0,0283	0,0819	0,0418
85	85%	0,0292	0,0840	0,0432
86	86%	0,0296	0,0851	0,0439
87	87%	0,0301	0,0866	0,0448
88	88%	0,0307	0,0896	0,0462
89	89%	0,0320	0,0909	0,0477
90	90%	0,0326	0,0937	0,0491
91	91%	0,0332	0,0962	0,0504
92	92%	0,0347	0,0993	0,0525
93	93%	0,0360	0,1031	0,0548
94	94%	0,0373	0,1070	0,0570
95	95%	0,0398	0,1125	0,0605
96	96%	0,0413	0,1188	0,0636
97	97%	0,0454	0,1269	0,0692
98	98%	0,0506	0,1404	0,0770
99	99%	0,0600	0,1600	0,0897
100	100%	0,1468	0,4066	0,2247

Tabela 35 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro grosso “continua”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
0	0%	0,0093	0,0257	0,0093
1	1%	0,0161	0,0526	0,0162
2	2%	0,0177	0,0594	0,0180
3	3%	0,0183	0,0649	0,0187
4	4%	0,0196	0,0691	0,0202
5	5%	0,0211	0,0733	0,0219
6	6%	0,0218	0,0758	0,0228
7	7%	0,0224	0,0803	0,0236
8	8%	0,0229	0,0824	0,0243
9	9%	0,0236	0,0855	0,0253
10	10%	0,0250	0,0885	0,0269
11	11%	0,0263	0,0907	0,0284
12	12%	0,0266	0,0936	0,0290
13	13%	0,0273	0,0960	0,0300
14	14%	0,0280	0,0976	0,0310
15	15%	0,0287	0,1009	0,0319
16	16%	0,0295	0,1039	0,0330
17	17%	0,0298	0,1055	0,0337
18	18%	0,0308	0,1082	0,0350
19	19%	0,0317	0,1104	0,0362
20	20%	0,0322	0,1131	0,0371
21	21%	0,0330	0,1152	0,0382
22	22%	0,0337	0,1170	0,0392
23	23%	0,0341	0,1205	0,0401
24	24%	0,0345	0,1215	0,0408
25	25%	0,0351	0,1250	0,0419
26	26%	0,0357	0,1267	0,0428
27	27%	0,0363	0,1299	0,0439
28	28%	0,0367	0,1315	0,0446
29	29%	0,0376	0,1346	0,0461
30	30%	0,0379	0,1368	0,0468
31	31%	0,0383	0,1393	0,0477
32	32%	0,0392	0,1411	0,0490
33	33%	0,0402	0,1436	0,0504
34	34%	0,0406	0,1468	0,0515
35	35%	0,0417	0,1502	0,0531
36	36%	0,0421	0,1517	0,0540
37	37%	0,0430	0,1543	0,0554
38	38%	0,0435	0,1577	0,0566
39	39%	0,0444	0,1591	0,0579
40	40%	0,0456	0,1613	0,0595
41	41%	0,0463	0,1656	0,0610
42	42%	0,0470	0,1686	0,0624
43	43%	0,0478	0,1695	0,0635
44	44%	0,0488	0,1724	0,0651
45	45%	0,0499	0,1747	0,0668
46	46%	0,0517	0,1781	0,0692
47	47%	0,0521	0,1805	0,0702
48	48%	0,0524	0,1835	0,0713
49	49%	0,0537	0,1848	0,0729
50	50%	0,0545	0,1895	0,0747
51	51%	0,0562	0,1932	0,0772
52	52%	0,0568	0,1948	0,0784
53	53%	0,0577	0,1972	0,0799

Tabela 35– Determinação da distribuição de restrições do Filtro grosso “conclusão”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	$I_D = 70\%$
54	54%	0,0595	0,2014	0,0825
55	55%	0,0606	0,2038	0,0842
56	56%	0,0620	0,2062	0,0862
57	57%	0,0630	0,2112	0,0883
58	58%	0,0647	0,2127	0,0905
59	59%	0,0663	0,2168	0,0929
60	60%	0,0675	0,2187	0,0947
61	61%	0,0689	0,2224	0,0970
62	62%	0,0703	0,2290	0,0998
63	63%	0,0714	0,2306	0,1015
64	64%	0,0737	0,2330	0,1043
65	65%	0,0754	0,2356	0,1067
66	66%	0,0778	0,2402	0,1099
67	67%	0,0788	0,2473	0,1127
68	68%	0,0801	0,2495	0,1146
69	69%	0,0828	0,2519	0,1178
70	70%	0,0836	0,2535	0,1193
71	71%	0,0855	0,2641	0,1235
72	72%	0,0892	0,2663	0,1275
73	73%	0,0907	0,2688	0,1297
74	74%	0,0938	0,2764	0,1343
75	75%	0,0956	0,2804	0,1372
76	76%	0,0966	0,2832	0,1391
77	77%	0,1009	0,2907	0,1448
78	78%	0,1026	0,2974	0,1482
79	79%	0,1039	0,3012	0,1507
80	80%	0,1090	0,3062	0,1564
81	81%	0,1110	0,3154	0,1607
82	82%	0,1127	0,3236	0,1646
83	83%	0,1170	0,3276	0,1694
84	84%	0,1197	0,3353	0,1741
85	85%	0,1208	0,3415	0,1771
86	86%	0,1269	0,3541	0,1855
87	87%	0,1296	0,3596	0,1896
88	88%	0,1325	0,3690	0,1949
89	89%	0,1389	0,3810	0,2035
90	90%	0,1411	0,3955	0,2097
91	91%	0,1512	0,4034	0,2201
92	92%	0,1538	0,4212	0,2276
93	93%	0,1661	0,4381	0,2420
94	94%	0,1687	0,4557	0,2497
95	95%	0,1708	0,4853	0,2604
96	96%	0,1884	0,5143	0,2822
97	97%	0,2104	0,5453	0,3079
98	98%	0,2240	0,5957	0,3332
99	99%	0,2729	0,7139	0,4039
100	100%	0,6031	1,6711	0,9235

**APÊNDICE D – DADOS DOS DIÂMETROS DAS CONSTRIÇÕES DAS
GRANULOMETRIAS DOS FILTROS GRANULARES DA BARRAGEM ITAÚNA**

Tabela 36 – Determinação da distribuição de constrições do Filtro fino “continua”

i	% mais fina	Diâmetro da constrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	$I_D = 70\%$
0	0%	0,0093	0,0257	0,0093
1	1%	0,0130	0,0414	0,0131
2	2%	0,0142	0,0447	0,0143
3	3%	0,0151	0,0468	0,0153
4	4%	0,0156	0,0491	0,0160
5	5%	0,0159	0,0508	0,0164
6	6%	0,0165	0,0524	0,0171
7	7%	0,0169	0,0536	0,0177
8	8%	0,0173	0,0552	0,0182
9	9%	0,0177	0,0558	0,0187
10	10%	0,0181	0,0576	0,0193
11	11%	0,0184	0,0583	0,0197
12	12%	0,0190	0,0599	0,0205
13	13%	0,0190	0,0606	0,0207
14	14%	0,0195	0,0613	0,0213
15	15%	0,0199	0,0630	0,0218
16	16%	0,0201	0,0636	0,0222
17	17%	0,0207	0,0648	0,0230
18	18%	0,0208	0,0656	0,0232
19	19%	0,0210	0,0665	0,0236
20	20%	0,0215	0,0671	0,0242
21	21%	0,0220	0,0684	0,0249
22	22%	0,0221	0,0692	0,0252
23	23%	0,0221	0,0704	0,0255
24	24%	0,0228	0,0714	0,0263
25	25%	0,0230	0,0722	0,0267
26	26%	0,0233	0,0726	0,0271
27	27%	0,0233	0,0739	0,0274
28	28%	0,0240	0,0746	0,0283
29	29%	0,0243	0,0762	0,0288
30	30%	0,0245	0,0768	0,0292
31	31%	0,0246	0,0772	0,0295
32	32%	0,0249	0,0787	0,0300
33	33%	0,0255	0,0792	0,0309
34	34%	0,0259	0,0799	0,0314
35	35%	0,0260	0,0813	0,0318
36	36%	0,0262	0,0815	0,0321
37	37%	0,0265	0,0831	0,0328
38	38%	0,0268	0,0838	0,0333
39	39%	0,0274	0,0852	0,0342
40	40%	0,0277	0,0861	0,0347
41	41%	0,0278	0,0868	0,0350
42	42%	0,0281	0,0872	0,0355
43	43%	0,0287	0,0884	0,0364
44	44%	0,0291	0,0893	0,0371
45	45%	0,0292	0,0905	0,0375
46	46%	0,0296	0,0919	0,0382
47	47%	0,0298	0,0929	0,0387
48	48%	0,0303	0,0934	0,0394

Tabela 36 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro fino “conclusão”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
49	49%	0,0309	0,0946	0,0403
50	50%	0,0312	0,0962	0,0409
51	51%	0,0314	0,0971	0,0414
52	52%	0,0318	0,0978	0,0421
53	53%	0,0319	0,0989	0,0425
54	54%	0,0332	0,1002	0,0440
55	55%	0,0334	0,1015	0,0446
56	56%	0,0336	0,1025	0,0452
57	57%	0,0339	0,1037	0,0459
58	58%	0,0341	0,1058	0,0465
59	59%	0,0343	0,1065	0,0471
60	60%	0,0358	0,1073	0,0487
61	61%	0,0360	0,1085	0,0493
62	62%	0,0363	0,1098	0,0500
63	63%	0,0365	0,1108	0,0505
64	64%	0,0370	0,1142	0,0518
65	65%	0,0381	0,1157	0,0532
66	66%	0,0386	0,1161	0,0539
67	67%	0,0390	0,1166	0,0546
68	68%	0,0393	0,1183	0,0554
69	69%	0,0401	0,1195	0,0565
70	70%	0,0408	0,1234	0,0582
71	71%	0,0417	0,1247	0,0594
72	72%	0,0423	0,1256	0,0603
73	73%	0,0427	0,1268	0,0611
74	74%	0,0432	0,1294	0,0624
75	75%	0,0447	0,1328	0,0645
76	76%	0,0453	0,1343	0,0656
77	77%	0,0457	0,1356	0,0664
78	78%	0,0460	0,1369	0,0673
79	79%	0,0473	0,1402	0,0693
80	80%	0,0495	0,1439	0,0722
81	81%	0,0498	0,1458	0,0731
82	82%	0,0501	0,1485	0,0743
83	83%	0,0519	0,1518	0,0768
84	84%	0,0545	0,1540	0,0796
85	85%	0,0548	0,1582	0,0812
86	86%	0,0550	0,1628	0,0828
87	87%	0,0576	0,1650	0,0856
88	88%	0,0582	0,1700	0,0877
89	89%	0,0607	0,1760	0,0915
90	90%	0,0636	0,1789	0,0948
91	91%	0,0653	0,1864	0,0984
92	92%	0,0676	0,1931	0,1022
93	93%	0,0721	0,2005	0,1079
94	94%	0,0740	0,2103	0,1124
95	95%	0,0791	0,2237	0,1203
96	96%	0,0829	0,2338	0,1263
97	97%	0,0948	0,2539	0,1411
98	98%	0,1058	0,2800	0,1570
99	99%	0,1275	0,3312	0,1880
100	100%	0,3019	0,8364	0,4623

Tabela 37 – Determinação da distribuição de restrições do Filtro grosso “continua”

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	I _D = 70%
0	0%	0,0093	0,0257	0,0093
1	1%	0,0137	0,0442	0,0138
2	2%	0,0150	0,0479	0,0152
3	3%	0,0159	0,0511	0,0162
4	4%	0,0166	0,0534	0,0170
5	5%	0,0172	0,0554	0,0177
6	6%	0,0177	0,0578	0,0184
7	7%	0,0182	0,0594	0,0191
8	8%	0,0188	0,0607	0,0198
9	9%	0,0193	0,0627	0,0204
10	10%	0,0197	0,0645	0,0210
11	11%	0,0201	0,0655	0,0216
12	12%	0,0208	0,0669	0,0224
13	13%	0,0211	0,0687	0,0229
14	14%	0,0216	0,0701	0,0236
15	15%	0,0220	0,0716	0,0242
16	16%	0,0223	0,0727	0,0247
17	17%	0,0228	0,0738	0,0254
18	18%	0,0232	0,0748	0,0260
19	19%	0,0237	0,0772	0,0268
20	20%	0,0240	0,0778	0,0272
21	21%	0,0241	0,0789	0,0276
22	22%	0,0248	0,0810	0,0285
23	23%	0,0251	0,0815	0,0290
24	24%	0,0254	0,0822	0,0294
25	25%	0,0260	0,0831	0,0303
26	26%	0,0265	0,0856	0,0311
27	27%	0,0267	0,0863	0,0315
28	28%	0,0269	0,0875	0,0320
29	29%	0,0274	0,0894	0,0328
30	30%	0,0278	0,0901	0,0334
31	31%	0,0283	0,0910	0,0341
32	32%	0,0288	0,0921	0,0349
33	33%	0,0291	0,0940	0,0355
34	34%	0,0292	0,0951	0,0360
35	35%	0,0297	0,0966	0,0367
36	36%	0,0302	0,0980	0,0375
37	37%	0,0305	0,0990	0,0381
38	38%	0,0309	0,1002	0,0388
39	39%	0,0314	0,1008	0,0395
40	40%	0,0321	0,1028	0,0406
41	41%	0,0324	0,1039	0,0412
42	42%	0,0329	0,1059	0,0421
43	43%	0,0331	0,1068	0,0426
44	44%	0,0337	0,1088	0,0436
45	45%	0,0342	0,1097	0,0444
46	46%	0,0343	0,1109	0,0449
47	47%	0,0348	0,1128	0,0458
48	48%	0,0359	0,1139	0,0471
49	49%	0,0361	0,1151	0,0477
50	50%	0,0365	0,1167	0,0486
51	51%	0,0370	0,1186	0,0495
52	52%	0,0374	0,1201	0,0503
53	53%	0,0386	0,1217	0,0518
54	54%	0,0390	0,1235	0,0527

Tabela 37 - Determinação da distribuição de restrições do Filtro grosso “conclusão

i	% mais fina	Diâmetro da restrição (mm)		
		Estado denso	Estado fofo	$I_D = 70\%$
55	55%	0,0396	0,1243	0,0536
56	56%	0,0401	0,1263	0,0546
57	57%	0,0403	0,1280	0,0553
58	58%	0,0411	0,1303	0,0566
59	59%	0,0416	0,1326	0,0577
60	60%	0,0419	0,1333	0,0583
61	61%	0,0437	0,1340	0,0602
62	62%	0,0440	0,1365	0,0612
63	63%	0,0445	0,1398	0,0625
64	64%	0,0451	0,1427	0,0638
65	65%	0,0470	0,1443	0,0660
66	66%	0,0472	0,1447	0,0665
67	67%	0,0477	0,1464	0,0675
68	68%	0,0483	0,1494	0,0690
69	69%	0,0494	0,1519	0,0706
70	70%	0,0510	0,1571	0,0732
71	71%	0,0516	0,1578	0,0742
72	72%	0,0520	0,1589	0,0751
73	73%	0,0533	0,1608	0,0768
74	74%	0,0541	0,1626	0,0782
75	75%	0,0551	0,1708	0,0812
76	76%	0,0560	0,1726	0,0826
77	77%	0,0588	0,1738	0,0854
78	78%	0,0596	0,1746	0,0865
79	79%	0,0602	0,1776	0,0880
80	80%	0,0612	0,1861	0,0912
81	81%	0,0649	0,1884	0,0949
82	82%	0,0656	0,1914	0,0966
83	83%	0,0658	0,1985	0,0988
84	84%	0,0667	0,2016	0,1007
85	85%	0,0705	0,2070	0,1053
86	86%	0,0724	0,2123	0,1085
87	87%	0,0731	0,2168	0,1106
88	88%	0,0780	0,2256	0,1170
89	89%	0,0800	0,2306	0,1202
90	90%	0,0814	0,2392	0,1240
91	91%	0,0871	0,2505	0,1317
92	92%	0,0885	0,2576	0,1352
93	93%	0,0954	0,2720	0,1447
94	94%	0,0992	0,2880	0,1524
95	95%	0,1096	0,3004	0,1640
96	96%	0,1129	0,3241	0,1737
97	97%	0,1293	0,3555	0,1951
98	98%	0,1412	0,4046	0,2187
99	99%	0,1782	0,4879	0,2702
100	100%	0,5541	1,5351	0,8484

**ANEXO A – DADOS DA ANÁLISE COMPARATIVA DOS CRITÉRIOS NRCS (1994),
ICOLD (1994) E RAUT E INDRARATNA (2008)**

Tabela 38 – Dados da análise comparativa de Raut e Indraratna (2008) “continua”

Nº	D ₁₅ (mm)	dc ₃₅ (mm)	d* ₈₅ (mm)	NRCS (1994)		ICOLD (1994)		Raut e Indraratna (2008)	Resultado experimental	Referência
				D ₁₅ máx		D ₁₅ máx				
1	0,26	0,03	0,06	2,04	√	1,12	√	√	√	Lafleur (1984)
2	1,00	0,17	0,35	2,04	√	1,12	√	√	√	-
3	3,20	0,67	0,54	2,04	X	1,12	X	X	X	-
4	7,30	1,59	0,58	2,04	X	1,12	X	X	X	-
5	15,00	3,24	0,90	2,40	X	1,12	X	X	X	-
6	0,26	0,05	0,07	0,70	√	0,40	√	√	√	Lafleur, Mlynarek e Rollin (1989)
7	1,00	0,14	0,07	0,70	X	0,40	X	X	X	-
8	3,20	0,61	0,08	0,70	X	0,40	X	X	X	-
9	7,30	1,59	0,18	0,70	X	0,40	X	X	X	-
10	15,00	2,74	0,18	0,70	X	0,40	X	X	X	-
11	0,26	0,03	0,06	0,70	√	0,52	√	√	√	-
12	1,00	0,21	0,28	0,70	X	0,52	X	√	√	-
13	3,20	0,68	0,60	0,70	X	0,52	X	X	√	-
14	7,30	1,50	0,92	0,70	X	0,52	X	X	X	-
15	15,00	2,84	1,90	0,70	X	0,52	X	X	X	-
16	0,26	0,03	0,08	0,70	√	0,36	√	√	√	-
17	1,00	0,21	0,32	0,70	X	0,36	X	√	√	-
18	3,20	0,84	0,42	0,70	X	0,36	X	X	X	-
19	7,30	1,71	0,52	0,70	X	0,36	X	X	X	-
20	15,00	3,45	0,62	0,70	X	0,36	X	X	X	-
21	0,26	0,03	0,07	0,70	√	0,15	X	√	√	-
22	1,00	0,17	0,30	0,70	X	0,15	X	√	√	-
23	3,20	0,74	0,85	0,70	X	0,15	X	√	√	-
24	7,30	1,74	0,85	0,70	X	0,15	X	X	X	-
25	15,00	3,07	0,85	0,70	X	0,15	X	X	X	-
26	0,26	0,03	0,08	0,96	√	1,88	√	√	√	-
27	1,00	0,17	0,28	0,96	X	1,88	√	√	√	-
28	3,20	0,68	0,85	0,96	X	1,88	X	√	√	-
29	7,30	1,57	1,32	0,96	X	1,88	X	X	√	-
30	15,00	3,17	1,90	0,96	X	1,88	X	X	X	-
31	0,26	0,03	0,09	0,70	√	0,48	√	√	√	-
32	1,00	0,20	0,28	0,70	X	0,48	X	√	√	-
33	3,20	0,69	0,45	0,70	X	0,48	X	X	√	-
34	7,30	1,79	0,60	0,70	X	0,48	X	X	X	-
35	15,00	2,70	0,55	0,70	X	0,48	X	X	X	-
36	0,26	0,03	0,07	7,84	√	7,20	√	√	√	-
37	1,00	0,23	0,42	7,84	√	7,20	√	√	√	-
38	3,20	0,81	0,85	7,84	√	7,20	√	√	√	-
39	7,30	1,64	1,32	7,84	√	7,20	X	X	X	-
40	15,00	3,31	1,90	7,84	X	7,20	X	X	X	-
41	0,26	0,03	0,08	5,96	√	2,00	√	√	√	-
42	1,00	0,23	0,60	5,96	√	2,00	√	√	√	-
43	3,20	0,68	0,80	5,96	√	2,00	X	√	√	-
44	7,30	1,77	1,50	5,96	X	2,00	X	X	√	-
45	15,00	3,52	2,40	5,96	X	2,00	X	X	X	-
46	0,26	0,04	0,14	2,21	√	0,84	√	√	√	-
47	1,00	0,22	0,48	2,21	√	0,84	X	√	√	-

Tabela 38 – Dados da análise comparativa de Raut e Indraratna (2008) “conclusão”

Nº	D ₁₅ (mm)	dc ₃₅ (mm)	d* ₈₅ (mm)	NRCS (1994)		ICOLD (1994)		Raut e Indraratna (2008)	Resultado experimental	Referência
				D ₁₅ máx	X	D ₁₅ máx	X			
48	3,20	0,91	0,80	2,21	X	0,84	X	X	X	-
49	7,30	1,74	0,70	2,21	X	0,84	X	X	X	-
50	15,00	3,64	0,78	2,21	X	0,84	X	X	X	-
51	0,68	0,16	0,04	0,40	X	0,18	X	X	X	Indraratna, Vafai e Dilema (1996)
52	0,23	0,05	0,04	0,40	√	0,18	X	X	√	-
53	0,12	0,03	0,04	0,40	√	0,18	√	√	√	-
54	0,75	0,15	0,32	1,68	√	1,68	√	√	√	Indraratna e Vafai (1997)
55	4,21	0,85	0,42	1,68	X	1,68	X	X	X	-
56	5,10	1,07	0,50	4,72	X	4,72	X	X	X	Raut e Indraratna (2008)
57	5,00	1,26	0,78	5,60	√	5,60	√	X	X	-
58	1,40	0,05	0,19	5,60	√	5,60	√	√	√	-
59	1,30	0,25	0,40	1,60	√	1,60	√	√	√	-
60	2,50	0,45	0,40	1,60	X	1,60	X	X	√	-
61	3,60	0,64	0,80	1,12	X	1,12	X	√	X	-
62	0,47	0,10	0,12	0,46	X	0,46	X	√	√	-
63	0,58	0,12	0,12	0,46	X	0,46	X	√	√	-
64	0,70	0,14	0,12	0,46	X	0,46	X	X	√	-
65	7,30	1,48	1,30	6,20	X	6,20	X	X	X	-
66	1,40	0,31	0,67	6,20	√	6,20	√	√	√	-
67	7,30	1,48	1,20	5,12	X	5,12	X	X	X	-
68	0,78	0,16	0,37	5,12	√	5,12	√	√	√	-
69	7,30	1,48	0,65	2,76	X	3,00	X	X	X	-
70	1,40	0,31	0,51	2,76	√	3,00	√	√	√	-
71	7,30	1,48	1,15	6,00	X	7,20	X	X	X	-
72	1,40	0,31	0,50	6,00	√	7,20	√	√	√	-
73	5,20	1,07	0,41	0,70	X	0,40	X	X	X	-
74	2,50	0,49	0,36	0,70	X	0,40	X	X	X	-
75	0,92	0,20	0,25	0,70	X	0,40	X	√	√	-
76	0,92	0,19	0,22	0,70	X	0,40	X	√	√	-
77	5,10	1,04	0,26	0,70	X	0,40	X	X	X	-
78	2,10	0,43	0,26	0,70	X	0,40	X	X	X	-
79	1,35	0,28	0,05	0,45	X	0,20	X	X	X	-
80	0,75	0,17	0,04	0,45	X	0,20	X	X	X	-
81	0,42	0,09	0,04	0,45	√	0,20	X	X	X	-
82	0,23	0,05	0,04	0,45	√	0,20	X	X	X	-
83	0,13	0,02	0,03	0,45	√	0,20	√	√	√	-

Nota: X = ineficaz; √ = eficaz.

Fonte: Adaptado de Raut e Indraratna (2008).

**ANEXO B – DADOS GRANULOMÉTRICOS DOS SOLOS DA BARRAGEM
BENGUÊ**

Tabela 39 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento do solo tipo SM

Jazida	Furo	Peneiras (mm)								LL	LP	IP
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200			
		25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,075			
% que passa												
JT 01	3	100%	100%	99%	97%	82%	71%	52%	42%	41	27	14
JT 01	4	100%	98%	92%	89%	73%	60%	43%	34%	38	27	11
JT 01	6	100%	100%	98%	95%	82%	69%	59%	44%	40	27	13
JT 01	13	100%	100%	94%	87%	67%	45%	29%	16%	32	26	6
JT 01	15	100%	99%	99%	98%	95%	85%	53%	26%	34	25	9
JT 01	16	100%	100%	100%	98%	88%	80%	53%	32%	38	26	12
JT 01	17	100%	100%	100%	96%	84%	78%	62%	50%	44	29	15
JT 01	26	100%	98%	97%	94%	87%	80%	63%	49%	42	28	14
JT 01	29	100%	100%	96%	89%	72%	65%	48%	31%	34	26	8
JT 01	31	100%	99%	99%	98%	96%	88%	72%	42%	38	28	10
JT 01	32	100%	100%	98%	96%	89%	84%	67%	49%	43	28	15
JT 01	34	100%	99%	92%	87%	70%	61%	48%	31%	38	27	11
JT 01	37	100%	100%	97%	93%	83%	75%	57%	36%	41	30	11
JT 01	45	100%	100%	96%	91%	82%	71%	57%	37%	36	27	9

Fonte: Adaptado de SRH (1998).

Tabela 40 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento do solo tipo ML

Jazida	Furo	Peneiras (mm)								LL	LP	IP
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200			
		25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,075			
% que passa												
JT 01	7	100%	100%	98%	96%	86%	77%	69%	52%	45	29	16
JT 01	9	100%	96%	95%	93%	84%	81%	72%	64%	43	28	15
JT 01	11	100%	100%	99%	97%	92%	88%	74%	59%	43	28	15
JT 01	19	100%	100%	100%	98%	94%	90%	79%	55%	44	28	16
JT 01	21	100%	100%	99%	97%	86%	81%	64%	52%	43	28	15

Fonte: Adaptado de SRH (1998).

Tabela 41 – Dados granulométricos do ensaio de sedimentação do solo tipo SM

FURO 03		FURO 04		FURO 13		FURO 16		FURO 26		FURO 32		FURO 34		FURO 37		FURO 45	
D (mm)	% passa																
0,0659	33%	0,0659	28%	0,0709	11%	0,0708	24%	0,0650	40%	0,0659	41%	0,0676	23%	0,0681	29%	0,0668	30%
0,0466	32%	0,0466	27%	0,0502	10%	0,0501	23%	0,0460	39%	0,0466	39%	0,0478	22%	0,0481	27%	0,0472	28%
0,0329	31%	0,0329	26%	0,0355	10%	0,0354	22%	0,0325	39%	0,0329	39%	0,0338	21%	0,0340	26%	0,0334	28%
0,0233	29%	0,0233	26%	0,0251	8%	0,0250	20%	0,0230	37%	0,0233	38%	0,0239	21%	0,0241	26%	0,0236	27%
0,0165	29%	0,0165	25%	0,0177	7%	0,0177	19%	0,0163	36%	0,0165	37%	0,0169	20%	0,0170	25%	0,0167	26%
0,0116	28%	0,0116	24%	0,0125	7%	0,0125	19%	0,0115	36%	0,0116	37%	0,0120	19%	0,0120	24%	0,0118	26%
0,0082	27%	0,0082	23%	0,0089	6%	0,0089	18%	0,0081	35%	0,0082	35%	0,0085	18%	0,0085	24%	0,0083	25%
0,0060	27%	0,0060	23%	0,0065	5%	0,0065	16%	0,0059	33%	0,0060	34%	0,0062	17%	0,0062	22%	0,0061	24%
0,0043	26%	0,0043	22%	0,0046	4%	0,0046	16%	0,0042	32%	0,0043	34%	0,0044	15%	0,0044	21%	0,0043	23%
0,0030	25%	0,0030	21%	0,0032	3%	0,0032	15%	0,0030	32%	0,0030	32%	0,0031	15%	0,0031	20%	0,0030	21%
0,0021	24%	0,0021	20%	0,0023	2%	0,0023	14%	0,0021	31%	0,0021	31%	0,0022	14%	0,0022	19%	0,0022	20%
0,0012	22%	0,0012	19%	0,0013	2%	0,0013	12%	0,0012	29%	0,0012	30%	0,0012	13%	0,0012	18%	0,0012	19%

Fonte: Adaptado de SRH (1998).

Tabela 42 – Dados granulométricos do ensaio de sedimentação do solo tipo ML

FURO 07		FURO 09		FURO 11		FURO 19		FURO 21		FURO 24	
D (mm)	% passa										
0,0636	43%	0,0603	55%	0,0643	48%	0,0654	47%	0,0641	44%	0,0640	51%
0,0450	42%	0,0426	54%	0,0454	47%	0,0462	45%	0,0453	43%	0,0453	50%
0,0318	41%	0,0301	52%	0,0321	47%	0,0327	45%	0,0320	42%	0,0320	48%
0,0225	40%	0,0213	51%	0,0227	45%	0,0231	44%	0,0226	42%	0,0226	48%
0,0159	40%	0,0131	50%	0,0610	44%	0,0163	42%	0,0160	40%	0,0160	47%
0,0112	38%	0,0107	48%	0,0114	44%	0,0116	42%	0,0113	39%	0,0113	45%
0,0080	38%	0,0075	47%	0,0080	43%	0,0082	41%	0,0080	39%	0,0080	45%
0,0058	37%	0,0055	46%	0,0059	41%	0,0060	39%	0,0058	38%	0,0058	44%
0,0041	36%	0,0039	44%	0,0041	40%	0,0042	39%	0,0041	36%	0,0041	42%
0,0029	35%	0,0028	43%	0,0029	38%	0,0030	38%	0,0029	35%	0,0029	42%
0,0021	33%	0,0019	42%	0,0021	38%	0,0021	36%	0,0021	34%	0,0021	41%
0,0012	32%	0,0011	40%	0,0012	37%	0,0012	35%	0,0012	32%	0,0012	41%

Fonte: Adaptado de SRH (1998).

ANEXO C – DADOS GRANULOMÉTRICOS DOS SOLOS DA BARRAGEM ITAÚNA

Tabela 43 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento e sedimentação do solo tipo CL

Jazida	FURO	Peneiramento										Sedimentação				LL	LP	IP
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	nº 10	nº 40	nº 200	0,01	0,005	0,002	0,001			
		50	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,075							
% que passa											% que passa							
1	4	100%	100%	100%	100%	99%	99%	94%	86%	70%	56%	-	-	-	-	38	23	15
1	6	100%	100%	100%	100%	98%	97%	94%	92%	76%	63%	53%	50%	47%	45%	45	23	22
1	8	100%	100%	100%	100%	99%	98%	94%	89%	71%	53%	-	-	-	-	43	24	19
1	10	100%	100%	100%	100%	100%	99%	98%	96%	81%	69%	60%	55%	51%	50%	45	24	21
1	12	100%	100%	100%	100%	100%	97%	92%	86%	69%	54%	44%	41%	38%	37%	39	23	16
1	14	100%	100%	100%	100%	100%	98%	95%	94%	81%	66%	56%	53%	50%	47%	46	24	22
1	20	100%	100%	100%	100%	100%	100%	96%	91%	78%	61%	-	-	-	-	46	24	22
1	22	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	96%	81%	68%	59%	56%	52%	51%	47	24	23
1	24	100%	100%	100%	100%	100%	97%	92%	87%	72%	58%	43%	40%	37%	35%	44	23	21
1	26	100%	100%	100%	100%	99%	99%	94%	87%	70%	57%	49%	44%	41%	40%	44	24	20
1	28	100%	100%	100%	100%	99%	98%	91%	83%	68%	54%	-	-	-	-	43	23	20

Fonte: Adaptado de SRH (1997).

Tabela 44 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento e sedimentação do solo tipo SM

Jazida	FURO	Peneiramento										Sedimentação				LL	LP	IP
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	nº 10	nº 40	nº 200	0,01	0,005	0,002	0,001			
		50	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,075							
% que passa											% que passa							
1	15	100%	100%	100%	100%	96%	93%	83%	71%	39%	23%	-	-	-	-	34	25	9
1	18	100%	100%	100%	100%	100%	98%	92%	85%	63%	36%	27%	22%	20%	18%	34	25	9

Fonte: Adaptado de SRH (1997).

Tabela 45 – Dados granulométricos do ensaio de peneiramento e sedimentação do solo tipo SC

Jazida	FURO	Peneiramento										Sedimentação				LL	LP	IP
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	nº 10	nº 40	nº 200	0,01	0,005	0,002	0,001			
		% que passa										% que passa						
1	1	100%	100%	100%	100%	99%	97%	90%	80%	64%	38%	29%	24%	23%	21%	36	24	12
1	16	100%	100%	100%	100%	99%	97%	85%	78%	65%	49%	40%	36%	33%	32%	45	24	21

Fonte: Adaptado de SRH (1997).