

ANA CLARA CESHIM PERIM

**AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE MATERIAIS DE FILTROS
PARA OBRAS DE TERRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Rejane Nascentes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P444a
2023

Perim, Ana Clara Ceschim, 1993-

Avaliação da granulometria de materiais de filtros para obra
de terra / Ana Clara Ceschim Perim. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (141 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Rejane Nascentes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.

Referências bibliográficas: f. 129-133.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.633>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Construção civil.
3. Areia. 4. Granulometria. 5. Solos - Percolação. 6. Filtros e
filtração. I. Nascentes, Rejane, 1977-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.171

ANA CLARA CESHIM PERIM

**AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE MATERIAIS DE FILTROS
PARA OBRAS DE TERRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 ANA CLARA CESHIM PERIM
Data: 11/10/2023 14:21:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ana Clara Ceschim Perim
Autora

Documento assinado digitalmente
 REJANE NASCENTES
Data: 25/10/2023 16:36:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rejane Nascentes
Orientadora

*Dedico este trabalho à Deus,
minha família e meus amigos.
Deus é bom o tempo todo!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre está ao meu lado me indicando o caminho do bem e acalmando meu coração nos momentos de medo, insegurança e ansiedade. Deus é bom o tempo todo! Ele nunca nos abandona.

Agradeço a minha família, meus pais, Nelma e Dalton, meus irmãos Maria Cecília e Saulo, e ao meu noivo Bernardo, por me proporcionarem todo suporte físico e emocional para conquistar mais essa etapa da minha vida profissional.

Agradeço imensamente à minha orientadora Professora Rejane Nascentes e ao meu coorientador Professor Roberto Ferraz que estiveram comigo durante todo o processo, me dando todo apoio e liberdade de escolha para concluir esta pesquisa, e principalmente pelo tratamento sempre tão humano, respeitoso e amigável.

Agradeço ao meu grande amigo Bruno de Queiroz por me incentivar e ajudar nos dias tempestuosos, e por ser uma inspiração como pesquisador e geotécnico.

Agradeço ao aluno Thiago Barros por toda ajuda, disponibilidade e bom desempenho na realização dos ensaios de sólidos em suspensão e turbidez.

Agradeço aos técnicos e funcionários do Laboratório de Engenharia Civil, em especial ao Marcelo e Carlos, pela ajuda e companheirismo.

Agradeço a técnica Priscila do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelo direcionamento técnico dos ensaios.

Agradeço a minha família mineira, Simone, Fernando, Artur, Marisa e Anízio, por me acolherem em sua casa e em seus corações de braços e com amor.

Agradeço aos grandes amigos, Géssica e Ramón, pelos momentos de discussões, desabafos e descontração.

Agradeço ao Engenheiro Geotécnico Rodrigo Zorzal pela sugestão do tema de pesquisa e conversas produtivas sobre drenagem.

Agradeço ao amigo e Professor Paulo Sérgio Barbosa, por ser uma grande referência a nível profissional e pessoal.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo suporte financeiro e todo incentivo à pesquisa no Brasil. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço a Universidade Federal de Viçosa por me dar oportunidade de conquistar minha especialização e conhecer pessoas que vou levar pra vida toda.

“E, tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração, como ao Senhor e não aos homens, sabendo que recebereis do Senhor o galardão da herança, porque a Cristo, o Senhor, servis.”

(Colossenses 3:23-24)

RESUMO

PERIM, Ana Clara Ceschim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Avaliação da granulometria de materiais de filtros para obras de terra.** Orientadora: Rejane Nascentes.

A granulometria de um material diz muito sobre seu comportamento e consequente previsões de seus parâmetros característicos. No dimensionamento do intervalo de aceitação granulométrica para um material filtro de uma obra de terra, dados granulométricos do material base são exigidos para certificação dos critérios de permeabilidade e retenção. O quanto um solo permite a percolação de um fluido está relacionado a sua capacidade de aliviar as tensões de uma obra de terra. A análise do carreamento de partículas para o interior do filtro permite a compreensão do surgimento ou não de uma zona de auto filtragem, colmatação dos finos, e infiltração de partículas. O presente trabalho estuda a diferença do comportamento de percolação em quatro diferentes materiais base para dois tipos de material filtro. Os resultados de caracterização indicam que o Solo 1 tem mais de 60% da sua constituição da fração argilosa, o Solo 2 tem grande porcentagem de areia com predominância de silte como porção fina, o Solo 3 tem quase 70% de sua granulometria de areia, e o Rejeito utilizado tem alta porcentagem constituinte de silte. Já as areias utilizadas como material filtro, uma denominada Areia Natural tem mais de 90% de fração arenosa, enquanto a outra apresenta quase 60% de areia e o restante de pedregulho e é chamada de Areia Grossa. A discussão principal deste estudo foi dada através da realização de um ensaio de percolação do material base em contato com material filtro onde além dos dados de vazão recolhidos, o fluido de saída é ensaiado para medir as partículas em suspensão carregadas com o escoamento. Com as situações de combinação observou-se que a granulometria mais aberta da Areia grossa não foi satisfatória para o critério de retenção quando ensaiadas com os materiais com características siltosas, mas no caso do Solo 1 com alta fração argilosas a utilização da Areia Grossa não favoreceu o carreamento de partículas. Esses comportamentos além de serem observados pela análise dos sólidos em suspensão, foram condizentes com os resultados ensaio de sólidos totais presentes no interior do material filtro realizado após o final do ensaio de percolação. A utilização da Areia Natural como material considerado adequado pelo

dimensionamento de material filtro foi indicada como a melhor opção geral na concepção de um filtro para uma obra de terra. Por fim, as análises das vazões de percolação, e dos sólidos em suspensão e totais contribuíram para compreensão da influência da granulometria do material filtro diante das práticas ideais de concepção.

Palavras-chave: Granulometria. Filtro. Material filtro. Material base. Areia. Drenagem. Filtragem. Percolação de água. Obras de Terra. Barragem. Pilhas. Carreamento de partículas. Escoamento interno de água.

ABSTRACT

PERIM, Ana Clara Ceschim, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2023.
Evaluation of granulometry of filter materials for earthworks. Adviser: Rejane Nascentes.

The particle size of a material says a lot about its behavior and the consequent predictions of its characteristic parameters. In the sizing of the particle size acceptance range for an earthworks filter material, particle size data of the base material are required for the certification of the permeability and retention criteria. How much a soil allows the percolation of a fluid is related to its ability to relieve the stresses of an earthworks. The analysis of the transport of particles to the inside of the filter allows the understanding of the emergence or not of a zone of self-filtering, clogging of fines, and infiltration of particles. This paper studies the difference in percolation behavior in four different base materials for two types of filter material. The characterization results indicate that Soil 1 has more than 60% of its composition from the clay fraction, Soil 2 has a large percentage of sand with a predominance of silt as fine portion, Soil 3 has almost 70% of its granulometry from sand, and Tailing used has a high percentage of silt constituents. As for the sands used as filter material, one called Natural Sand has more than 90% sandy fraction, while the other presents almost 60% sand and the rest gravel, and is called Coarse Sand. The main discussion of this study was given by performing a percolation test of each base material in contact with filter material where, in addition to the flow data collected, the outlet fluid is tested to measure the suspended particles carried with the flow. With the combination situations, it was observed that the more open granulometry of Coarse Sand was not satisfactory for the retention criterion when tested with materials with silty characteristics, but in the case of Soil 1 with a high clay fraction, the use of Coarse Sand did not favor the transport of particles. These behaviors, besides being observed by the analysis of suspended solids, were consistent with the results test of total solids present inside the filter material performed after the end of the percolation test. The use of Natural Sand as a material considered suitable for filter material sizing was indicated as the best general option in the design of a filter for an earthwork. Finally, the analysis of percolation flows, suspended solids and total solids contributed to the understanding of the influence of filter material particle size on optimal design practices.

Keywords: Granulometry. Filter. Filter material. Base material. Sand. Drainage. Filtering. Water percolation. Earthworks. Dams. Piles. Particle transportation. Internal water drainage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema para escolha do método com melhor aproximação real esperada.	33
Figura 2 - Condições de fluxo atuando em filtros.	36
Figura 3 - Dreno cego.	39
Figura 4 - Seção transversal de uma barragem de terra zoneada.	40
Figura 5 - Mecanismos de filtragem.	43
Figura 6 - Erosão interna e os seus níveis.	44
Figura 7 - Resumo com descrição de alguns dos critérios de filtros estabelecidos desde os estudos conduzidos por Terzaghi na década de 1920.....	47
Figura 8 - Ponto de coleta do Solo 1.	52
Figura 9 - Ponto de coleta do Solo 2.	53
Figura 10 - Ponto de coleta do Solo 3.	53
Figura 11 - Pontos de coleta dos solos base na UFV.	54
Figura 12 - Foto dos materiais base.....	55
Figura 13 - Foto dos materiais filtro.....	56
Figura 14 - Peneiramento do Solo 2.....	58
Figura 15 - Fluxograma das etapas de ensaio e suas conexões	59
Figura 16 - Exemplo de dimensionamento de filtro realizado para material base.	64
Figura 17 - Equipamento de Caneschi (2012).....	65
Figura 18 - Maquete de uma visão geral do equipamento de percolação.....	65
Figura 19 - Fluxograma dos procedimentos realizados no ensaio.	65
Figura 20 - Esquematização: corte do molde e detalhe da ranhura transversal.	66
Figura 21 - (a). Molde do corpo de prova preparado com bentonita nos frisos. (b). Aparelhagem e solo preparado e devidamente porcionado para compactação estática. (c). Compactação estática em andamento. (d). Corpo de prova sendo moldado na máquina de compressão estática.	67
Figura 22 - Esquematização: sistema radial e concêntrico de ranhuras, e ponto de entrada e saída de fluido na base.	68

Figura 23 - Esquematização: ponto de saída de fluido e purgador, ponto de saída de fluido, purgador e suporte para tubos de coleta na tampa.	68
Figura 24 - Ensaio em andamento no aparato de Caneschi (2012).	70
Figura 25 - Fluxograma dos procedimentos realizados no ensaio combinado.	73
Figura 26 - Fotos do molde construído para a nova célula de percolação proposta.	74
Figura 27 - Mecanismo criado para a adaptação da célula de interface (a) Foto do mecanismo utilizado (b) Imagem ilustrativa do posicionamento dos elementos de composição.	75
Figura 28 - Fotos da preparação do (a) material base – destorroamento, e do (b) material do filtro - lavagem.	76
Figura 29 - Foto do molde do corpo de prova devidamente preparado com bentonita e papel filtro	76
Figura 30 - (a) Compactação do material filtro em camadas. (b). Colocação do tecido de separação. (c). Compactação do material base em camadas. (d). Colocação do anel de borracha e bidim.	78
Figura 31 - Fotos do ensaio em andamento.	79
Figura 32 - Equipamentação de filtragem utilizado no ensaio de sólidos em suspensão.	82
Figura 33 - Foto das membranas do ensaio realizado na amostra MB03.	82
Figura 34 - (a) Retirada do material filtro do corpo de prova. (b) Lavagem do material filtro retido na base do corpo de prova. (c) Interface de contato material filtro e material base dividida com tecido de tule. (d) Retirada do material base do corpo de prova.	83
Figura 35 - Fotos do processo de lavagem do material filtro extraído de um corpo de prova ensaiado.	84
Figura 36 - Ensaio de sólidos totais.	84
Figura 37 - Curvas de compactação dos materiais base (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Rejeito.	86
Figura 38 - Curvas granulométricas dos solos estudados como materiais base.	87
Figura 39 - Curvas granulométricas dos solos estudados como materiais filtro.	89
Figura 40 - Resultados do ensaio de determinação de impurezas orgânicas em agregados.	90
Figura 41 - Gráfico dos intervalos proposto para material filtro de cada material base.	92

Figura 42 - Gráficos com os intervalos de material filtro para (a) Solo 1, Rejeito e Solo 2, (b) Solo 3.....	92
Figura 43 - Gráfico das curvas granulométricas dos materiais base e filtro.	93
Figura 44 - Gráficos dos intervalos de dimensionamento para o material base com os materiais filtro (a) Solo 1 (b) Rejeito (c) Solo 2 (d) Solo 3.....	94
Figura 45 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Solo 3.	95
Figura 46 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Solo 2.	96
Figura 47 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Solo 1.	96
Figura 48 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Rejeito. ...	96
Figura 49 - Curva de percolação do Solo 3 com areia natural.	102
Figura 50 - Curva de percolação do Solo 3 com areia grossa.....	103
Figura 51 - Curva de percolação do Solo 2 com areia natural.	104
Figura 52 - Curva de percolação do Solo 2 com areia grossa.....	104
Figura 53 - Curva de percolação do Solo 1 com areia natural.	105
Figura 54 - Curva de percolação do Solo 1 com areia grossa.....	105
Figura 55 - Curva de percolação do rejeito com areia natural.....	106
Figura 56 - Curva de percolação do rejeito com areia grossa.....	107
Figura 57 - Foto das partículas decantadas do fluido percolado no ensaio Rejeito com areia grossa.....	107
Figura 58 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 1 e areia natural.	110
Figura 59 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 1 e areia grossa.....	111
Figura 60 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 2 e areia natural.	112
Figura 61 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 2 e areia grossa.....	113
Figura 62 - Gráfico com os dados de turbidez fluido de ensaio rejeito e areia natural.	114
Figura 63 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio rejeito e areia grossa.....	115

Figura 64 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 3 e areia natural.	116
Figura 65 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 3 e areia grossa.....	116
Figura 66 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 1 e areia natural.	118
Figura 67 - Gráficos correlacionando a massa de sólidos em suspensão e a vazão de percolação por volume de poro percolado para os corpos de prova (a) MB01, (b) MB02 e (c) MB03.....	119
Figura 68 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 1 e areia grossa.....	119
Figura 69 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 2 e areia natural.	120
Figura 70 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 2 e areia grossa.....	121
Figura 71 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Rejeito e areia natural.	122
Figura 72 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Rejeito e areia grossa.....	122
Figura 73 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 3 e areia natural.	123
Figura 74 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 3 e areia grossa.....	124
Figura 75 - Fotos da retirada do material filtro de areia grossa do molde com (a,b) Solo 2 e (c) Rejeito.	125
Figura 76 - Fotografias ao microscópio do filtro de estudo de Neves e Caldeira (2021): a) areias finas e siltes grossos acumulados à superfície do filtro; b) siltes médios a grossos e alguma argila no interior do filtro; c) siltes finos a médios, vestígios de siltes grossos em suspensão na água que passou através do filtro.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ilustração da importância mundial da boa drenagem.....	27
Tabela 2 - Piping em barragens – causas principais.....	29
Tabela 3 - Valores típicos de condutividade hidráulica dos solos saturados.....	31
Tabela 4 - Tipos de solos e limitações associadas a cada autor e sua fórmula.	32
Tabela 5 - Quantitativo dos ensaios realizados com cada material proposto nesse trabalho.	58
Tabela 6 - Critérios para determinação da categoria do solo base.	61
Tabela 7 - Determinação do D_{15} máximo (critério de filtração ou retenção).....	61
Tabela 8 - Determinação do D_{15} mínimo (critério de permeabilidade).....	62
Tabela 9 - Determinação do mínimo D_5 e do máximo D_{100}	63
Tabela 10 - Critério de segregação.	63
Tabela 11 - Resumo dos resultados de caracterização dos materiais base	86
Tabela 12 - Limites de consistência dos solos estudados.....	87
Tabela 13 - Quantificação das frações granulométricas dos solos estudados.	88
Tabela 14 - Quantificação das porções das análises granulométricas dos solos estudados.	89
Tabela 15 - Resumo dos resultados de caracterização de todos os materiais trabalhados na pesquisa.	91
Tabela 16 - Critério de dimensionamento do material filtro para cada solo base.....	91
Tabela 17 - Análise descritiva dos ensaios de permeabilidade dos solos para cada repetição.....	97
Tabela 18 - Coeficientes de permeabilidade dos materiais granulares.	99
Tabela 19 - Composição de dados e moldagem dos corpos de prova solo base e areia natural.	100
Tabela 20 - Composição de dados e moldagem dos corpos de prova solo base e areia grossa.....	100
Tabela 21 - Dados médios de percolação para cada corpo de prova ensaiado.....	101
Tabela 22 - Dados médios de percolação para cada corpo de prova ensaiado.....	101

Tabela 23 - Valores médios da permeabilidade para os solos-base em suas diferentes combinações.....	108
Tabela 24 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 1 e areia natural.	110
Tabela 25 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 1 e areia grossa.	111
Tabela 26 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 2 e areia natural.	112
Tabela 27 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 2 e areia grossa.	112
Tabela 28 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Rejeito e areia natural.	114
Tabela 29 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 1 e areia grossa.	114
Tabela 30 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 3 e areia natural.	115
Tabela 31 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 3 e areia grossa.	116
Tabela 32 - Sólidos totais retidos nas amostras de material filtro de areia natural e grossa.....	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BR	Brasil
CMB	Código desta pesquisa para o corpo de prova combinado com areia grossa
CP	Corpo de prova
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
C _u	Coeficiente de uniformidade
CV	Coeficiente de variação
d ₁₀	Diâmetro correspondente a 10% passante nas peneiras de classificação granulométrica
d ₅	Diâmetro correspondente a 5% passante nas peneiras de classificação granulométrica
d ₈₅	Diâmetro correspondente a 85% passante nas peneiras de classificação granulométrica
D _{85B}	Dimensão das partículas do solo base onde passa 85% do material nas peneiras de classificação granulométrica
D _{15F}	Dimensão das partículas do filtro onde passa 15% do material nas peneiras de classificação granulométrica
D ₁₅	Diâmetro das partículas do filtro correspondente a 15% passante nas peneiras de classificação granulométrica
d ₁₅	Diâmetro das partículas do solo base correspondentes a 15% passante nas peneiras de classificação granulométrica
d ₈₅	Diâmetro das partículas do solo base correspondentes a 85% passante nas peneiras de classificação granulométrica
D _c *	Diâmetro da maior partícula que possivelmente poderia ser transportada através do filtro pelo fluxo de água
D ₅	Diâmetro das partículas do filtro correspondentes a 5% passante nas peneiras de classificação granulométrica

D60	Diâmetro correspondente a 60% passante de material filtro nas peneiras de classificação granulométrica
D100	Diâmetro correspondente a 100% passante de material filtro nas peneiras de classificação granulométrica
D90	Diâmetro correspondente a 90% passante de material filtro nas peneiras de classificação granulométrica
e	Índice de vazios
GC	Grau de compactação
i	Gradiente hidráulico
ICOLD	<i>International Commission of Large Dams</i>
IP	Índice de plasticidade
k	Coeficiente de permeabilidade
k ₂₀	Coeficiente de permeabilidade em 20°C
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LESA	Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
m	Massa
MB	Código desta pesquisa para o corpo de prova combinado com areia natural
MG	Minas Gerais
NA	Nível d'água
NAVFAC	<i>Naval Facilities Engineering Command</i>
NBR	Norma Brasileira
NPDP	<i>National Performance of Dam Program</i>
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
NTU ou UNT	Unidade nefelométrica de turbidez
OMS	Organização Mundial da Saúde
PVC	Polímero de adição policloreto de vinila
Q	Vazão
QA/QC	<i>Quality Assurance e Quality Control</i> : Controle e Garantia de Qualidade
S	Sul

S	Desvio padrão
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
US	<i>United State</i>
USC	<i>Unified Soil Classification</i>
USDA SCS	<i>United States Departament of Agriculture Soil Conservation Service</i>
V/2	Metade do volume
V_{pp}	Volume de poro percolado
V_v	Volume de vazios
W	Oeste
w	Umidade
w_{ot}	Umidade ótima
γ_{dmax}	Peso específico seco máximo
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade do fluido
#	Peneira

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 Considerações Gerais	21
1.2 Justificativa	22
2. OBJETIVOS	25
2.1 Objetivo Geral	25
2.2 Objetivos Específicos.....	25
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1 Importância da drenagem em obras de terra	26
3.2 Permeabilidade dos solos	30
3.2.1 Equações empíricas de determinação de permeabilidade	32
3.3 Drenagem	33
3.3.1 Sistema de drenagem interna.....	35
3.4 Filtros	39
3.4.1 Mecanismo de filtragem	42
3.4 Dimensionamento de filtro	45
3.4.2 Critérios de Terzaghi (1926).....	46
3.4.3 Critérios da USBR (1977)	47
3.4.4 Critérios de Sherard e Dunningan (1985 e 1989).....	48
4. METODOLOGIA	51
4.1 Materiais	51
4.1.1 Material da base	51
4.1.2 Material do filtro	55
4.2 Métodos	57
4.2.1 Preparação dos solos	57
4.2.2 Ensaios de caracterização.....	59

4.2.3 Dimensionamento do material filtro	60
4.2.4 Ensaio de permeabilidade	64
4.2.5 Ensaio de percolação com materiais combinados.....	72
4.2.6 Ensaio de análises de sólidos.....	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1 Caracterização.....	85
5.1.1 Materiais base	85
5.1.2 Materiais filtro	88
5.2 Dimensionamento do material filtro	91
5.3 Permeabilidade.....	95
5.4 Ensaio de percolação com materiais combinados.....	99
5.5 Análises de sólidos	109
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
6.1 Conclusões.....	126
6.2 Indicações de trabalhos futuros	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
APÊNDICE A.....	134

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Em um planeta onde 71% de sua superfície é coberta por água, o homem se desafia na busca de como controlar e descrever o comportamento desse componente essencial para a vida. No interior da Terra o nível d'água (NA) é definido com base na cota a partir da qual o solo possui saturação total, que acontece quando todos os vazios de um material estão preenchidos por água. A variação dessa cota de nível pode acontecer devido aos fatores naturais como a evaporação e a infiltração de água no solo, e às manobras temporárias como rebaixamento por bombeamento de água, carregamento de fundações e desconfinamento de maciços. Seu posicionamento influencia diretamente no comportamento do solo, em sua maioria relacionado ao aumento da sua resistência e deformabilidade.

A percolação de água em encostas pode reduzir a resistência ao cisalhamento do maciço por quatro fatores: 1) Pelo desenvolvimento de pressões neutras (poro-pressões) ao longo de superfícies potenciais de ruptura; 2) Pela redução da coesão aparente, devida à sucção, através do aumento da saturação dos solos não saturados; 3) Pelo aumento do peso específico do material (saturação do maciço); e 4) Pela ação erosiva interna (*piping*) e externa (BASTOS, 2006).

Os cálculos de dimensionamento de obras de terra, como por exemplo, fundações e muros de contenção, envolvem parâmetros do solo que variam principalmente devido a sua composição e estado. Atualmente, os estudos que tratam os solos em condição saturada estão mais avançados e permitem melhores previsões comportamentais, sendo, portanto, mais utilizados. Nesse caso, a aplicação de uma tensão num solo com água gera o desenvolvimento de poro-pressão que pode ser dissipada gerando um acréscimo de tensão no solo que, na maioria das situações, é responsável pelas rupturas e colapsos em obras de terra.

No caso das barragens, os projetos variam os graus de conservadorismo adotados. Geralmente essa definição de projeto leva em consideração o grau em que ocorre infiltração no interior do maciço, sendo essa infiltração controlada pela presença de filtros e drenos, pela utilização de enrocamento de drenagem livre no

aterro, e pelo controle nas fundações através de preenchimento, drenagem e construção de cortes (FELL et al., 2005).

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

Dos problemas observáveis em drenos de materiais granulares em barragens, destacam-se as patologias associadas: (1) ao carregamento de partículas finas através de materiais granulares, e (2) à incapacidade de drenar a água que percola pelo maciço, seja por mau dimensionamento ou devida à colmatção da estrutura. Tais fatores podem conduzir à formação de processos de erosão interna ou elevação do nível freático do maciço, respectivamente, podendo ambos acarretar a ruptura da barragem (PIMENTA FILHO, 2013).

Para que um projeto geotécnico seja dimensionado e executado com excelência, é necessária uma drenagem eficiente e segura. O dreno que possui um filtro bem dimensionado e um bom canal de direcionamento de fluxo consegue controlar as tensões do maciço sendo parte essencial do bom funcionamento e desempenho de uma estrutura de contenção de terra. Esta garantia advém da compreensão dos mecanismos de filtragem e dos critérios de dimensionamento difundidos.

1.2 Justificativa

Os primeiros estudos difundidos de dimensionamento de drenagem foram propostos por Terzaghi em 1926 que definiram valores ideais para correlações entre as porcentagens granulométricas do material do filtro e da base, afim de garantir a segurança quanto à permeabilidade e à estabilidade dos filtros e suas composições de drenagem. Os critérios de Terzaghi são válidos para solos não coesivos e uniformes. Consequente, pesquisas foram desenvolvidas em prol do aprofundamento deste estudo. Assim novos autores como Bertram (1940), USBR (1955), *US Corps of Engineers* (1941 e 1953) e Sherard et al (1984, a e b), contribuíram com definições levando sempre em conta os critérios clássicos.

A determinação do material filtro ideal para uma determinada obra de contenção depende inicialmente do material base sob o qual o filtro estará atuando. Usualmente, trata-se do material presente no local da obra, uma vez que sua mobilização é menos dispendiosa. Assim, com o auxílio de ensaios laboratoriais, obtém-se a composição granulométrica do material base.

Tecnicamente, os conceitos clássicos de dimensionamento indicarão qual é o intervalo da composição granulométrica ideal do material filtro para a curva granulométrica encontrada no material base. Esse dimensionamento garante a percolação da água sem que haja erosões, carreamento de partículas, colmatagem ou *piping*, além de apontar uma granulometria aceitável para escolha do material filtro. Isto é possível levando em conta a correlação do tamanho das partículas com a quantidade de vazios de um solo.

Sabendo então que a definição de uma composição granulométrica de um material filtro depende diretamente do material base, a utilização de diferentes materiais base permite uma análise comparativa tanto do material filtro indicado como também do comportamento desse material quanto a sua eficiência de drenagem. Justificando assim a utilização de mais de um tipo de material base nesta pesquisa.

Com os parâmetros dos materiais base escolhidos em mãos, a primeira possível diferenciação de cada filtro pode ocorrer no intervalo granulométrico definido no dimensionamento. Ainda no dimensionamento, outra diferenciação pode ocorrer nos ajustes dos valores de coeficiente de uniformidade definidos de acordo com a classificação do material base em questão. Já em termos da aplicação prática, a diferenciação do filtro pode ocorrer devido ao tipo de material arenoso disponível no mercado. Uma última diferenciação pode acontecer graças ao manuseio do material o que envolve a parte executiva de uma obra.

Enfim, compreende-se que para um mesmo material base pode ser adotado mais de um material filtro adequado tecnicamente. E do mesmo modo, um mesmo material filtro pode ser adequado tecnicamente para vários materiais base. Essa gama de determinantes abre possibilidade ao questionamento de até onde a diferenciação do material filtro dentro de um mesmo intervalo dimensionado garante o nível de infiltração desejado na drenagem de um material base.

Dentro de infinitas possibilidades de materiais base identificou-se a necessidade da análise da aplicação desse dimensionamento clássico em casos de projetos de empilhamento de rejeito. Por se tratar de uma estrutura envolvendo um

material proveniente do beneficiamento do minério, não pode ser classificado como solo despertando o questionamento se a utilização dos critérios de Terzaghi no dimensionamento do material filtro seria a mais adequada.

Atualmente, com a implementação de obra com novas finalidades, destinações e tecnologias, como o empilhamento de rejeito na mineração, muito se discute sobre a necessidade de dreno de fundo, de drenos intermediários e do nível de tensões às quais os materiais estão submetidos. Junto a esses questionamentos, acredita-se ser adequado uma otimização dos critérios clássicos que continuam em evidência e sendo amplamente utilizados.

Por fim, a definição das relações de permeabilidade entre o filtro e o material base permite uma discussão da eficiência da drenagem, se houve carreamento de partículas com o fluxo, se há tendência de colmatção no material filtro, e também qual a diferença do comportamento da permeabilidade de cada solo base em contato com diferentes filtros.

O incentivo às pesquisas das áreas de estudo é de imensa importância para a compreensão da natureza e seu comportamento. É desenvolvendo modelos, critérios e teorias que o meio acadêmico pesquisador garante o sucesso das obras de engenharia oferecendo assim qualidade de vida a todos beneficiados direta ou indiretamente. Por isso, cada contribuição merece seu mérito independente se adotado ou não por projetistas e pelo mercado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento drenante de diferentes solos combinados com dois tipos de filtros, considerando análises das composições granulométricas, permeabilidades e carreamento de partículas.

2.2 Objetivos Específicos

Visando alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a influência global da granulometria na determinação do coeficiente de permeabilidade;
- Analisar o comportamento de um material filtro, que esteja dentro do intervalo de dimensionamento proposto pelos critérios clássicos, para diferentes tipos de material base, sendo eles: solo argiloso; solo arenoso; solo siltoso; e rejeito de barragem;
- Avaliar, de maneira comparativa, os efeitos causados por diferentes composições do material filtro na capacidade de drenagem e eficácia de percolação da água;
- Avaliar o comportamento do material filtro disposto em contato direto com o material base, quanto a eficiência da drenagem, carreamento de partículas e colmatação do filtro, através de relações de fluxo e permeabilidade dos materiais;
- Propor indicações de cuidados na execução quanto à influência das práticas construtivas no desempenho de drenagem esperado segundo projeto, considerando o grau de interferência de alterações do material em termos da percolação de água e seu comportamento de fluxo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Importância da drenagem em obras de terra

A água é essencial para a vida em nosso planeta. Entretanto, muita quantidade em lugares errados sob condições erradas pode acarretar efeitos prejudiciais. Através de recordações históricas há evidências que fazem temer e respeitar o poder destrutivo da água. Ao ar livre, na forma de marés e inundações, é considerada uma das forças mais poderosas da natureza. Escondida nas falhas das rochas, nos poros dos solos e nos vazios das rochas e solos, sob atração da força da gravidade exerce forças que de instabilizam encostas de montanhas e destroem construções de engenharia. (CEDERGREN, 1988).

Os sistemas de drenagem constituem a principal defesa contra fluxos concentrados e preferenciais. Nas barragens homogêneas, além do controle do fluxo, eles são importantes para a estabilidade do espaldar de jusante, já que abatendo a linha freática, anulam-se os efeitos das poropressões de percolação em praticamente toda a região a jusante do eixo da barragem. Além deste benefício, a drenagem regulariza a saída do fluxo, tanto da própria barragem como da fundação, atenuando as pressões e disciplinando seu escoamento para jusante da barragem. Nas fundações muito permeáveis ou com feições preferenciais de fluxo, a drenagem é o elemento que proporciona o controle efetivo das pressões de saída d'água (SILVA, 2016).

A partir da Tabela 1 apresentada por Cedergren (1988), é possível observar que a prática da boa drenagem em obras de engenharia está diretamente relacionada ao nível de segurança da estrutura. Seja em qualquer uma das áreas de atuação ilustradas, as perdas causadas devido a uma drenagem deficiente geram prejuízos ambientais, financeiros e pessoais. Destacadamente, na quarta área de atuação é relatado que cerca de 90% de todas as falhas de barragens tem sido responsabilizada pelo descontrole da saturação e infiltração. Isso acontece uma vez que a falta de drenos ou mau dimensionamento deles desencadeia acréscimos de tensões e patologias nos projetos executados permitindo o desenvolvimento de falhas e prováveis rupturas que colocariam em risco não só os recursos naturais adjacentes como também as vidas humanas ao redor.

Tabela 1 - Ilustração da importância mundial da boa drenagem.

Área de atuação	Benefícios de boa drenagem	Perdas causadas pela má drenagem
Agricultura	Aumento da produção da colheita, colheita mais saudável; estação de crescimento mais longa; menos problemas de trabalhar em solo molhado	Acidez, alagamento, terra improdutiva, acumulação de sais prejudiciais, redução na produção alimentícia, destruição de muitas terras irrigadas; morte de muitas civilizações antigas; (perda anual é provavelmente mais que 200 bilhões de dólares, mundialmente)
Fundação de prédios	Estabilidade, estruturas secas abaixo do lençol freático; lajes de subsolo mais finas que resultam em economias financeiras e de recursos naturais	Subsolo molhado; lajes de subsolo com rachaduras e elevações; alto custo de manutenção e reparos
Mineração	Pilhas de descarte (barragens) secas e estáveis Encostas de minas a céu aberto estáveis	Base da mina (barragens) instável com algumas falhas que causam perda de vidas (desastre Buffalo Creek); operação ineficiente Falhas de taludes, perda de tempo e produção, danificação de equipamento, maiores riscos para os trabalhadores, custos de reparo para corrigir deslizamentos
Estruturas de represamento de água	Segurança, barragens estáveis, reservatórios, etc.; utilização mais eficiente dos recursos naturais na sua construção; menos reparos	Insegurança, estruturas instáveis cujas falhas frequentemente causam grandes perdas de vidas e propriedades (cerca de 90% de todas as falhas de barragens tem sido responsabilizada pela descontrolada saturação e infiltração)
Pavimentação	Duradouro, condução suave, "zero manutenção" da pavimentação para rodovias, aeródromos, estacionamentos, etc., que requeiram o menor uso de energia, combustível, e materiais de construção vitais.	Deterioração prematura e destruição de importantes pavimentações aproximadamente todo lugar na civilização mundial; custosos reparos e substituições com grandes inconvenientes aos usuários e vasto gasto de energia e recursos naturais; custo anual é provavelmente pelo menos 40 bilhões de dólares, mundialmente.
Encostas de rodovias, autoestradas, ferrovias, etc.	Estabilidade, taludes seguros com mínimas falhas e serviço de perturbação	Deslizamento, escorregamento, e colapso total colocam muitas vezes transportes importantes e outras instalações fora de serviço, com perda de vidas, danos materiais e altos custos de reparação.
Campos esportivos, campos de atletismo, estádios, etc.	Durabilidade, sem influência nas performances	Falha prematura a partir das ações de deterioração ambientais, de acordo com o volume de geada; e ações de tráfego.

FONTE: CEDEREGREN, 1988.

A utilização do termo obras de terra no meio técnico da engenharia permite englobar desde estruturas de baixo nível de complexidade como movimentação de terras até estruturas de alta complexidade como barragens, muros de contenção de

grandes dimensões e atualmente empilhamento de rejeito, rejeito com estéril, e estéril. Independentemente do projeto, a água tem grande importância e deve ser levada em consideração nas análises e previsões comportamentais. Nos últimos anos, no estado de Minas Gerais – BR, houveram catástrofes de rompimento de barragens salientando a necessidade de uma fiscalização e maior atenção quanto aos graus de segurança projetados e adotados em obras de terra, principalmente barragens de rejeito.

As atividades mineradoras geram uma grande quantidade de resíduos. Dentre os mais volumosos, destacam-se os resíduos resultantes de processos de extração (o estéril) e os de beneficiamento (os rejeitos). Os processos de beneficiamento do minério visam extrair os elementos de interesse econômico (produto final). Eles têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final. Os procedimentos empregados são muito variados, pois dependem basicamente do tipo e da qualidade do minério a ser extraído (IPEA, 2012). Esses resíduos são depostos em pilhas formando as chamadas pilhas de rejeito, pilhas de estéril ou pilhas mistas. Atualmente essas estruturas consideram os dimensionamentos e premissas das obras de terra, incluindo também a utilização de drenagem para garantir o grau de segurança de projeto.

A percolação sob uma barragem não só leva à perda de água represada, mas também pode afetar as fundações pela elevação da pressão da água percolada e pela erosão onde a infiltração é descarregada, no lado a jusante da barragem. A erosão progressiva em rochas brandas ou solos carregados ao longo dos caminhos do fluxo produz *piping*, o que pode colocar a barragem em perigo. O gradiente hidráulico crítico no qual tem-se maior risco é de aproximadamente 1 para 1. Afim de diminuir o gradiente para no máximo 1 para 4 e também reduzir a percolação, os caminhos de fluxo do reservatório devem ser aumentados em comprimento pela construção de uma barreira impermeável antes, abaixo ou a montante da barragem; pode ser uma camada de argila no fundo do reservatório, uma cortina de argamassa injetada na área saturada abaixo da barragem ou uma represa construída ao lado de jusante. Um filtro de cascalho graduado na saída para a infiltração deve ser adicionado para evitar a lavagem de material fino (McLEAN & GRIBBLE, 1985).

A Tabela 2, a seguir, foi retirada do livro das 100 Barragens Brasileiras (Cruz, 2014) e relata uma estatística das causas principais de *piping* em barragens a partir de um levantamento de 49 casos ocorridos em barragens construídas entre 1890 e

1978 exposto por Hsu no Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação em Estocolmo, 1981.

Destacado na Tabela 2 temos as causas citadas que estão diretamente relacionadas com o filtro de uma barragem. Em termos percentuais, mais de 40% das causas de *piping* em barragens estão relacionadas a deficiências de drenagem, o que enfatiza a necessidade e importância do estudo quanto ao comportamento da drenagem nos filtros e ao seu dimensionamento.

Um bom dimensionamento do mecanismo de drenagem adotado em um projeto envolve desde a etapa análise do terreno, proposição estrutural, estudo hídrico do local, disposição e acesso aos materiais dimensionados e execução do projeto proposto como um todo. A complexidade de uma obra inteligente agrega planejamentos e previsões para situações pré, durante e pós efetivação.

Tabela 2 - Piping em barragens – causas principais.

Causas conhecidas	Nº de casos	% relativa
Trincas devido a recalques diferenciais	3	17,6%
Trincas horizontais devido a adensamento de núcleo	1	5,8%
Argila erosiva do núcleo	1	5,8%
Trincas transversais devidas à compactação irregular do enrocamento	1	5,8%
Trincas no núcleo e no filtro devido ao excesso de finos no filtro	3	17,6%
Transições e filtros inadequados – gradientes elevados	1	5,8%
Filtro mal graduado e segregado	1	5,8%
Ruptura de laje de concreto a montante	1	5,8%
Concentração de gradientes elevados devido a descontinuidade da fundação	2	11,8%
Fissuras na rocha de fundação	1	5,8%
Material erodível, juntas abertas na rocha, filtro inadequado e de baixa permeabilidade	1	5,8%
Tapete de montante sobre fundação em cascalho e blocos de rocha	1	5,8%
	17	100%

FONTE: CRUZ, 2004.

Com base nas informações relatadas pelo *National Performance of Dams Program* (NPDP), como um estudo para um workshop sobre infiltração em barragens de terra, as barragens de aterro frequentemente apresentam problemas de infiltração no estágio de enchimento do reservatório. Além disso, os danos por infiltração aumentam à medida que a idade da estrutura aumenta devido às alterações estruturais. Como o NPDP declarou, até 162 incidentes nas barragens incluíram penetrações ou saídas de fluxo. Os primeiros 54% dos incidentes nas barragens ocorreram nos últimos dois séculos e os segundos 46% dos incidentes ocorreram no século passado. A infiltração ou *piping* causou até 65 incidentes e 57 incidentes

ocorreram por causa das alterações. Cerca de 41 incidentes de barragem relacionam a infiltração com distorções nos drenos, e geralmente esta taxa deve ser menor (ZEDAN et al, 2017).

Especificamente em relação às estruturas de drenagem, seja de pequena seja de grande magnitude, o estudo hídrico, dimensionamento adequado e acompanhamento de percolação da água, juntos proporcionam uma obra segura e otimizada dentro dos padrões utilizados hoje na engenharia civil.

3.2 Permeabilidade dos solos

Permeabilidade, ou coeficiente de permeabilidade (k) é uma das propriedades dos materiais mais complexas que os engenheiros, hidrólogos e profissionais de águas subterrâneas tem que lidar. Por poder variar em um intervalo de potências de 10, seu significado real pode ser de difícil entendimento, existindo muitos equívocos sobre o que é um material "permeável", o que é um bom material de drenagem, o que é um material "impermeável", e assim por diante (CEDERGREN, 1988).

Alguns parâmetros do solo podem influenciar na definição de sua permeabilidade em diferentes níveis de importância. São alguns deles: a granulometria, o índice de vazios, a estrutura, e a saturação. Na granulometria o tamanho e uniformidade das partículas que constituem os solos influenciam no valor de k , uma vez que as partículas finas tendem a se encaixar sobre os vazios das outras com o passar do fluido, impedindo assim a percolação pelo vazio que antes existia no espaço preenchido. O índice de vazios pode ser relacionado com a porosidade efetiva do solo e consequentemente com a quantidade de vazios que ele tem e por onde o fluido pode percolar. Estruturalmente, o arranjo das partículas determina a atuação de forças capilares e moleculares que dependem da forma das partículas. A saturação indica quanto de fluido se encontra nos poros e que pode oferecer maior ou menor dificuldade de percolação, sendo esse fluido normalmente a água, com ou sem gases dissolvidos.

O formato das partículas está diretamente relacionado a velocidade com que o fluido consegue passar por elas, quanto mais arestas possuir, maior é o atrito de contato e consequente menor velocidade de percolação. Quanto ao fluido de percolação, suas propriedades também influenciam em como ele irá se mover entre as partículas do solo. Uma característica de grande influência neste caso é a

viscosidade que se relaciona proporcionalmente com a resistência de escoamento do fluido, e pode variar com a temperatura. O calor ocasiona uma agitação das moléculas diminuindo a intensidade da ligação entre elas e consequente viscosidade.

As condições de percolação do fluido podem ser denominadas como turbulentas ou laminares. Para o comportamento laminar, uma das correlações mais utilizadas para a determinação da permeabilidade é a Lei de Darcy, Equação 1, onde Q é a vazão, i é o gradiente hidráulico e A é a área transversal de percolação.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (\text{Equação 1})$$

A permeabilidade dos solos, também conhecida como condutividade hidráulica, é normalmente expressa em potência de 10 e varia de um solo para o outro. Entretanto, dentro de uma classificação generalista dos solos, Das (2007) definiu um intervalo de valores típicos de condutividade hidráulica para os tipos de solos saturados, destacado na Tabela 3. Apesar de direcionar-se pelos dados tabelados, na condução de uma pesquisa a validação das permeabilidades dos materiais utilizados deve ser considerada.

Tabela 3 - Valores típicos de condutividade hidráulica dos solos saturados.

Tipo de solo	k (cm/s)
Pedregulho limpo	$10^2 - 1$
Areia grossa	$1 - 10^{-2}$
Areia fina	$10^{-2} - 10^{-3}$
Argila de silte	$10^{-3} - 10^{-5}$
Argila	$< 10^{-6}$

FONTE: DAS, 2007.

Para se considerar os efeitos da temperatura nos ensaios de permeabilidade desenvolveu-se uma convenção na qual o coeficiente de permeabilidade é expresso sempre à temperatura de 20°C. Desta forma, registra-se a temperatura na qual foi realizado o ensaio e em seguida calcula-se o coeficiente referente à temperatura de 20°C, multiplicando o resultado obtido pela razão da viscosidade na temperatura de ensaio pela viscosidade a 20°C.

É importante sempre lembrar que quando se atingem elevados valores de compactação, a consequente redução do índice de vazios pode afetar a facilidade de

percolação do fluido, diminuindo o valor do coeficiente de permeabilidade. Portanto, além dos parâmetros do solo, os parâmetros de projeto e ensaio devem ser levados em consideração.

3.2.1 Equações empíricas de determinação de permeabilidade

Com o avanço dos estudos sobre a condutividade hidráulica e a influência dos parâmetros do solo na percolação, surgiram modelos empíricos de cálculo e previsão do coeficiente de permeabilidade para solos granulares com escoamento laminar. Com base em regras granulométricas e critérios de aceitação, foi possível o desenvolvimento de estudos para determinar através das equações empíricas difundidas, os valores de k esperado para o material.

Segundo Dias (2015), da totalidade das 45 equações conhecidas para a determinação empírica do coeficiente de permeabilidade apenas 7 se consideram adequadas aos materiais arenosos, não coesivos, e saturados, próprio dos filtros. Sendo elas e seus critérios apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos de solos e limitações associadas a cada autor e sua fórmula.

	Tipo material	d ₁₀ (mm)	d ₁₀ /d ₅	C _u	e
Hazen-Taylor (e)	Areia Uniforme	0,1 - 3	-	≤5	-
Terzaghi	Areia	-	-	-	-
Kozeny-Carman	Qualquer	-	-	-	-
Navfac DM7	Areia e Gravelha	0,1 - 2	1,4	2 - 12	0,3 - 0,7
Shahabi et al.	Areia	0,15 - 0,59	-	-	0,38 - 0,73
Mbonimpa et al.	Qualquer	-	-	-	-
Chapuis	Natural $I_p=0$	0,003 - 3	-	-	0,3 - 1

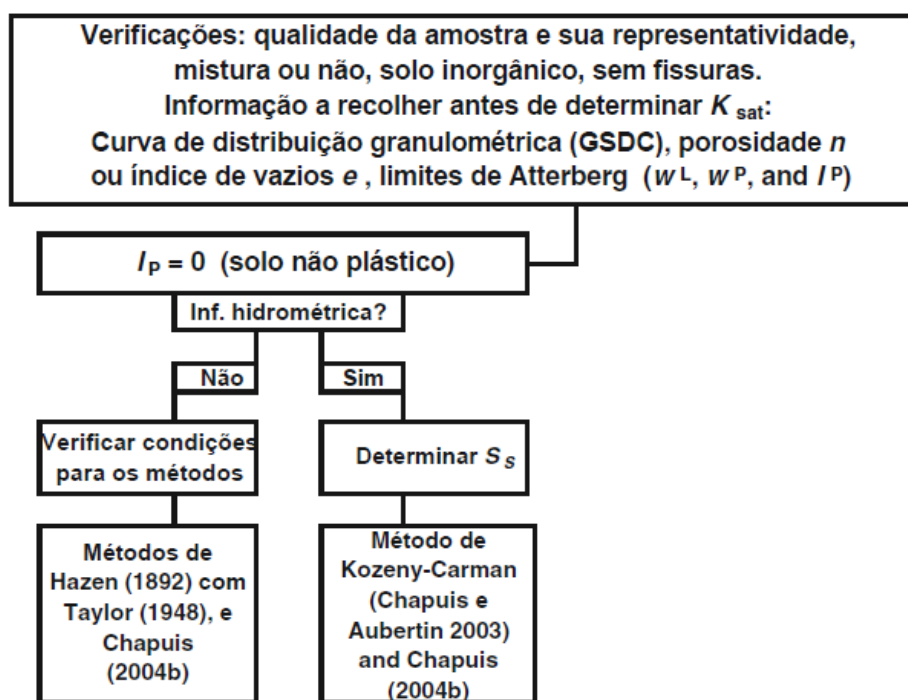
FONTE: DIAS, 2015.

A equação de Hazen foi comparada com a equação do *Naval Facilities Engineering Command* (NAVFAC). A capacidade preditiva das duas equações é avaliada usando dados laboratoriais publicados para amostras de areia e cascalho homogeneizadas, com um diâmetro efetivo entre 0,13 e 1,98 mm, com razão de vazios no intervalo de 0,4 e 1,5. Assim, Chapuis propôs em seu trabalho uma equação de melhor ajuste em um gráfico do logaritmo de k versus o logaritmo de $D_{10}^2 e^3 / (1 + e)$ (NOGUEIRA, 2019).

Na Figura 1, é apresentado um esquema, que com base em alguns estudos realizados sobre o material granular, diz quais as equações mais apropriadas a utilizar, sendo, portanto, desejável o conhecimento de toda a informação possível. Para um

caso em que seja conhecida a curva granulométrica, índice de vazios e limites de Atterberg, é possível, para um solo não plástico, determinar a superfície específica e consequentemente aplicar o método de Kozeny-Carman para a determinação de k (DIAS, 2015).

Figura 1 - Esquema para escolha do método com melhor aproximação real esperada.



FONTE: Chapuis, 2012 *appud* DIAS, 2015.

Os modelos propostos por estas equações empíricas não têm a precisão tão perto do real a ponto de substituir os ensaios de laboratório prescritos em normas regulamentadoras, como a NBR 13292 - Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, mas podem ser implementados em fases preliminares de projetos em obras de drenagem, agilizando etapas e oferecendo uma estimativa de resultados até que possam ser comparados aos mais precisos.

3.3 Drenagem

A drenagem é um elemento presente em diversos cenários variando desde o reflorestamento à construção de barragens. Ela tem a finalidade de conduzir e controlar um fluxo e é dividida em dois grupos de acordo com sua utilização. Sendo o primeiro chamado de drenagem externa, ou superficial, e o segundo de drenagem interna, ou profunda. Existe também a utilização do terreno drenagem natural para

estruturas que exercem função drenante em um meio, mas não é proveniente de intervenções humanas, como por exemplo, depressões em rochas e vegetações nativas características. Atualmente, a drenagem se associa em sua grande maioria ao fluxo de água.

A drenagem externa tem a função de captar, conduzir e dar destino final adequado às águas captadas superficialmente. As soluções que envolvem o escoamento superficial são divididas em dois subsistemas: o sistema de micro-drenagem, formado por valetas, calhas e canaletas, além dos dissipadores de energia e as caixas coletoras; e o sistema de macro-drenagem, formado por galerias subterrâneas e canais, completado por rios, lagos e pelo mar, que recebe todo o volume escoado. Esses subsistemas recebem tratamentos diferenciados pelos setores responsáveis pela sua execução e conservação (BANDEIRA, 2003).

A presença na drenagem superficial de estruturas de redução de velocidade e de revestimento dos drenos são procedimentos essenciais para garantir sua eficiência, atuando no sentido de evitar o assoreamento e a erosão. Os drenos podem ser revestidos com: (a) pedregulhos fixados sem argamassa (enrocamento); (b) pedregulhos fixados com argamassa ("pedras de mão"); (c) geotêxteis revegetados (fibras fixadoras do solo e facilitadoras da revegetação); (d) gabiões (estruturas armadas preenchidas por pedras entre outros); (e) sacos com mistura de solo-cimento e água; (f) concreto (MINTER & IBAMA, 1990; MCA, 1998 *appud* SILVA *et al*, 2018).

O controle da erosão exige a caracterização dos fatores e mecanismos relacionados às causas do desenvolvimento dos processos erosivos. Assim, o primeiro ponto a ser considerado são os locais onde há maior concentração de erosões lineares, pois esses locais consistem em zonas de convergência dos fluxos superficial e subterrâneo (no caso de cabeceiras de cursos d'água), havendo assim uma interação sinérgica favorável aos processos causadores de incisões sobre vertentes. Em função dessa característica, áreas de cabeceira de drenagem devem ser consideradas como áreas de risco de erosão e, portanto, de formação de voçorocas (FILIZOLA *et al*, 2011).

A vegetação presente no solo superficial tem grande influência no comportamento da água de chuva uma vez que com a retirada da cobertura vegetal, o solo fica exposto à erosão hídrica que é caracterizada por processos que se dão em três fases: desagregação, transporte e deposição. A precipitação que atinge a superfície do solo inicialmente provoca o umedecimento dos agregados, reduzindo

suas forças coesivas. Com a continuidade da chuva e o impacto das gotas, os agregados são desintegrados em partículas menores. A quantidade de agregados desintegrados cresce com o aumento da energia cinética da precipitação, que é função da intensidade, da velocidade e do tamanho das gotas da chuva. O transporte propriamente dito do solo somente começa a partir do momento em que a intensidade da precipitação excede a taxa de infiltração. Esta por sua vez, tende a decrescer com o tempo, tanto pelo umedecimento do solo como pelo efeito decorrente do selamento superficial provocado, em especial, pelo impacto das gotas de chuva. Uma vez estabelecido o escoamento, a enxurrada se move morro abaixo, podendo concentrar-se em pequenas depressões, mas sempre ganhará velocidade à medida que o volume da suspensão e a declividade do terreno aumentarem. Com isto a sua capacidade de gerar atrito e desagregação se ampliam à medida em que a enxurrada se movimenta, diminuindo, portanto, a infiltração da água no solo e aumentando o escoamento superficial, dependendo da intensidade da chuva (FILIZOLA *et al*, 2011).

Já a drenagem interna pode ser classificada como toda aquela não superficial, como ponteiros filtrantes, poços profundos, drenos verticais de alívio, trincheiras drenantes, drenos sub-horizontais profundos, galerias e túneis. São essas estruturas utilizadas com maior frequência na estabilidade de encostas, no rebaixamento temporário do lençol freático, e no adensamento de argilas moles saturadas.

Cedergren (1988) sugeriu que o controle do lençol freático e percolação da água, através da drenagem profunda, é um bom método para melhorar a estabilidade de taludes, pois com a retirada da água as pressões neutras diminuem e a resistência ao cisalhamento do solo aumenta, melhorando a estabilidade do talude.

3.3.1 Sistema de drenagem interna

A erosão interna é caracterizada essencialmente pelo movimento de partículas através do solo, como consequência da desestabilização do equilíbrio de forças na matriz do solo. O desequilíbrio ocorre quando as forças de atrito que tendem a arrastar as partículas, geradas pela percolação da água, se tornam maiores do que aquelas que resistem ao movimento. Destacando que o gradiente hidráulico tem uma relação direta com a intensidade dessa força de atrito (SILVA, 2016).

Um sistema de drenagem interna de uma obra de terra é proposto a partir da força de água que está atuando no maciço. O desenvolvimento dessa força está diretamente relacionado ao fluxo e à percolação de água na estrutura. Para classificar

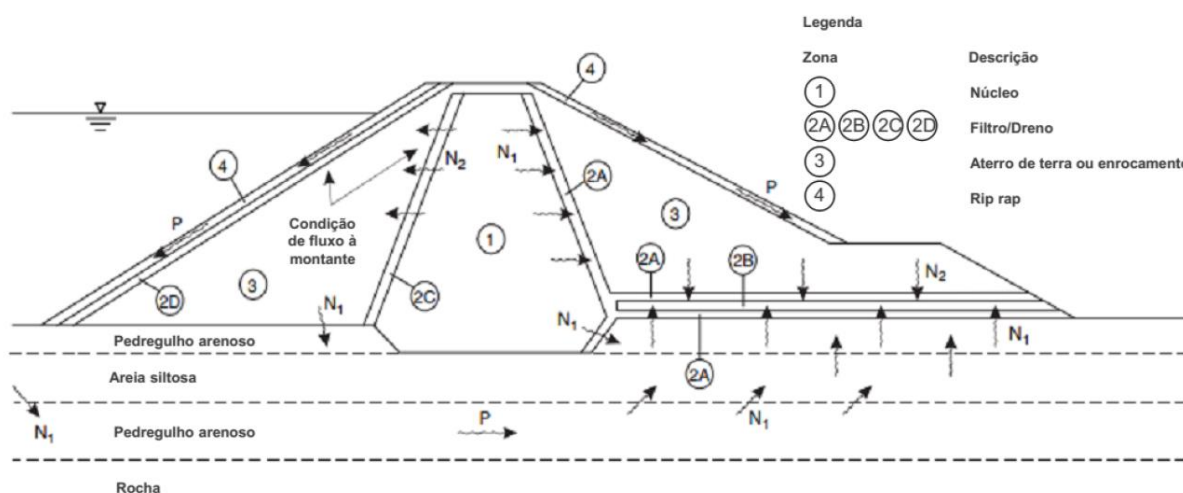
o tipo de fluxo, dá-se origem a um zoneamento classificados como críticos e não-críticos. Essa definição traduz uma associação do grau de carregamento atuante no filtro e consequente chance de risco.

Na Figura 2 são ilustradas as condições básicas de fluxo que podem ocorrer entre um filtro e um solo base. Há então (FELL et al, 2005):

- N1: Fluxo normal ao solo base e interface do filtro com potencialmente altas condições de gradientes; por exemplo na face jusante do núcleo do aterro, no contato entre o dreno horizontal e a fundação, e entre a fundação onde a infiltração está atravessando.
- N2: Fluxo normal ao solo base e interface do filtro com baixas condições de gradientes; por exemplo na face montante do núcleo do aterro sob condições de rebaixamento do reservatório, ou no interior da parte de cima da zona 2A do filtro para drenos horizontais.
- P: Fluxo paralelo à interface; por exemplo na base das camadas do rip-rap, ou na fundação onde a infiltração está percorrendo.

A erosão é maior para casos de N1, e menor para N2 porque para N2 o fluxo é drenado do solo base sob gravidade, não sob o topo do reservatório de água. A erosão no caso de P é diferente e também menos severa que para N1. Como um resultado menos conservador (e, portanto, mais grosseiro) de filtro pode ser utilizado para casos de N2 e P como de N1. Maioria dos filtros críticos está em condições de fluxo N1, e os filtros não-críticos estão em condições de fluxo N2 ou P (FELL et al, 2005).

Figura 2 - Condições de fluxo atuando em filtros.



FONTE: FELL et al, 2005.

Considerando as tensões do maciço, existem elementos de drenagem que combinados compõem a estrutura de filtro segundo os requisitos necessários de projeto. Individualmente, os elementos para caso de barragens são definidos como dreno vertical ou inclinado, dreno horizontal e dreno de saída ou de pé, trincheira drenante na fundação das ombreiras, furos de drenagem e poços de alívio na fundação.

Os sistemas de drenagem constituem a principal defesa contrafluxos concentrados e preferenciais. Nas barragens homogêneas, além do controle do fluxo, eles são importantes para a estabilidade do espaldar de jusante, já que abatendo a linha freática, anulam-se os efeitos das poropressões de percolação em praticamente toda a região a jusante do eixo da barragem. Além deste benefício, a drenagem regulariza a saída do fluxo, tanto da própria barragem como da fundação, atenuando as pressões e disciplinando seu escoamento para jusante da barragem. Nas fundações muito permeáveis ou com feições preferenciais de fluxo, a drenagem é o elemento que proporciona o controle efetivo das pressões de saída d'água (SILVA, 2016).

Cruz (2004) e Eletrobrás (2003) relacionam as seguintes recomendações a serem adotadas em projeto de sistemas de drenagem interno de barragens:

- O dreno vertical (ou inclinado) deve se estender por toda a extensão longitudinal da barragem e até a elevação do nível d'água máximo normal de operação do reservatório. O dreno vertical só é recomendável para barragens até 20,0m (máximo de 30,0m), por questões de concentração de tensões no mesmo. Para barragens maiores, deve-se adotar o dreno inclinado;
- A espessura do dreno vertical (ou inclinado) é função do método construtivo e dos equipamentos de construção. De qualquer forma, não deve ser inferior que 0,6 a 0,8m, para prevenir qualquer falha devido à contaminação do solo adjacente;
- O dreno horizontal não deve ter espessura superior a 2,0m, por motivos econômicos. Em casos de maiores vazões, deve-se recorrer ao dreno-sanduíche. Por razões construtivas, o valor mínimo da espessura desse dispositivo é de 0,25m;
- O dreno de saída ou pé deve ter altura, no mínimo, igual a duas vezes a espessura do dreno horizontal, e largura de crista mínima de 4,0m;

- Trincheiras drenantes, na fundação de ombreiras, devem ter largura mínima de 0,6 a 0,8m e profundidade máxima de 3,5m;
- Furos de drenagem devem ser executados em uma só linha e com espaçamento médio de 3,0m até a profundidade ditada pelas condições de fundação.
- No dimensionamento final, às espessuras requeridas pela capacidade drenante deverão ser adicionadas espessuras consideradas contamináveis pelo material de base (material a ser protegido).

Na maioria das vezes, o fluxo pela fundação das barragens pode ser dominante, sendo superior ao fluxo pelo maciço compactado. O dreno horizontal, neste caso, tem a função principal de controlar o fluxo pela fundação e não de direcionar o fluxo do maciço ou dreno vertical, para jusante da barragem. Para seu melhor desempenho, o dreno horizontal deve ser contínuo e revestir toda a área da fundação e ombreiras (SILVA, 2016). Além de disso deve contar com um projeto de vedação da fundação da barragem.

Cruz (2004) faz uma observação prática da avaliação da quantidade de água de percolação que pode ser admitida pelo conjunto maciço-fundação de barragens. Esta informação é de grande valia em projetos e monitoramento de barragens, pois engenheiros e projetistas podem orientar-se quanto a valores de referência na avaliação de riscos e limites das estruturas. A quantificação é feita com base na finalidade da barragem. Assim, como dados básicos, barragens para controle de cheias ou para hidroelétricas não devem ter vazão superior a 5,0l/min por metro de barragem, e barragens para abastecimento de água e irrigação não devem ter vazão superior a 0,1% da média das vazões naturais.

É importante o conhecimento dos fenômenos que ocorrem com o mau funcionamento dos filtros, mais especificamente, a erosão interna, que pode ser o resultado de uma ultrapassagem do gradiente hidráulico crítico dados a partir de redes de fluxo, e a ruptura hidráulica, como resultado de um deficiente alívio de pressões intersticiais. A erosão interna representa o arraste de partículas que ocorre no interior dos materiais de aterro, ou seja, uma erosão mecânica originada, devido à existência de uma elevada carga hidráulica, o que pode ser também representado por uma ultrapassagem do gradiente crítico. O prolongamento deste fenômeno, em conjunto com a percolação contínua, leva à origem do *piping* (DIAS, 2015).

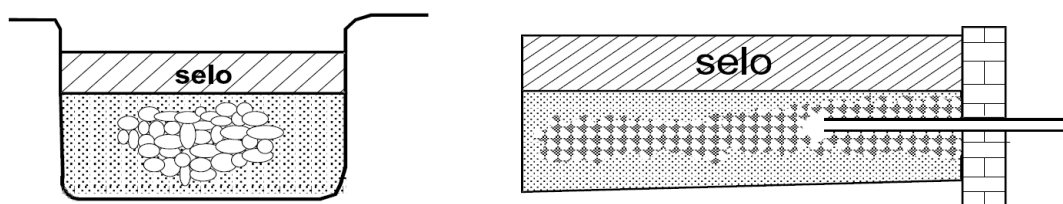
3.4 Filtros

A palavra filtro é comumente vinculada socialmente, não se restringindo apenas ao meio técnico, e seu significado universal tem a mesma essência. Significa “algo que seleciona”. No caso de obras de terra, ele é muito utilizado para se referir à estrutura de filtragem que selecionam a passagem da água e direcionam à um canal condutor de recolhimento, o dreno. Também acontece da estrutura drenante ser constituída inteiramente de material filtro e ser nomeada com sua finalidade de projeto, por exemplo, dreno vertical.

Os filtros são dimensionados para impedir o arrastamento de solos. Os drenos são dimensionados para escoar a água, mantendo os materiais a jusante secos. A combinação de filtros e drenos constitui uma boa solução de drenagem das barragens (ANA, 2014).

Um exemplo da presença de filtro e dreno, ou tubo de dreno, numa mesma estrutura é o dreno cego (Figura 3) que é composto de uma valeta revestida com material filtrante e de um seguimento de tubo perfurado, colocado na saída do dreno. Sobre o material filtrante é instalado o material impermeável, normalmente constituído por argila ou plástico (selo) (FILIZOLA *et al*, 2011).

Figura 3 - Dreno cego.



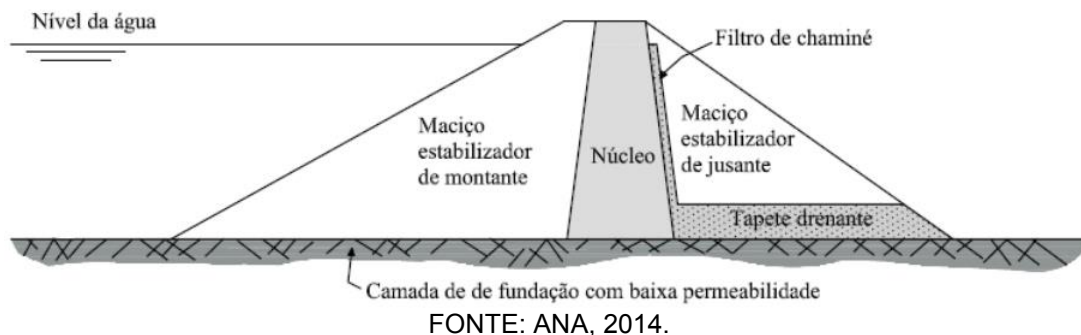
FONTE: FILIZOLA *et al*, 2011.

Para o caso de estruturas profundas, a Figura 4 ilustra uma seção transversal de uma barragem de terra destacando a presença de um filtro, nesse caso específico filtro chaminé devido ao seu formato e posição no zoneamento, e de um dreno, nesse caso específico tapete drenante. Toda essa estrutura em conjunto garante a dissolução da rede de fluxo da barragem e direcionam a percolação da água pelo caminho preferencial drenante idealizado sem que haja colmatção ou carreamento de partículas de montante à jusante da barragem.

Segundo a ANA (2014), as zonas drenantes, como as apontadas na Figura 4, constituem o sistema de drenagem interna da barragem e servem para conduzir a

água que atravessa a zona de montante do barramento, da fundação e das ombreiras para jusante sem provocar danos na barragem.

Figura 4 - Seção transversal de uma barragem de terra zoneada.



Na transição do aterro para os enrocamentos de revestimento do paramento de montante e para os dispositivos drenantes deverão ser colocados filtros devidamente dimensionados. Os materiais para filtros e drenos devem, em geral, ser materiais obtidos por britagem, devido aos materiais naturais se encontrarem, em regra, demasiado contaminados. Não havendo materiais disponíveis para filtros, sendo o sobre custo relativo à sua aquisição e transporte elevado, poderá ser equacionada a utilização alternativa de geossintéticos em zonas não críticas da barragem, em substituição dos materiais naturais (ANA, 2014).

Os filtros devem ser dimensionados para atender aos critérios básicos de retenção e permeabilidade, que a princípio parecem ser critérios antagônicos. No entanto, estas condições supõem que as dimensões dos vazios no material do filtro devem ser suficientemente pequenas para reter as partículas maiores do material protegido e, ao mesmo tempo, o material deve ter permeabilidade suficiente para impedir a indução de forças elevadas de percolação e pressões hidrostáticas aplicadas aos filtros (SILVA, 2016).

O material de filtro tem como característica, ser um solo granular e sem coesão. Normalmente tem sua granulometria variando desde areia fina até pedregulhos. O que define o material final a ser utilizado é o intervalo de dimensionamento proposto a partir da granulometria do solo base, ou seja, o solo que será protegido pelo filtro. Buscando otimizar os custos e a mobilização para execução do filtro, uma congruência da granulometria do material arenoso oferecido no mercado ao intervalo granulométrico dimensionado pelos critérios clássicos de cálculo

apresenta-se muitas vezes como um dos pré requisitos para a tomada de decisão final quanto ao material filtro deverá ser utilizado em uma obra de terra.

A segurança necessária nas barragens e a regulamentação cada vez mais presente impulsionaram grandes avanços na geotecnia, no estudo dos materiais de aterro, nos ensaios laboratoriais, nos equipamentos envolvidos, nas técnicas de impermeabilização, aproveitamento dos materiais, integração paisagística e adaptação a fundações menos resistentes, algo que pode ser agora analisado previamente e com maior certeza com programas de modelação que recorrem a elementos finitos, conseguindo assim prever-se de forma mais realista o que poderá ocorrer. Nos filtros, a caracterização do seu material e respectivo coeficiente de permeabilidade, permite a estimativa das infiltrações e consequente capacidade de vazão, aspecto que mais peso terá no seu dimensionamento, pois este parâmetro, além da dependência direta do coeficiente de permeabilidade, define o modo como ocorrerá a percolação na barragem de aterro (DIAS, 2015).

Colmatação é a obstrução dos vazios de um material drenante, com consequente diminuição de sua permeabilidade. Ela pode ser causada pela precipitação de óxidos ferrosos ou pelo carreamento de finos do material à montante do filtro. No caso de problemas com drenagem interna o seu reparo é muito difícil e oneroso, e geram-se incertezas com relação ao fluxo através da rocha (MARTINS, 2012).

Os filtros de drenagem, cujo propósito é interceptarem a água percolada pela barragem e sua fundação, são sujeitos a níveis de vazão bastante elevados. A sua composição é feita à base de materiais uniformemente graduados, requerendo, no entanto, o controle do movimento de partículas e a drenagem, como ocorre por exemplo nos drenos de pé. Geralmente associados aos filtros de drenagem, tem-se os filtros invertidos que funcionam em tudo de igual modo, mas apenas na situação de esvaziamento da barragem. Por outro lado, os filtros de proteção, como o nome indica, protegem o material base da erosão, ao mesmo tempo que permitem a drenagem, permitindo assim que se mantenham controladas as pressões intersticiais instaladas a montante. Do mesmo modo que os filtros anteriores, têm uma graduação uniforme, mas também podem ser bem graduados, pois situam-se usualmente em barragens zonadas e fazem fronteira com o núcleo, ou zonas mais argilosas com presença de alguns finos. Por fim, existem os filtros antifissuras, que são a última linha de defesa, no caso de alguma fissura ou rotura que ocorra como consequência de um

sismo ou excesso de carga. São compostos por material granular e de preferência sem finos. Uma primeira zona pode conter ou permitir a propagação da fissura e uma segunda zona, composta por material capaz de fazer a transição do material fino para o mais grosseiro. Estes filtros são usados, principalmente, em barragens de aterro nas zonas de transição entre materiais (DIAS, 2015).

A Eletrobrás (2003) define os materiais utilizados na construção dos filtros verticais e filtros de transições:

- Materiais naturais - são considerados aqueles obtidos através de escavações convencionais mecanizadas, dragagem ou mesmo escavações com uso de explosivos e aplicados na obra, sem necessidade de qualquer tipo de beneficiamento;
- Materiais processados - são aqueles produzidos artificialmente pelo beneficiamento de materiais naturais. Os tipos de beneficiamento mais utilizados são: britagem, lavagem e peneiramento.

O comportamento de filtros a longo prazo ainda é pouco conhecido pela falta de observações suficientes. Sempre existem riscos de contaminação dos materiais dos filtros e, conseqüentemente, de diminuição da espessura e da capacidade drenante dos mesmos, tendo em vista a eventual migração dos finos do material argiloso. Portanto, é recomendável se adotar uma sobre espessura de alguns decímetros quando se calcula a espessura dos filtros e dos drenos; convém notar, entretanto, que essa sobre espessura será muitas vezes imposta por considerações práticas relativas a facilidades construtivas e de utilização de equipamentos modernos de terraplenagem (MARTINS,2012).

3.4.1 Mecanismo de filtração

Segundo ICOLD (1994) os drenos são materiais granulares, tubulações ou outros dispositivos - implantados sozinhos ou de forma associada - utilizados para coletar, transportar ou descarregar vazões e/ ou evitar a ocorrência de poropressões elevadas no maciço ou na fundação de estruturas geotécnicas. Para que não ocorram poropressões elevadas nos drenos ou em suas adjacências, a capacidade de conduzir vazões nestes dispositivos deve ser compatível com as vazões previstas em projeto. Em casos específicos, filtros – compostos por materiais finos ou granulares – podem operar com a finalidade de dreno uma vez que é composto por um material através do qual é possível percolar um fluxo de água sem permitir a passagem das partículas

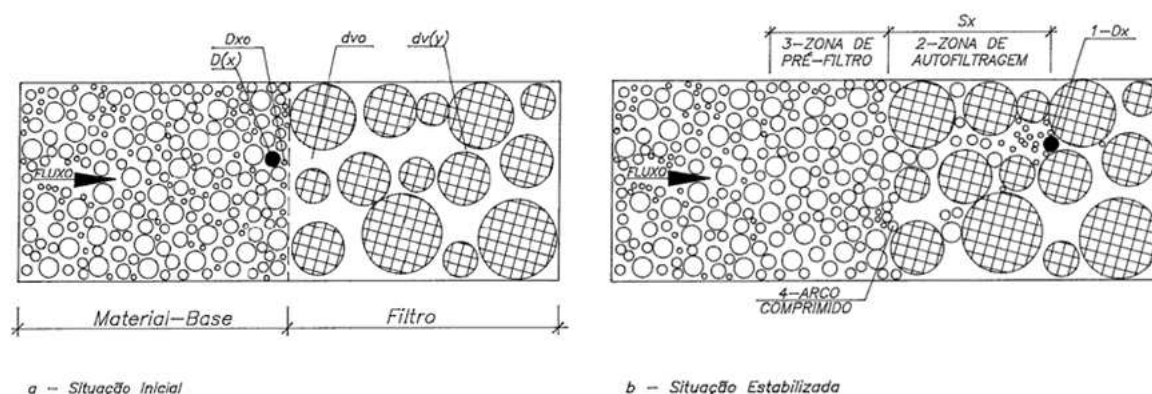
em suspensão. Caso haja a erosão destas partículas e o movimento das mesmas, o filtro tem a finalidade de retê-las em seu interior ou em sua interface com o solo de onde se originam tais partículas.

Crítérios de resistência e durabilidade surgem principalmente devido à localização dos filtros, que é na maioria das vezes, a jusante ou montante do núcleo, onde estão sujeitos a elevadas tensões, devendo estes ser resistentes ao esmagamento e à ação dos restantes elementos durante o tempo de vida projetado para a barragem. Já o intervalo granulométrico do filtro deve ser baseado, não só no material base, mas também ajustado de forma, a que não ocorram no interior do filtro arraste de partículas e se proporcionem ao mesmo tempo condições mínimas, para que ocorra alguma recuperação do mesmo, existindo aquilo a que se chama, usualmente, de um controle de finos.

Um conceito básico avançado, inerente ao design do filtro, é que o solo base geralmente fornecerá uma parcela de “auto-filtragem”. Em um solo base bem graduado, as partículas mais grosseiras do solo base são impedidas de erodir para dentro do filtro, e elas em contra partida evitam as partículas médias do solo base de erodir, e as partículas médias do solo base evitam as partículas finas do solo base de erodir. (...) Para o filtro ser bem sucedido no controle da erosão, é necessário ser capaz de controlar a erosão das partículas finas (FELL et al, 2005).

Uma forma esquemática dos estados de arranjo das partículas em um filtro pode ser observada na Figura 5, proposta por Humes (1995), tendo como foco as dimensões das partículas do solo base e dos vazios do filtro.

Figura 5 - Mecanismos de filtragem.



FONTE: HUMES, 1995.

Onde: 1 – Retenção dos grãos maiores, que impedem o transporte dos grãos menores; 2 – Formação da zona de autofiltragem no interior do filtro; 3 – Formação da

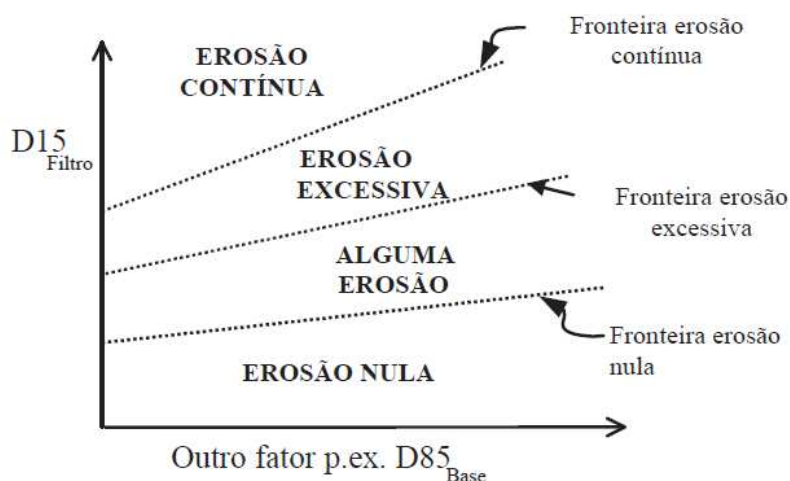
zona de pré-filtro no material base; 4 – Criação de arcos comprimidos sobre as entradas do filtro.

A estabilização de um filtro pode ser facilitada pela formação de arcos comprimidos, constituídos por partículas do solo tensionadas umas sobre as outras, mesmo que estas, individualmente, apresentem dimensões menores que o vazio que seria atravessado. No entanto, tal configuração pode ser facilmente desfeita por meio de quaisquer vibrações (SHERARD et al, 1984a).

O processo de estabilização do filtro conduz à formação de zonas definidas na região de transição entre o solo e o filtro, identificadas como “zona de pré-filtro” e “zona de auto filtragem” (*self-filtration layer*), sendo esta última muitas vezes referida como “zona de auto estabilização”. Geralmente, sob o ponto de vista de projetos, a zona de auto filtragem é definida com largura aproximada correspondente à distância percorrida pela partícula do solo base de diâmetro d_{85} . Com relação à zona de pré-filtro, esta caracteriza-se por apresentar granulometria intermediária entre o solo base e o filtro, uma vez que esta região sofreu perda de parte de suas partículas mais finas (PIMENTA FILHO, 2013).

De modo a representar da melhor maneira a influência da distribuição granulométrica no problema de *piping*, tem-se na Figura 6 representadas as fronteiras que definem o nível de erosão existente com base na dimensão das partículas do solo base onde passa 85% do material (D_{85B}) em relação à dimensão das partículas do filtro onde passa 15% do material (D_{15F}) (DIAS, 2015).

Figura 6 - Erosão interna e os seus níveis.



FONTE: DIAS, 2015.

3.4 Dimensionamento de filtro

Os filtros devem ser dimensionados para atender aos critérios básicos de retenção e permeabilidade, que a princípio parecem ser critérios antagônicos. No entanto, estas condições supõem que as dimensões dos vazios no material do filtro devem ser suficientemente pequenas para reter as partículas maiores do material protegido e, ao mesmo tempo, o material deve ter permeabilidade suficiente para impedir a indução de forças elevadas de percolação e pressões hidrostáticas aplicadas aos filtros (SILVA, 2016).

O dimensionamento das partículas dos materiais que compõem o filtro é de extrema importância para as análises de filtragem, partindo, efetivamente, do princípio que um filtro é concebido como um meio poroso capaz de reter partículas em suspensão que estão sendo transportadas pela água que precisa passar pelo filtro (CRUZ, 2004).

Existem duas funções fundamentais que são exigidas pelos filtros em barragens de terra, rocha e barragens de enrocamento. A primeira é a função de retenção: também conhecida como critério de estabilidade. Esta função requer que o filtro evite a migração de partículas de sujeira do filtro adjacente, fundação ou materiais de enchimento. Portanto, o filtro deve ser capaz de impedir a migração de preenchimento impermeável de granulação mais fina ou material de fundação. A segunda é a função de permeabilidade: esta função requer que o filtro deve ser capaz de aceitar fluxos de infiltração da fundação adjacente ou materiais de enchimento, ou que os filtros grossos devem ser capazes de aceitar os fluxos de filtros finos adjacentes a montante sem o acúmulo de pressão hidrostática em excesso. Especificações quanto às taxas de permeabilidade adequadas são prescritas em projeto, sendo comumente citado que os materiais de filtro devem ser pelo menos 25 vezes maiores do que os materiais adjacentes (HUNTER, 2012).

A solução de um sistema de drenagem interna de um maciço compactado se constitui no elemento fundamental para segurança de uma barragem de terra ou aterro. Por este motivo, a drenagem interna deve ser dimensionada de maneira conservadora, de modo a estender à todas as possíveis águas de infiltração tanto do maciço como da fundação, discipliná-las e conduzi-las para jusante de maneira controlada (MARTINS, 2012).

Numa barragem de aterro deve existir especial atenção às forças de percolação ascendentes, que podem a qualquer altura, sobrepor as da gravidade, dando início à separação das partículas. A verificação de valores de gradientes hidráulicos reduzidos indica também o quão lentamente poderá estar a acontecer o *piping* (DIAS, 2015).

A determinação da composição granulométrica ideal de um filtro envolve percentagens de materiais granulares e finos que variam de acordo: com o solo a ser protegido, material base, sempre levando em conta a mobilidade das partículas argilosas, a variação na dimensão dos vazios nas areias dos filtros, a tendência de colmatação dos vazios do filtro, e a formação de uma zona de auto filtragem no solo.

3.4.2 Critérios de Terzaghi (1926)

O precursor no estudo do dimensionamento de filtro de drenagem foi o engenheiro geotécnico Karl Von Terzaghi no início do século XX. Seu estudo foi proposto em 1926 sendo conhecido como Critério Clássico de Terzaghi.

Baseando-se no comportamento das vazões em materiais não coesivos e uniformes, ou seja, granulares, Terzaghi definiu dois critérios. O primeiro é conhecido como critério de retenção, critério de estabilidade ou critério de piping, e define uma relação entre o material do filtro e o material base para que as dimensões dos vazios entre os grãos do filtro sejam pequenas o suficiente de forma que as partículas do material protegido não consigam se infiltrar no filtro:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \quad \text{critério de estabilidade} \quad (\text{Equação 2})$$

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

Já o segundo critério, é chamado critério de permeabilidade e define uma relação entre o material do filtro e o material base para que o filtro tenha condutividade hidráulica suficiente de forma que as condições de drenagem previstas sejam garantidas:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \quad \text{critério de permeabilidade} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde D_{15} é o diâmetro das partículas do filtro correspondente a 15% passantes, e d_{15} é o diâmetro das partículas do solo base correspondentes a 15% passantes.

A proposição de Terzaghi iniciou a vertente do dimensionamento clássico de drenagem interna de obras de terra. A partir dele outros estudos foram aprofundados permitindo novas contribuições quanto ao dimensionamento de filtros de obras de terra. Os demais autores citados neste estudo desenvolveram os critérios que, baseados na teoria clássica, tiveram maior aceitação e foram mais difundidos não só no meio acadêmico como também na prática de projetos e aplicações.

3.4.3 Critérios da USBR (1977)

Antes da proposição do critério pela *United States Bureau of Reclamation* (USBR) em 1977, outros autores como Bertram em 1940, a própria USBR em 1955, e a *US Corps of Engineers* em 1941 contribuíram com avanços nas definições e especificação dos parâmetros ideais para os filtros. Os resultados propostos individualmente por cada pesquisador não serão apresentados neste material, mas podem ser observados na Figura 7. O método USBR (1977) destaca-se por ser um critério de alta adesão no ramo de projetos de drenagem de barragens.

Figura 7 - Resumo com descrição de alguns dos critérios de filtros estabelecidos desde os estudos conduzidos por Terzaghi na década de 1920.

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

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

O método original USBR, Equações 4 e 5, como descrito em USBR (1977) diz que (FELL et al, 2005):

$$1. a) \frac{D_{15}}{d_{15}} = 5 \text{ até } 40; \quad (\text{Equação 4})$$

b) O filtro não deve conter mais de 5% de passantes finos (0,075mm), e os finos devem ser sem coesão;

$$2. \frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 5; \quad (\text{Equação 5})$$

3. A curva de granulometria do filtro deve ser aproximadamente paralela à do material base;
4. O tamanho máximo de uma partícula do filtro é 75mm para prevenir a segregação durante o processamento;
5. Para materiais de base que incluam partículas de pedregulho, o material base d₁₅ e d₈₅ devem ser analisados na base da granulometria do solo fino de 4,7mm.

Os critérios propostos compõem o segmento clássico do dimensionamento de filtro proposto por Terzaghi. No primeiro item a relação assegura que o filtro deve ser mais permeável que o solo base, remetendo ao critério de permeabilidade. Já o segundo, terceiro e quarto itens garantem que o filtro tenha partículas de finos suficientes para que haja o controle da erosão do solo base, remetendo ao critério de estabilidade. O maior avanço do método é que ele pode ser aplicado à solos base com alguma presença de finos em sua composição, como areias argilosas ou argilas arenosas.

3.4.4 Critérios de Sherard e Dunningan (1985 e 1989)

Em 1984 e 1985, Sherard et al e Sherard e Dunnigan obtiveram os primeiros avanços quanto às avaliações e variações dos critérios de dimensionamento de filtro para que posteriormente houvesse a proposição adotada no meio científico e prático. Através de vários testes laboratoriais para checar os critérios de filtro e também de diferentes aparatos para simular um vazamento concentrado em barragem, esses estudos preliminares reuniram um gama de resultados que permitiu a proposição do método em 1989.

Baseados nesse acervo, Sherard e Dunnigan recomendaram (FELL et al, 2005):

- Para todos os tipos de solo com pedregulhos (exceto o Grupo 3 abaixo), os filtros devem ser dimensionados considerando a granulometria da parte do solo fino de 4,75mm;
- Grupo 1: finos siltes e argilas: para finos siltes e argilas que tem mais que 85% em peso de partículas mais finas que a peneira de 0,075mm, o filtro admissível no dimensionamento deve ter $D_{15} \leq 9 d_{85}$;
- Grupo 2: siltes e argilas arenosas, e areias siltosas e argilosas: para solos impermeáveis arenosos (ou granulares) com 40% a 85% em peso (de porção mais fina que a peneira 4,76mm) mais fina que a peneira de 0,075mm, o filtro admissível no dimensionamento deve ter $D_{15} \leq 0,7mm$;
- Grupo 3: areias e pedregulhos arenosos com pequena quantidade de finos): para areias e pedregulhos siltosos e argilosos com 15% ou menos em peso (de porção mais fina que a peneira 4,76mm) mais fina que a peneira de 0,075mm, o filtro admissível no dimensionamento deve ter $D_{15} \leq 4 d_{85}$ onde d_{85} pode ser o tamanho 85% mais fino do material inteiro incluindo os pedregulhos;
- Grupo 4: para solos impermeáveis grosseiros intermediários entre os grupos 2 e 3 acima, com 15% a 40% passante na peneira 0,075mm, o filtro admissível no dimensionamento é intermediário, inversamente proporcional ao teor de finos e pode ser computado por uma linha reta de interpolação.
- Além de terem valores de D_{15} conforme estabelecido acima, os filtros para os grupos 1 e 2 devem ser compostos totalmente por areia ou areia grossa na qual as partículas grosseiras não sejam maiores que 60% (que as partículas finas sejam menores que 40%) que 4,76mm e o máximo o tamanho da partícula seja de 50mm;
- O critério acima pode ser aplicado para todos os solos do grupo 1 e 2 independentemente do tipo da curva de distribuição dos tamanhos de partículas. Para os solos do grupo 3 e 4 o critério se aplica razoavelmente aos solos bem graduados. Para os solos do grupo 3 e 4 os quais tenham alto espaçamento de graduação é aconselhável providenciar ao filtro uma porção de finos do intervalo de deficiência granulométrica do solo, ou

realizar o teste de erosão de filtro em laboratório para selecionar um filtro apropriado.

A ampliação do intervalo de análise do solo base quanto á sua granulometria permite maior abrangência no dimensionamento de filtro. Essa abertura de horizontes garante sua estabilidade através da incorporação de fatores de segurança adequados. É válido ressaltar que alguma limitação no teor e na natureza dos finos está implícita, ou seja, os filtros não devem conter mais do que 5% de finos passando de 0,075 mm, e os finos devem ser "sem coesão", como já mencionada pela USBR (1977).

4. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foi proposto além da utilização de quatro tipos diferentes de materiais base, dois diferentes materiais filtros. O primeiro deles é a areia como é oferecida no mercado sem que haja correção granulométrica necessária para que ela se encaixe no intervalo previsto no dimensionamento calculado ou separação da matéria orgânica presente no material lavado e não peneirado acessado no mercado de material de construção de Viçosa-MG. Já o segundo trata-se da utilização de um material filtro com granulometria controlada e limitada ao intervalo calculado, nomeado como areia grossa. A coleta desses dados permite não apenas a análise individual da eficiência do filtro como também uma comparação direta de possíveis situações de utilização de materiais filtros distintos em solos distintos.

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa, sediada no município de Viçosa – MG, localizado na Zona da Mata mineira e distante a 230 km da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. A metodologia descreve tanto os materiais utilizados como os métodos experimentais adotados propostos a partir de conceitos clássicos normatizados.

4.1 Materiais

4.1.1 Material da base

O material da base também é chamado solo base ou material protegido, sendo aquele que compõe a estrutura e está em contato direto com o filtro de drenagem. Nesta pesquisa, três dos materiais base utilizados são de origem natural como os solos presentes em terrenos onde serão construídas estruturas de contenção, já o quarto material base é originário das atividades de mineração e por isso não deve ser denominado solo base e sim material base ou protegido.

O primeiro solo base selecionado para o estudo é referenciado como Solo 1. Sua coleta foi feita em um talude situado no interior do Campus Viçosa da UFV, à margem de uma estrada não pavimentada que liga a Escola Estadual Effie Rolfs e o setor de Equideocultura da instituição. Na imagem a seguir, Figura 8, o marcador branco indica o local de coleta do Solo 1 e suas coordenadas geográficas são 20°45'6.79"S e 42°51'33.14"O.

Figura 8 - Ponto de coleta do Solo 1.

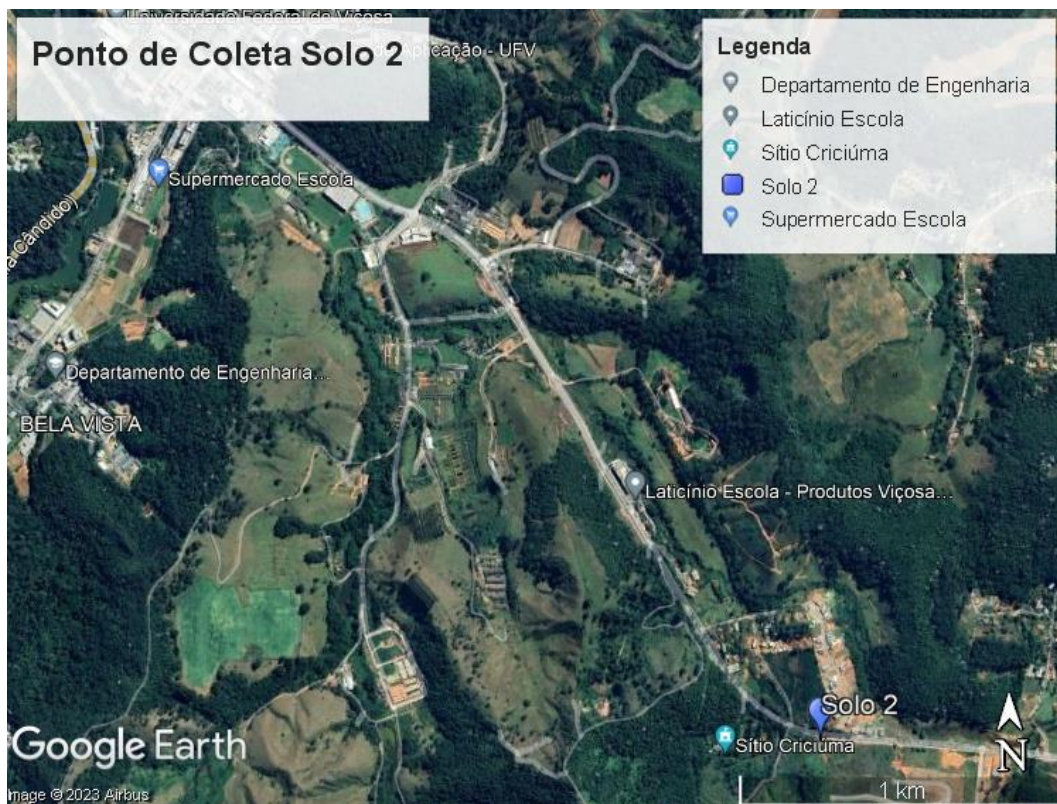


FONTE: GOOGLE EARTH, 2023.

O segundo solo base selecionado é referenciado como Solo 2. Sua coleta foi feita em um talude considerado de baixa estabilidade, que há um tempo ocorreu um leve deslizamento com a ocorrência da época de chuvas. Fica situado nas margens do Campus Viçosa da UFV aproximadamente no km 4,5 da Avenida PH Rolfs próximo à entrada de acesso do condomínio Vale Verde. Na imagem a seguir, Figura 9, o marcador azul indica o local de coleta do Solo 2 e suas coordenadas geográficas são 20°46'53.89"S 42°50'57.45"O.

O terceiro solo base selecionado é referenciado como Solo 3. Sua coleta foi feita em um talude situado no interior do Campus Viçosa da UFV, à margem da via pavimentada que leva ao departamento de medicina e enfermagem da instituição, também conhecida como Vila Secundina. Na imagem a seguir, Figura 10, o marcador rosa indica o local de coleta do Solo 3 e suas coordenadas geográficas são 20°45'47.94"S 42°51'29.67"O.

Figura 9 - Ponto de coleta do Solo 2.



FONTE: GOOGLE EARTH, 2023.

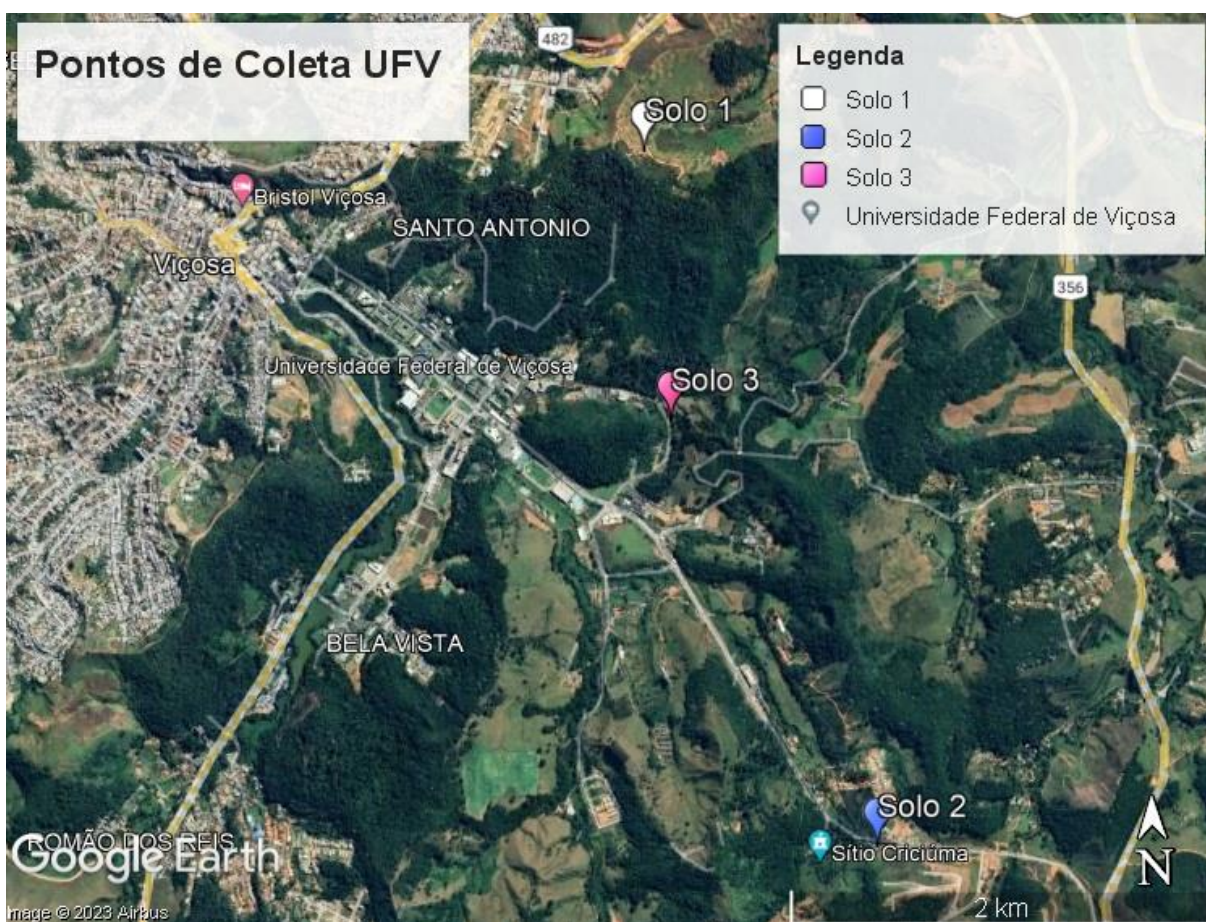
Figura 10 - Ponto de coleta do Solo 3.



FONTE: GOOGLE EARTH, 2023.

Na Figura 11 é localizado o ponto de coleta dos três solos base que foram coletados dentro da Universidade Federal de Viçosa em uma mesma imagem. Destacado em branco está o ponto de coleta do Solo 1, de azul do Solo 2 e de rosa do Solo 3.

Figura 11 - Pontos de coleta dos solos base na UFV.



FONTE: GOOGLE EARTH, 2023.

O quarto material base selecionado para esse estudo é o rejeito de extração de minério de ferro cedido pela mineradora CSN, Companhia Siderúrgica Nacional, através de uma parceria de pesquisa entre a empresa e a UFV. Os ativos da CSN Mineração encontram-se no Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais.

Na Figura 12 podem ser identificados os quatro materiais base utilizados nesta pesquisa e descritos acima. Visualmente, tratam-se de diferentes colorações e texturas, sendo o Solo 1 avermelhado, o Solo 2 rosado, o Solo 3 esbranquiçado e o Rejeito marrom escuro.

Figura 12 - Foto dos materiais base.



FONTE: Autoria própria, 2023.

4.1.2 Material do filtro

Para a análise proposta por esse estudo foi utilizada a areia comercializada como média na cidade de Viçosa – MG. Foi adquirido a quantidade considerada suficiente para toda fase experimental de uma única vez no mesmo fornecedor de modo a manter a amostra bem uniformizada.

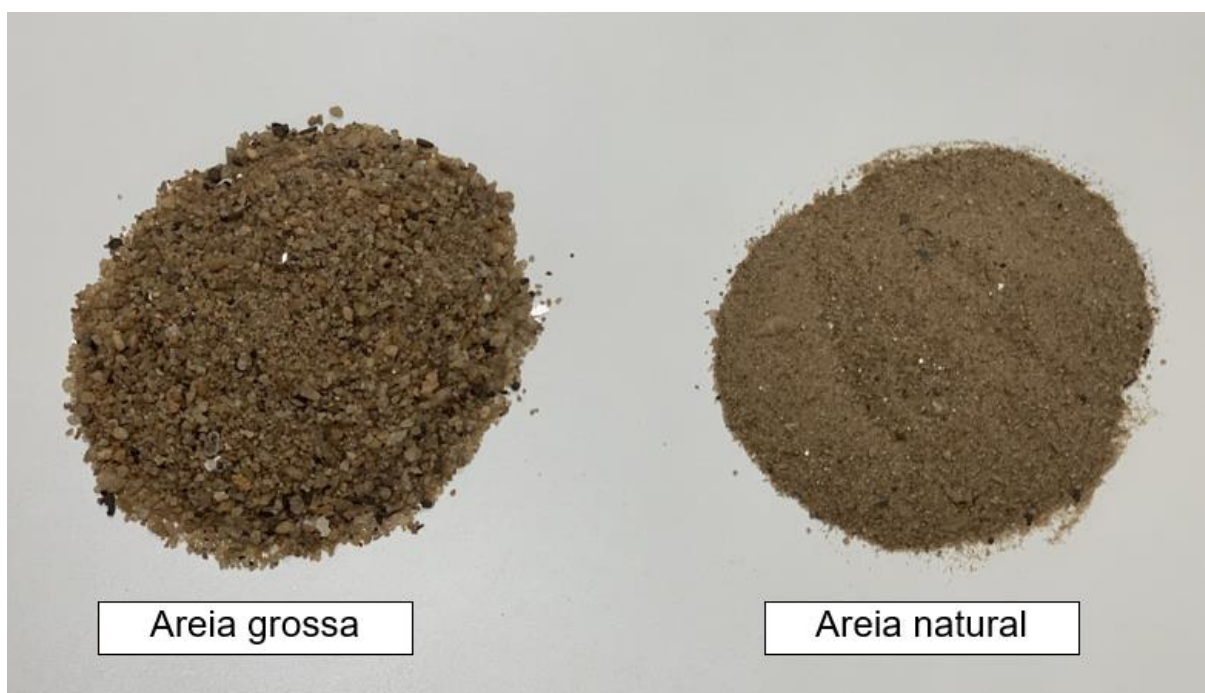
A primeira variante do material filtro selecionada para as experimentações e análises foi a areia natural, diretamente como é fornecida, visando uma correspondência mais fiel à prática executiva. Nas obras, comumente, as areias são depositadas do modo como chegam, sem que haja qualquer peneiramento ou correção granulométrica. Existem critérios de controle de qualidade, onde são coletadas amostras dentro do volume de material adotado para que suas curvas granulométricas sejam definidas a fim de confirmar se a porção disponibilizada está dentro dos limites de dimensionamento. Caso essa premissa não seja atendida, ou seja, caso a granulometria esteja fora do intervalo de valores estipulados esperados, esse material é reprovado para a utilização na concepção da obra. Esse impasse gera

um impacto considerável na logística de fornecimento e também nas viabilizações financeiras. Essa metodologia de controle do material filtrante utilizado numa obra, ainda que existente, nem sempre é representativa do todo. Pensando nisso, tem sido muito difundido a aplicação de programas de Controle e Garantia de Qualidade (QA/QC) na mineração fazendo com que os projetos fiquem preparados e organizados para auditorias internas ou externas e eliminando as más práticas de execução.

O segundo material filtro selecionado para as experimentações e análises foi a areia grossa obtida através da correção granulométrica com peneiramento. A porção utilizada então foi a passante na peneira de 4,75 mm e retida na peneira de 1,18 mm, caracterizando assim uma areia grossa mal graduada. É importante ressaltar que todo material peneirado foi obtido a partir do mesmo montante de areia média natural adquirida em uma única remessa.

Na Figura 13 fica evidente a diferença granulométrica das areias utilizadas nesse estudo como materiais filtro distintos com a intenção proposital de comparação de dados e análises de percolação e fluxo de água. Do lado esquerdo dispõe-se da areia natural e no lado direito da imagem da areia grossa.

Figura 13 - Foto dos materiais filtro.



FONTE: Autoria própria, 2023.

4.2 Métodos

4.2.1 Preparação dos solos

Os materiais bases que foram coletados na UFV foram levados ao Laboratório de Engenharia Civil, LEC, acondicionados devidamente em sacos plásticos reforçados e posteriormente colocados para secar à sombra. Depois de secos, os solos foram peneirados na peneira # nº 4, com abertura de 4,8 mm ilustrado na Figura 14 para o Solo 2 como exemplo. Os eventuais torrões retidos na peneira foram destorroados com o auxílio de um martelo de borracha de modo que a força aplicada fosse suficiente apenas para que as partículas fossem desprendidas umas das outras sem que fossem quebradas. Todo cuidado foi tomado para que não houvesse contaminação do solo estudado, como por exemplo, entrando em contato com outros solos, matérias orgânicas, ou até mesmo com resquícios da manipulação de solos de outras pesquisas. Com o peneiramento do material finalizado, todo montante de cada solo foi homogeneizado e devidamente acondicionado em sacos plásticos reforçados identificados e guardados em local fechado e fresco.

O rejeito foi entregue ao laboratório na forma de torrões úmidos em sacos plásticos. Posteriormente, foi colocado para secar à sombra, peneirado, destorroadado e acondicionado em local fechado e fresco como os demais solos base.

Para a preparação do material filtro, todo montante de areia natural média adquirida foi levado para o LEC e assim disposto em bandejas próprias colocadas sob um lugar sombreado até que estivesse seco para que então fosse guardado em sacos plásticos resistentes junto dos solos selecionados e do rejeito para o material base. Após o preparo dos materiais, iniciaram-se os ensaios de caracterização afim de obter os parâmetros característicos necessários para a evolução dessa pesquisa.

Visando atingir os objetivos desse trabalho, na Tabela 5 é apresentada a relação de todos os ensaios realizados, cujos detalhamentos referentes aos materiais e execução, são apresentados nas próximas seções. Na Figura 15 se encontra um fluxograma para melhor visualização da sequência de execução dos ensaios propostos.

Figura 14 - Peneiramento do Solo 2.



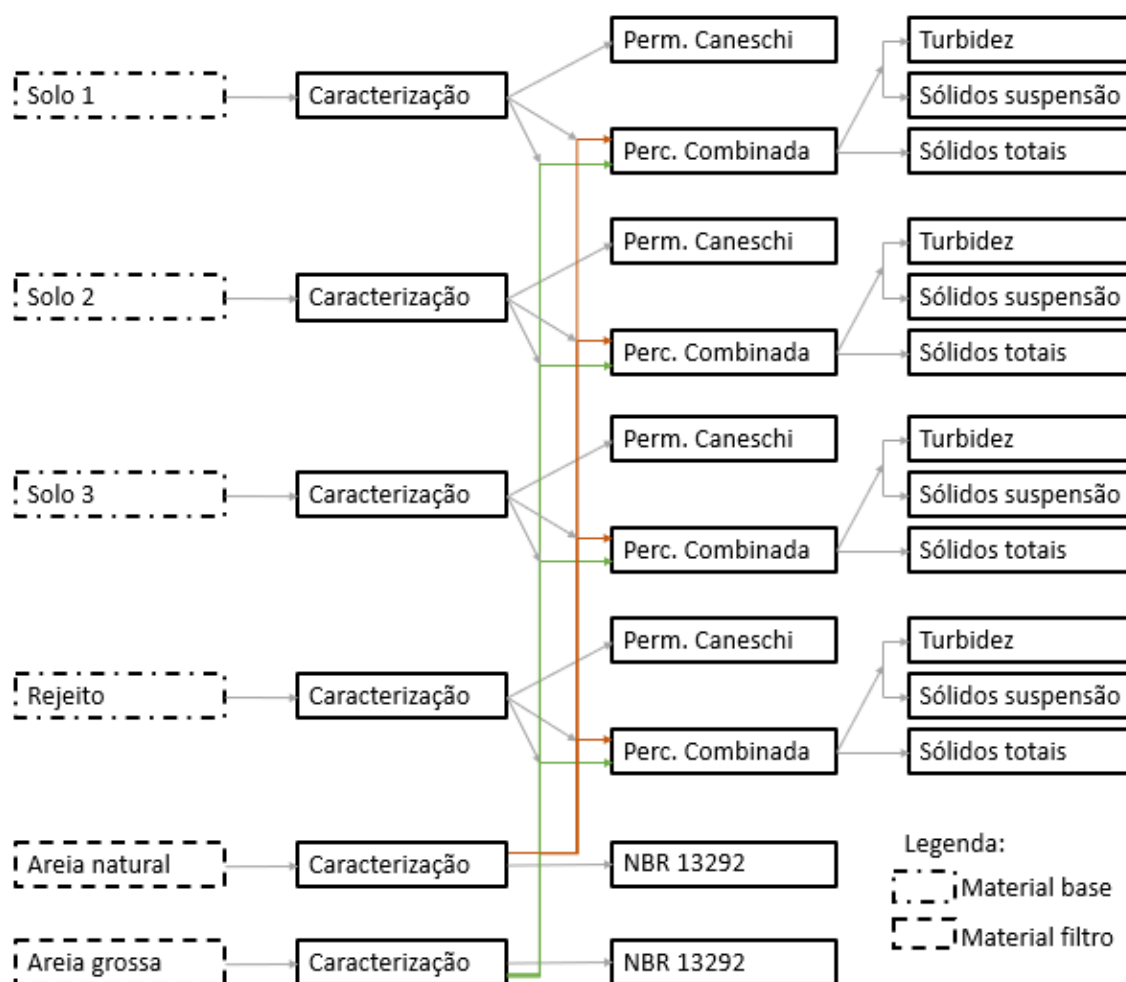
FONTE: Autoria própria, 2023.

Tabela 5 - Quantitativo dos ensaios realizados com cada material proposto nesse trabalho.

		Materiais					
		Solo 1	Solo 2	Solo 3	Rejeito	Areia natural	Areia grossa
Métodos	Compactação	1	1	1	1		
	LL e LP	1	1	1	1		
	Massa específica dos sólidos	1	1	1	1		
	Granulometria	1	1	1	1	1	1
	Impurezas orgânicas					1	1
	Permeabilidade de Caneschi	4	4	4	4		
	Permeabilidade carga variável	2	2	2	2		
	Permeabilidade carga constante					2	2
	Percolação combinada	3	3	3	4	13	
		2	2	2	2		8
	Turbidez	15	15	15	20	65	
		10	10	10	10		40
	Sólidos em suspensão	15	15	15	20	65	
		10	10	10	10		40
	Sólidos totais	3	3	3	4	13+3	
2		2	2	2		8+2	

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 15 - Fluxograma das etapas de ensaio e suas conexões



FONTE: Autoria própria, 2023.

4.2.2 Ensaios de caracterização

Em busca da determinação dos parâmetros do solo, foram realizados os seguintes ensaios normatizados:

- I. Ensaio de compactação (NBR 7182, ABNT 2020): para a obtenção dos parâmetros de umidade ótima do solo, w_{ot} , e peso específico seco máximo do solo, γ_{dmax} .
- II. Ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade (NBR 6459, ABNT 2017 e NBR 7180, ABNT 2016): para obtenção dos valores de LL e LP do solo.
- III. Ensaio de granulometria (NBR 7181, ABNT 2017): para obtenção da curva granulométrica dos materiais.

IV. Ensaio de massa específica (NBR 6458, ABNT 2017): para a determinação da massa específica dos grãos dos materiais, ρ_s .

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UFV Campus Viçosa (LEC).

4.2.3 Dimensionamento do material filtro

Para o dimensionamento granulométrico do filtro, foram seguidas as seguintes diretrizes propostas por USDA SCS em 1986, revisadas por NRCS em 1994 e em consonância com ICOLD em 1994, as quais são reconhecidas como critérios usuais da boa prática da engenharia de projetos de filtros em barragens (PIMENTA FILHO, 2013). Os passos a seguir compilam as considerações expostas nos estudos de Pimenta Filho 2013 e Fell *et al* 2005:

1. Plotar curvas granulométricas do material base: No caso de mais de uma curva granulométrica do material devem ser plotadas quantidades suficientes destas de tal forma que possam ser representativas ao material e permitir a avaliação correta de quais premissas adotar para o dimensionamento. Para atendimento aos critérios de proteção do filtro, o mesmo deve ser dimensionado para a curva granulométrica do solo base que apresentar o menor valor de d_{15} . Para atendimento aos critérios de drenagem, o sistema deve ser dimensionado para a curva granulométrica do solo base que apresentar o maior valor de d_{15} ;
2. Proceder conforme o passo (4), caso o solo base não contenha partículas com dimensões maiores que 4,75 mm (peneira 4, conforme padrões ASTM);
3. Reclassificar as curvas granulométricas para materiais que contenham partículas maiores que 4,75 mm: Obter o fator de correção da curva granulométrica dividindo 100 pela porcentagem passante correspondente à dimensão 4,75 mm. Multiplicar as porcentagens passantes correspondentes às dimensões menores que 4,75 mm pelo fator de correção determinado. Plotar as porcentagens corrigidas para obter a nova curva granulométrica do solo base, ou a curva reclassificada. Para a etapa seguinte (4), considerar a curva reclassificada para determinação da porcentagem passante correspondente à dimensão 0,075 mm;

4. Classificar o solo base: Para dimensionamento do filtro, o solo a ser protegido deve ser enquadrado em uma das categorias conforme apresentado na Tabela 6, com base em sua curva granulométrica reclassificada, obtida em (3), caso tal reclassificação tenha sido aplicável;

Tabela 6 - Critérios para determinação da categoria do solo base.

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

FONTE: PIMENTA FILHO, 2013.

5. Determinar o D_{15} máximo admissível: Determinar o D_{15} máximo admissível do filtro em projeto para atendimento aos pré-requisitos de filtração, de acordo com a Tabela 7 (definir Ponto 1 na curva);

Tabela 7 - Determinação do D_{15} máximo (critério de filtração ou retenção).

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

FONTE: PIMENTA FILHO, 2013.

6. Determinar o D_{15} mínimo admissível: Determinar o D_{15} mínimo admissível de acordo com a Tabela 8 caso a permeabilidade do sistema seja premissa para o dimensionamento (definir Ponto 2 na curva). Dimensionamento especial, caso um dreno associado tenha finalidade de conduzir vazão;

Tabela 8 - Determinação do D_{15} mínimo (critério de permeabilidade)

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

FONTE: PIMENTA FILHO, 2013.

7. Ajustar os diâmetros D_{15} máximo e mínimo determinados em (5) e (6): A faixa determinada nos passos (5) e (6) deve ser ajustada de modo que a razão entre os diâmetros D_{15} máximo e mínimo seja igual ou menor que 5 ($D_{15\text{máx}} / D_{15\text{mín}} \leq 5$) (revisão dos pontos 1 e 2). Caso tal condição não seja atendida inicialmente, os diâmetros D_{15} determinados devem ser corrigidos de forma a atendê-la. Em função da finalidade principal do sistema projetado – filtro ou dreno – o limite inferior ou superior pré-determinado deverá ser corrigido. Tal ajuste é recomendado de forma a evitar a utilização de filtros de granulometria “aberta”. Materiais com este tipo de granulometria são geralmente reconhecidos apenas pelo formato de sua curva granulométrica. No entanto, para fins de procedimentos de projeto, um controle sistemático é necessário. Para a escolha do D_{15} final, deve-se também considerar a disponibilidade e características dos materiais naturais do local da obra ou características compatíveis com os materiais comercializados;
8. Ajustar os diâmetros D_{60} máximo e mínimo para obtenção de coeficientes de uniformidade adequados (definir Pontos 3 e 4 na curva – máximo e mínimo D_{60}): Segundo as diretrizes fornecidas em NRCS (1994), ambas as curvas granulométricas com limites estabelecidos para o filtro devem apresentar coeficiente de uniformidade $C_u \leq 6$. Para tanto, sugere-se cumprir os procedimentos seguintes:
- Definir para o máximo D_{10} admissível o valor resultante da divisão do máximo D_{15} por 1,2 (este fator se baseia na hipótese de que a inclinação da linha que conecta D_{15} e D_{10} deve estar em conformidade com um coeficiente de uniformidade próximo de 6);
 - Definir para o máximo D_{60} admissível o valor resultante da divisão do máximo D_{10} por 6 (Ponto 3);

- Definir para o mínimo D_{60} admissível o valor resultante da divisão do máximo D_{60} por 5 (Ponto 4);

9. Determinar os diâmetros D_5 mínimo e D_{100} máximo: De acordo com o previsto na Tabela 9(Pontos 5 e 6 na curva):

Tabela 9 - Determinação do mínimo D_5 e do máximo D_{100} .

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

FONTE: PIMENTA FILHO, 2013.

10. Determinar o D_{90} máximo (Ponto 7 na curva): Definir para o mínimo D_{10} admissível o valor resultante da divisão do mínimo D_{15} por 1,2. Calcular o máximo D_{90} admissível de acordo com o critério apresentado na Tabela 10. Areias de filtros com D_{90} menor que 20 mm geralmente não requerem ajustes especiais relacionados à amplitude da faixa de projeto do filtro. Para materiais mais grosseiros, incluindo zonas de pedregulhos, com a finalidade de drenar e filtrar, a razão D_{90}/D_{10} deve decrescer rapidamente com o aumento dos valores de D_{10} ;

Tabela 10 - Critério de segregação.

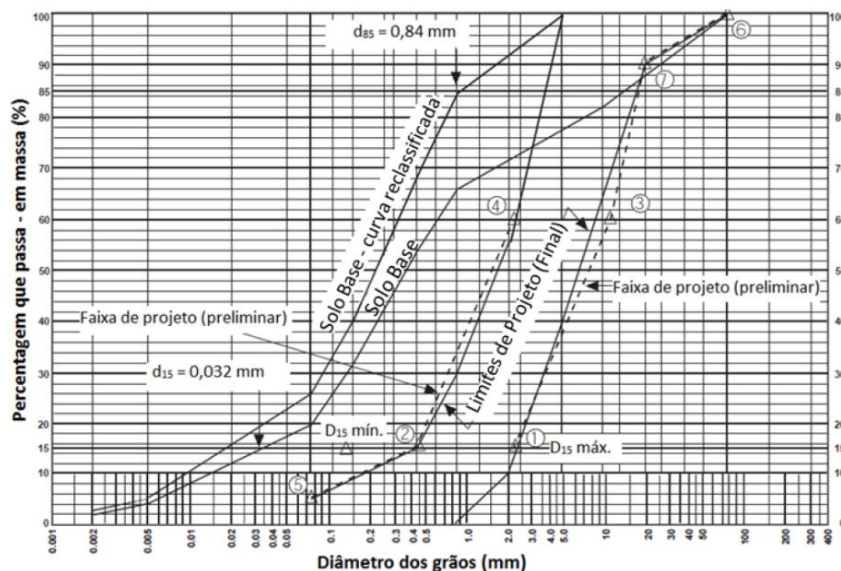
Categoria do solo base	Se D_{10} é igual a (mm):	Então D_{90} máximo é igual a (mm):
Todas categorias	$< 0,5$	20
	0,5 - 1,0	25
	1,0 - 2,0	30
	2,0 - 5,0	40
	5,0 - 10	50
	> 10	60

FONTE: PIMENTA FILHO, 2013.

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

A Figura 16 com a representação dos Pontos 1 ao 7 estabelecidos apresenta um exemplo de projeto de filtro realizado de acordo com as etapas descritas.

Figura 16 - Exemplo de dimensionamento de filtro realizado para material base.



FONTE: PIMENTA FILHO, 2013 adaptado de NRCS, 1994.

4.2.4 Ensaios de permeabilidade

Sabendo a importância da permeabilidade neste estudo e como ela influencia diretamente na drenagem de uma obra de terra, fez-se o uso tanto do equipamento de percolação em colunas desenvolvido por Caneschi (2012), como dos sistemas convencionais proposto pelas normas ABNT NBR 13292 (ABNT, 1995) e ABNT NBR 14545 (ABNT, 2000) para a definição dos parâmetros de permeabilidade individuais correspondente para cada solo em estudo.

I. Permeabilidade com equipamento de Caneschi (2012):

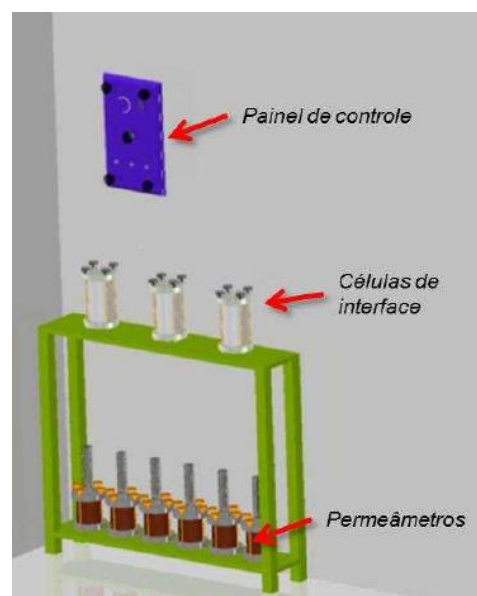
O equipamento utilizado foi montado no Laboratório de Engenharia Civil da UFV e desenvolvido por Caneschi (2012) com base no equipamento existente no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, Universidade de São Paulo, utilizado na pesquisa de Leite (2001). Seus fundamentos foram definidos a partir dos sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de laboratório normatizados de determinação da condutividade hidráulica. As imagens apresentadas a seguir, nas Figura 17 e Figura 18, tratam-se de uma foto tirada do equipamento com alguns dos ensaios em andamento e uma maquete do equipamento.

Figura 17 - Equipamento de Caneschi (2012).



FONTE: Autoria própria, 2023.

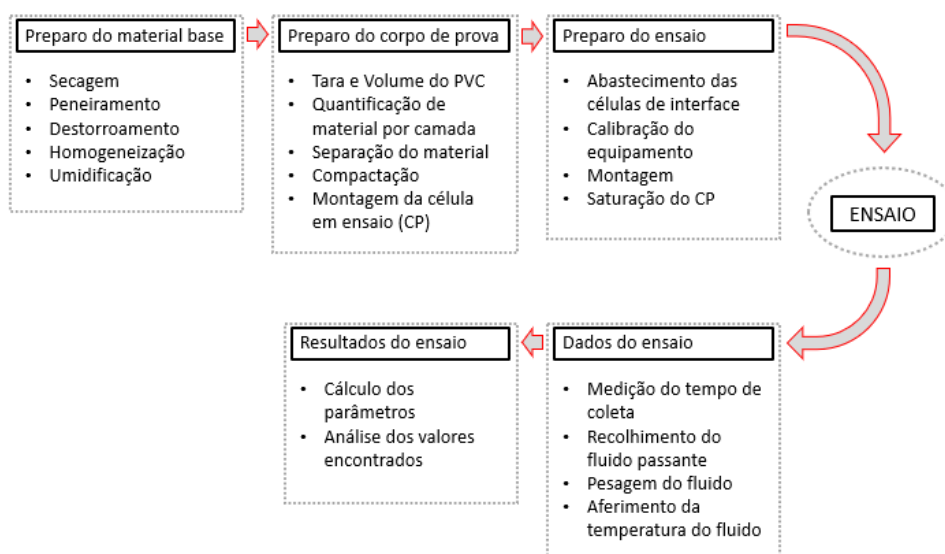
Figura 18 - Maquete de uma visão geral do equipamento de percolação.



FONTE: CANESCHI, 2012.

A Figura 19 elucida brevemente os processos realizados neste ensaio através de um fluxograma. A primeira etapa engloba toda a preparação do material protegido, seguido pela etapa de manipulação desse material para compor o corpo de prova a ser ensaiado. Para iniciar de fato o ensaio é necessário todo preparo do equipamento citado na terceira etapa. Concluídas as 3 primeiras etapas, o ensaio pode ser executado e ao longo do seu andamento é executada a quarta etapa de recolhimento de dados seguido pela quinta e última etapa que define os resultados obtidos.

Figura 19 - Fluxograma dos procedimentos realizados no ensaio.



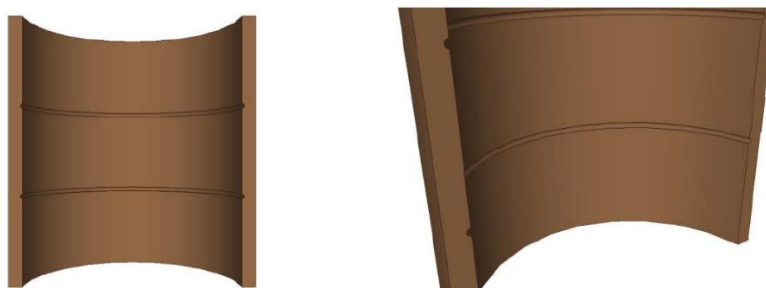
FONTE: Autoria própria, 2023.

Para a preparação do solo deste ensaio, o mesmo foi umidificado até que atingisse o intervalo de $w_{ot} \pm 1\%$, respeitando o intervalo de pelo menos 16 horas de descanso para que a porção de água adicionada umedecesse todos os grãos uniformemente. Como foram utilizados quatro tipos diferentes de material base, cada um deles possui sua curva de compactação distinta e consequentemente valores de umidade ótima e γ_{dmax} distintos.

Com o solo ou rejeito devidamente umidificado e homogeneizado, a moldagem do corpo de prova, CP, foi realizada através de compactação estática diretamente nos moldes próprios de PVC preparados, considerando grau de compactação de variando no intervalo de $-2\% < 99\% > +1\%$ com a umidade variando até 2% no valor da ótima ($w_{ot} \pm 2\%$). Durante o processo de compactação as frações de solo do CP foram rigorosamente pesadas e reservadas em sacos plásticos limpos e descartáveis até que rapidamente fossem depositadas no PVC sem nenhum contato externo. Ao final das três frações compactadas, ou seja, do corpo de prova compactado, este era imediatamente pesado e protegido com plástico filme e saco plástico até sua montagem no equipamento subsequente.

No equipamento desenvolvido na pesquisa de Caneschi (2012), o próprio corpo da célula de percolação é utilizado como molde de compactação. O molde utilizado possui 9,7 cm de diâmetro interno, 12 cm de altura e 6 mm de espessura, contendo em seu interior dois frisos transversais posicionados aproximadamente a quatro centímetros das bordas, conforme a Figura 20. Para o preparo do molde é necessário certificar-se que esteja limpo e seco e depois preencher os frisos com bentonita em textura pastosa. As ranhuras transversais sendo preenchidas com material expansivo, como a bentonita, formam uma espécie de barreira contra o fluxo preferencial do fluido no contato lateral entre a parede do PVC e o corpo de prova.

Figura 20 - Esquematização: corte do molde e detalhe da ranhura transversal.



FONTE: QUEIROZ, 2021.

Levando em conta as considerações feitas por Queiroz (2021) com relação à escolha de gradiente utilizado no ensaio, foi adotado o valor do gradiente igual a 15, buscando atender com maior segurança os parâmetros de permeabilidade e correspondendo ao valor intermediário entre o máximo recomendado para condutividade hidráulica conforme a ASTM (2020).

As fotos a seguir, Figura 21, ilustram as etapas de preparação de um dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa.

Figura 21 - (a). Molde do corpo de prova preparado com bentonita nos frisos. (b). Aparelhagem e solo preparado e devidamente porcionado para compactação estática. (c). Compactação estática em andamento. (d). Corpo de prova sendo moldado na máquina de compressão estática.



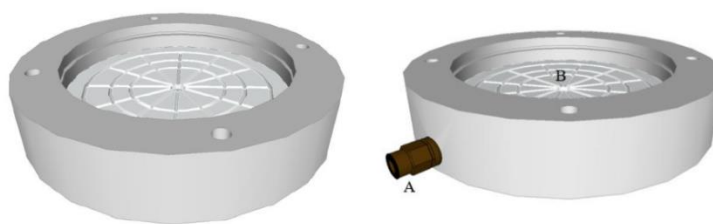
FONTE: Autoria própria, 2023.

Com os corpos de prova moldados, esses foram acoplados a uma base e a um topo, ambos feitos de Nylon 6 (PA6), e aparafusados, sendo a superfície de contato entre eles separada por filtro de manta bidim. Descrevendo mais sucintamente, a base é preparada com um anel de borracha e uma manta bidim no seu fundo para que então o corpo de prova compactado dentro do molde seja encaixado na base. No topo do molde outro anel de borracha e manta são posicionados, conseguindo do topo da célula que é encaixado com cuidado para que não haja movimentação, pois, a falta de contato direto entre as partes pode causar vazamentos. A garantia da fixação do topo com base é feita parafusando as quatro hastes metálicas bem apertadas com porcas de encaixe próprio.

Tanto a base quanto o topo possuem ranhuras radiais e concêntricas de formato circular. Esses sistemas de ranhuras têm o objetivo de receber, distribuir e coletar uniformemente o fluido sobre o contato com o corpo de prova.

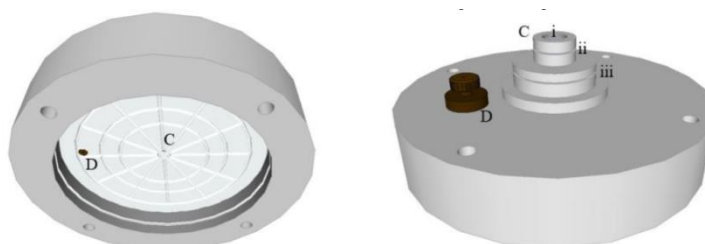
A base possui lateralmente um ponto de entrada para o fluido percolante (A), que se comunica ao seu centro (B) da face interna, como pode ser observado na Figura 22, enquanto que o topo possui um ponto de saída em seu centro (C) e um purgador para saída de ar (D), que podem ser observados nas Figura 23. Além disso, a parte externa do topo possui um suporte que permite conectar tubos de coleta de percolado de três diâmetros (i, ii, iii) (QUEIROZ, 2021).

Figura 22 - Esquematização: sistema radial e concêntrico de ranhuras, e ponto de entrada e saída de fluido na base.



FONTE: QUEIROZ, 2021.

Figura 23 - Esquematização: ponto de saída de fluido e purgador, ponto de saída de fluido, purgador e suporte para tubos de coleta na tampa.



FONTE: QUEIROZ, 2021.

Foram realizadas três repetições para os quatro tipos de material base selecionados, portanto, 12 corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados nos parâmetros ótimos das curvas de compactação, com desvio permitido de umidade de $\pm 2\%$ em relação a umidade ótima, com energia estática, e acoplados em suas células no equipamento por onde passaram dias saturando até que então os dados para a determinação da permeabilidade fossem colhidos. O alcance da saturação do material neste equipamento é presumido quando o fluido começa a surgir no interior da proveta e os valores de k medidos apresentem baixa variação. Isso, pois, aplicando um fluxo de água ascendente, e considerando o sistema ideal sem caminhos preferenciais de percolação, a água preenche todos os vazios do solo de baixo para cima expulsando o ar do corpo de prova que sai pelo topo livre da célula. Apesar de ser tratada como saturação total atingida, existe uma fragilidade nesse conceito devido a ser um parâmetro de complexa comprovação e inviável de ser medido ao longo da experimentação. Dessa forma consideramos que o grau de saturação está próximo a 100%. O tempo de saturação varia de acordo com o tipo de material, seu grau de compactação e a pressão de percolação.

No ensaio de permeabilidade utilizando o aparato de Caneschi (2012), a célula contendo o corpo de prova é ligada através de mangueiras flexíveis de alta pressão a células de interface contendo o fluido de percolação. Esta célula de interface segue o mesmo princípio do frasco de Mariotte, onde a pressão de ar comprimido é aplicada para garantir que o gradiente adotado atue sobre o fluido influenciando na sua vazão. Quando o corpo de prova é colocado em uma altura mais baixa que a altura da saída da interface, o gradiente hidráulico de percolação é gravitacional. Mas se houver necessidade de um gradiente maior aplicado no CP, é preciso aplicar uma pressão controlada de ar comprimido na célula de interface.

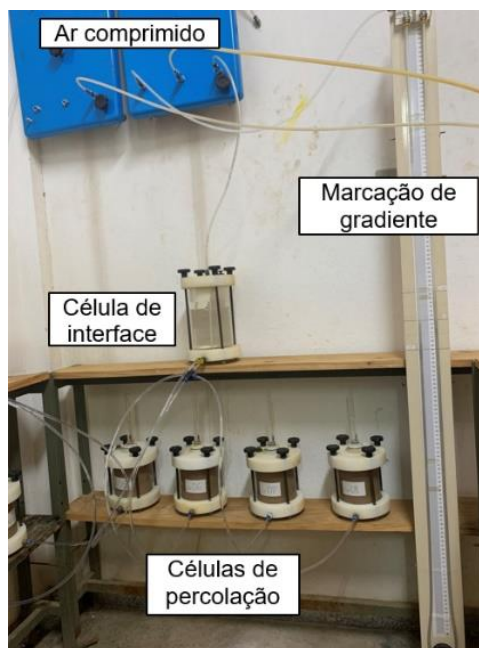
O fluido de percolação sai então da célula de interface sendo aplicado na base da célula de percolação induzindo um fluxo ascendente no corpo de prova. Quando o fluido surge na proveta encaixada na tampa da célula, considera-se que o corpo de prova está saturado. Com a saturação da célula de ensaio estabilizada, os dados de vazão nos ensaios de permeabilidade começam a serem feitos através da quantificação do volume da água percolado no intervalo de tempo de percolação ao qual cada corpo de prova foi submetido. O tempo de percolação variou entre os tipos de materiais ensaiados, ou seja, houveram corpos de prova em que o recolhimento do fluido foi possível algumas vezes por dia enquanto outros era feito apenas uma vez

devido ao tipo de solo presente no CP. A reposição do fluido é necessária ao longo da execução dos ensaios.

No presente trabalho o fluido selecionado para percolação em todos os corpos de prova, independentemente do tipo de material, foi a água destilada, para que o fluido de referência fosse sempre o mesmo, uma vez que a água de torneira, em função das condições em que a água chega nas estações de tratamento, esta pode sofrer pequenas alterações químicas durante os períodos de fornecimento. Toda água percolada foi recolhida, devidamente pesada, aferida sua temperatura, e anotado o tempo cronometrado da retirada.

Na Figura 24 é ilustrado um ensaio em andamento utilizando o aparato de Caneschi (2012) e aponta o local da saída de ar comprimido, a célula de interface, o regulador de gradiente e as células de percolação.

Figura 24 - Ensaio em andamento no aparato de Caneschi (2012).



FONTE: Autoria própria, 2023.

Em termos de coleta e manipulações de dados, deve ser relatado o horário do início da percolação e do momento da coleta do fluido percolado, a massa e a temperatura do fluido recolhido e o gradiente aplicado para percolação. Com a temperatura, o primeiro passo é a adequação da massa específica do fluido. Com essa massa específica do fluido, ρ , e a massa pesada, m , é calculado o volume de fluido, V :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Equação 6})$$

Sabendo, o volume de fluido percolado, V , e o tempo de percolação, Δt , dado pela diferença do horário de coleta e horário de início da percolação, calcula-se a vazão, Q , do fluido:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (\text{Equação 7})$$

A área do corpo de prova, A , dada pela área transversal interna do molde, o gradiente, i , definido como 15,2, e a vazão calculada anteriormente permitem a definição do coeficiente de permeabilidade, k , utilizando a Lei de Darcy:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (\text{Equação 8})$$

Esse coeficiente de permeabilidade, k , é referente aos dados de referência utilizados no ensaio, ou seja, é o k para o solo determinado na temperatura T medida durante o ensaio. Afim de facilitar a interpretação dos dados é estabelecido um valor chamado de k_{20} que é o coeficiente de permeabilidade em 20°C.

$$k_{20} = k \cdot \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde μ é a viscosidade do fluido na temperatura de ensaio e μ_{20} é a viscosidade do fluido a 20°C.

O princípio do ensaio começou com a preparação de todos os solos na segunda semana de março de 2022. Em sequência, os corpos de prova foram moldados dentro dos moldes de PVC como descrito anteriormente. No dia 18 de março de 2022 o sistema foi acoplado às 12 células de percolação, sendo 4 com Solo 3, 4 com Solo 2 e 4 com Solo 1, para saturação dos corpos de prova. O rejeito foi acoplado posteriormente devido a disponibilização do material. Como a saturação foi feita sem aplicação de ar comprimido, somente com a diferença gravitacional, o processo foi se estendeu mais que o previsto. Em meados de maio de 2022 o ensaio foi iniciado com as devidas coletas dos fluidos percolados. O último recolhimento de dados foi realizado no dia 23 de junho de 2022, totalizando 32 coletas dos CPs 01,

02, 03 e 04, Solo 3, 21 coletas dos CPs 05, 06, 07 e 08, Solo 2, 24 coletas dos CPs 09, 10, 11 e 12, Solo 1 e 80 coletas dos CPs 13, 14, 15 e 16, de Rejeito.

II. Ensaio de permeabilidade com carga constante conforme a ABNT NBR 13292 (ABNT 1995):

Foram realizados ensaios de acordo com as diretrizes da norma para a determinação do coeficiente de permeabilidade das areias estudadas. O ensaio foi realizado considerando duas repetições de cada areia visto que os dados obtidos ficaram bem próximos e satisfatórios.

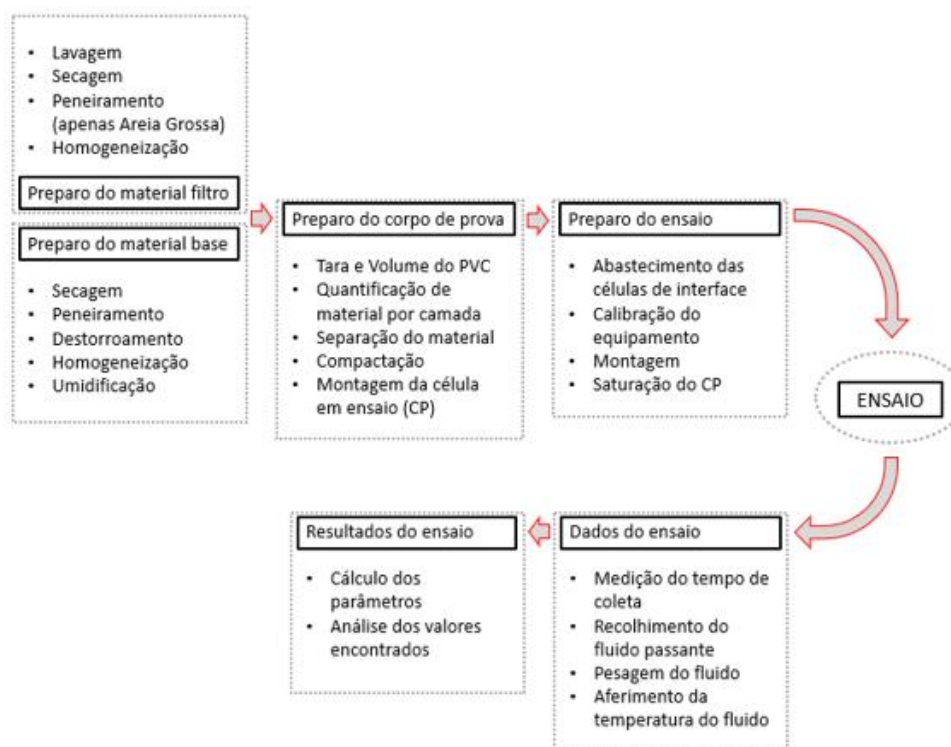
4.2.5 Ensaio de percolação com materiais combinados

O ensaio de percolação com materiais combinados foi proposto para análise do fluxo percolante e dos parâmetros permeáveis de dois materiais dispostos em contato direto dentro de um permeâmetro. Diferentemente da permeabilidade, este ensaio direciona a interpretação para o comportamento da vazão do sistema. A garantia de seu funcionamento exigiu adaptações no equipamento de Caneschi (2012) quanto ao corpo da célula de ensaio e à célula de interface. Na Figura 25 o fluxograma elucida os processos realizados para a realização do ensaio. Observa-se que se trata de um ensaio que segue a mesma ideologia executiva que o ensaio de permeabilidade de Caneschi (2012), entretanto, a primeira etapa sofreu alteração devido à necessidade também de executar a preparação do material filtro. É relevante ressaltar que o material resultante deste ensaio (fluido percolado) foi devidamente acondicionado para ser utilizados nos ensaios de turbidez e de sólidos em suspensão.

Partindo da justificativa de que o corpo da célula disponível não teria altura suficiente para utilização de dois materiais simultaneamente e que seus frisos não funcionariam de maneira ideal com o volume sendo preenchido meio a meio com dois materiais, foi estudado e construído um novo molde de PVC para célula. Adotou-se uma altura de 20 cm mantendo os 9,7 cm de diâmetro, permitindo assim a deposição de praticamente o mesmo volume da célula de Caneschi (2012) para cada material em uma montagem meio a meio. Em relação aos frisos, a nova célula contém quatro ranhuras de circunferências, duas para cada material, uma no início e outra ao final do volume destinado a cada material, para o impedir que ocorra o fluxo preferencial na parede do molde. Com o objetivo de avaliar as condições de fluxo através dos dois materiais no interior do molde, foram incluídas saídas laterais no PVC, nas quais foram

adaptados tubos piezométricos, permitindo dessa forma avaliar as perdas de carga em cada um deles.

Figura 25 - Fluxograma dos procedimentos realizados no ensaio combinado.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Na Figura 26 tem-se uma melhor visualização do novo molde utilizado. Assim, partindo da mesma dimensão de base do molde anterior, o novo PVC possui cerca de 9,7 cm interno de diâmetro e 20 cm de altura total. Internamente, apresenta dois frisos 4,0 cm distantes das bordas externas e 2,5 cm distantes do meio do molde, ou seja, originando o ponto referencial da extremidade existem quatro frisos nas respectivas alturas de 4,0 cm, 7,5 cm, 12,5 cm e 16,0 cm. Já as ligações das conexões são desalinhadas verticalmente para evitar a sobreposição das mangueiras e ficam nas alturas de 3 cm, 8,5 cm, 11,5 cm e 17 cm partindo do mesmo referencial.

A célula de interface, constituída das tampas e base brancas e o corpo de acrílico transparente, utilizada no equipamento de Caneschi (2012) tem capacidade de cerca de 1,4 litros de fluido percolante que sai da sua base através de uma mangueira flexível sendo aplicado ao corpo de prova para percolação. Para esse estudo, os parâmetros adotados para os materiais na moldagem envolvem um baixo grau de compactação das amostras, e assim consequentemente maior quantidade de vazios por onde o fluxo da água utilizada na percolação torna-se mais fácil e rápido.

Então, durante os testes de percolação com o material proposto foi constatado que devido à alta vazão de fluido, o volume disponibilizado na célula de interface seria consumido muito rápido inviabilizando assim sua utilização. Por isso, foi projetada a construção de uma nova célula de interface com alta capacidade volumétrica que atendesse à quantidade necessária de fluido para realização completa de um ensaio com alta vazão.

Figura 26 - Fotos do molde construído para a nova célula de percolação proposta.



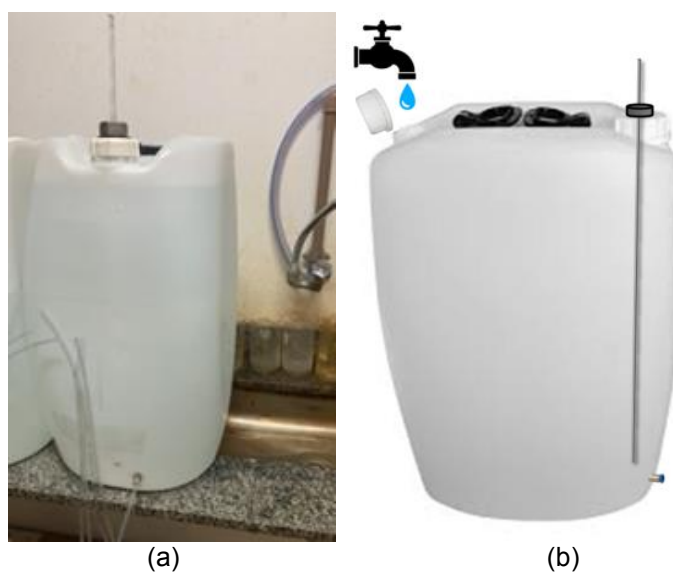
FONTE: Autoria própria, 2023.

Partindo do princípio de escoamento constante de um líquido obtido no frasco Mariotte, o mesmo utilizado no equipamento de Caneschi (2012), foi criado um novo mecanismo para armazenar o fluido de percolação e garantir seu fluxo de saída com gradiente constante. Como corpo da nova célula de interface construída foi utilizado um galão de 50 litros com duas aberturas rosqueáveis na parte superior. Na proximidade da sua base foi feito um pequeno furo e encaixado uma saída pneumática por onde ocorre a saída do fluido. Para garantir o princípio de constância no escoamento, um bastão de vidro vazado no meio ao longo do seu comprimento foi adaptado em uma das tampas superiores do galão. A posição da ponta do bastão dentro do galão determina a altura referencial do gradiente aplicado e a tampa à qual ele foi adaptado tem que estar bem vedada tanto no contato bastão/tampa como na rosca de encaixe do galão. A outra tampa superior do galão é utilizada para fazer o abastecimento do fluido no interior do mecanismo (Figura 27b). Apesar de ela não ser

fixamente fechada, uma borracha foi colocada no seu encaixe para garantir que ao fechar o rosqueamento fique bem vedado.

Quanto ao funcionamento do galão de interface, seu preparo demandava o enchimento do galão ao máximo com água, fluido utilizado nesta pesquisa, seguido por posterior certificação de vedação em todas as saídas rosqueáveis e aplicação do vácuo no interior do galão. Esse vácuo garante o funcionamento segundo o princípio do frasco de Mariotte e foi feito com a liberação do fluido inicial até a estabilização do gradiente interno da célula. Uma forma de checar o nível referencial interno do gradiente, dado na construção do mecanismo pela posição da ponta do bastão, é levantando a mangueira que estiver acoplada na saída pneumática da base e observar se o nível de água no interior dela estará coincidindo com a altura da base do bastão de vidro disposto dentro do líquido do galão. Na Figura 27 é apresentada a foto de um dos galões onde o mecanismo da nova célula de interface foi construído e a imagem ilustrativa da posição dos elementos de composição.

Figura 27 - Mecanismo criado para a adaptação da célula de interface (a) Foto do mecanismo utilizado (b) Imagem ilustrativa do posicionamento dos elementos de composição.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Para esse ensaio, o solo base utilizado foi destorroado com pilão com a ponta emborrachada, umedecido com base no parâmetro de umidade ótima e reservado por pelo menos 24h em sacos plásticos reforçados e vedados para que toda água adicionada umedecesse todas as partículas sem que houvesse perda de umidade. Todos os solos selecionados para estudo foram manuseados separadamente com atenção para que não houvesse contaminação de material. Quanto à preparação do

material filtro, esse foi lavado na peneira # 200 (0,75 mm) e posteriormente secado em estufa para o uso (Figura 28).

Figura 28 - Fotos da preparação do (a) material base – destorroamento, e do (b) material do filtro - lavagem.



FONTE: Autoria própria, 2023.

A moldagem foi definida de modo padronizado para todos os materiais. Assim como no molde original de Caneschi (2012), primeiramente ele foi preparado com bentonita em suas ranhuras da porção destinada ao material base. Para impedir o entupimento e o carreamento do solo no orifício pneumático acoplados ao novo molde, foi colocado um pequeno pedaço de papel filtro umedecido na frente das saídas pelo lado de dentro do molde (Figura 29).

Figura 29 - Foto do molde do corpo de prova devidamente preparado com bentonita e papel filtro



FONTE: Autoria própria, 2023.

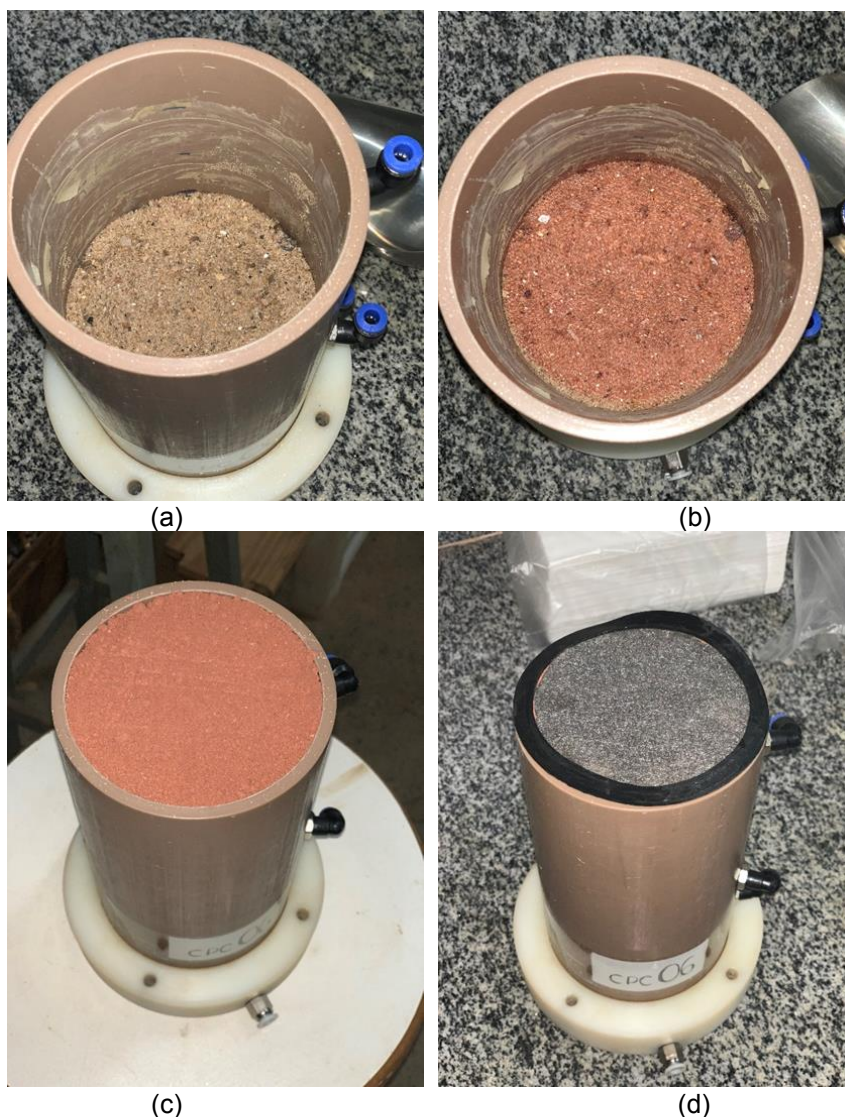
Os parâmetros adotados para compactação foram definidos após a constatação com testes de um grau de compactação limite para que o solo se sustentasse e ao mesmo tempo ocorresse o desprendimento de partículas facilmente, ou seja, o grau de compactação onde a força entre as partículas fossem o bastante para ter coesão e consistência e ao mesmo tempo tivesse bastante vazios no material oferecendo mais possibilidades de percolação e arraste de partículas mais finas. Assim, o grau de compactação foi definido de $60\% \pm 2\%$ para o solo base e $95\% \pm 2\%$ para o material filtro. Por se tratar de um estado fofo do solo, a compactação teve que ser feita já com a base encaixada no molde do corpo de prova. Como o material filtro estaria em contato direto com a parte interna da base da célula, optou-se pela não colocação da manta bidim no encontro da base com o material filtro.

Marcas internas foram feitas no molde para estabelecer as alturas com o mesmo volume sendo esse então dividido em 6 alturas iguais. A massa correspondente a cada volume foi calculada, previamente pesada e reservada momentaneamente em sacos plásticos descartáveis. A energia de compactação foi estática manual utilizando peso de 500 gramas até que a porção depositada atingisse a marca volumétrica definida. As 3 primeiras camadas compactadas foram de material filtro, ou seja, a metade do molde estava com material filtro compactados em 3 frações. Ao atingir a metade do corpo de prova foi colocado um tecido, tule colorido, como referência para que pudesse indicar a posição exata de contato entre o material filtro e o material base sem que interferisse na passagem da água e nem das partículas. Consequinte, as 3 últimas camadas de material base foram compactadas da mesma maneira, ou seja, a outra metade superior estava com o material base também compactados em 3 frações. Com a finalização da compactação e moldagem do corpo de prova, a borracha de vedação e a manta bidim foram dispostas no contato com o solo para então a colocação da tampa (Figura 30). A peça utilizada como tampa foi a com apenas um ponto de entrada e saída de fluxo, como na Figura 22, levando em consideração a condição descendente de fluxo adotada na pesquisa.

A compactação do solo-base moldado foi definida em torno de 60%. O ensaio de permeabilidade de Caneschi (2012) com alta compactação teve longa duração, então para otimizar o tempo de ensaio foi testado um valor de grau de compactação onde o solo estivesse num estado fofo e ainda assim estruturado e optou-se pelo GC de 60%. A lavagem do material filtro antes da moldagem foi adotada com objetivo de retirar os finos da granulometria de constituição para que assim pudéssemos atribuir

a presença de finos na areia após a percolação ao carregamento de partículas do material base. O quantitativo proposto para esse ensaio foi de 3 repetições de cada solo base com cada material filtro, ou seja, 12 corpos de prova com a areia natural e 12 corpos de prova com areia grossa, totalizando 24 corpos de prova.

Figura 30 - (a) Compactação do material filtro em camadas. (b). Colocação do tecido de separação. (c). Compactação do material base em camadas. (d). Colocação do anel de borracha e bidim.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Quanto ao funcionamento do ensaio de percolação, a células de interfaces foram posicionadas em uma bancada a meia altura e os permeâmetros perto do piso de modo que a carga hidráulica aplicada na percolação fosse apenas gravitacional. A altura do ponto final do tubo de vidro dentro do galão até o ponto de saída do fluido na célula de ensaio foi de 96,13 centímetros contabilizando a altura da mangueira que levou o líquido para dentro das garrafas. Considerando a perda de carga no material

filtro desprezível, o gradiente foi determinado em função da porção de solo do corpo de prova equivalendo então a um valor de 9,61. Uma mangueira flexível de alta pressão foi então ligada da saída do galão até a entrada do permeâmetro e na saída dele uma outra mangueira direcionou o fluido recolhido para dentro de um frasco limpo e etiquetado (Figura 31). O fluxo descendente da água foi adotado pensando na situação que mais facilitaria a infiltração das partículas no material filtro, ou seja, a favor da gravidade.

O fluido passante recolhido ao final da percolação pela célula foi enviado para análise de sólidos sempre levando em consideração o tempo medido e o peso da quantidade retida. Os primeiros 3 litros de material coletados são pesados e acondicionados em frascos fechados, os 2 litros seguintes são pesados e descartados para que novamente os próximos 3 litros sejam coletados, pesados e guardados, e assim por diante. Cada 3 litros recolhidos equivalem a um resultado de análise de sólidos em suspensão, e para cada corpo de prova foram recolhidos 5 pontos, totalizando 23 litros de fluido percolado em cada permeâmetro.

Quanto aos dados recolhidos durante o ensaio, foi determinada a vazão do fluido percolante de cada solo seguindo as mesmas equações de cálculo já utilizados para os processamentos dos dados da permeabilidade com equipamento de Caneschi (2012), (Equação 7). Apesar de ter sido utilizada os mesmos equipamentos de permeabilidade, este ensaio recolhe dados da vazão de saída para estudo de percolação de um fluido em um sistema com material base e filtro atuando simultaneamente.

Figura 31 - Fotos do ensaio em andamento.



FONTE: Autoria própria, 2023.

4.2.6 Ensaios de análises de sólidos

Em busca de maior compreensão da interferência da granulometria com relação ao fluxo de percolação e carreamento de partículas, os ensaios de sólidos em suspensão, turbidez e sólidos totais foram propostos como continuação experimental analítica.

A amostragem para a realização dos ensaios de turbidez e sólidos em suspensão foi recolhida no ensaio de permeabilidade combinada adaptada. Os fluidos de análise foram acondicionados em garrafas plásticas etiquetadas e mantidos em ambiente climatizado em torno de 20°C até a realização do ensaio, visto que não há característica biológica nestas análises dispensando a utilização de refrigeração.

Com auxílio e instrução da técnica do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) da Universidade Federal de Viçosa foram realizados os seguintes ensaios segundo APHA (1998):

I. Ensaio de turbidez (2130 - *Standard Methods for the Examination of Water and Waste water 20th Edition*):

A turbidez na água é causada por matéria suspensa e coloidal, como argila, silte, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, plâncton e outros organismos microscópicos. Trata-se uma expressão da proporção óptica que faz com que a luz seja espalhada e absorvida em vez de transmitida sem mudança de direção ou nível de fluxo através da amostra. A maioria dos turbidímetros comerciais projetados para medir turbidez baixa fornecem comparativamente boas indicações da intensidade da luz espalhada em uma direção específica, predominantemente em ângulos retos com a luz incidente. Turbidímetros com detectores de luz espalhada localizados a 90° do feixe incidente são chamados de nefelômetros. Os nefelômetros são relativamente pouco afetados por pequenas diferenças nos parâmetros de projeto e, portanto, são considerados o instrumento padrão para medição de turbidez baixa (APHA, 1998).

A medida da dificuldade de um feixe de luz atravessar certa quantidade de água é chamada de Turbidez. Quanto maior o espalhamento maior será a turbidez. A cor da água interfere negativamente na medida da turbidez devido à sua propriedade de absorver luz. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o limite máximo de turbidez em água potável deve ser 5 UNT. As águas subterrâneas normalmente não apresentam problemas devido ao excesso de turbidez (CORREIA, 2008).

O material recolhido nos frascos do ensaio de permeabilidade adaptado é utilizado para a realização tanto do ensaio de turbidez como de sólidos em suspensão normatizado. A cada ponto de análise aproximadamente três litros de fluido percolado foram coletados, e para que não houvesse divergência de resultados, o volume de cada frasco foi homogeneizado por completo num béquero de 4 litros tornando-a uma única amostra.

O ensaio de turbidez é feito num equipamento próprio normatizado, o turbidímetro portátil sendo necessário que inicialmente seja feita sua calibragem segundo o intervalo esperado de resultados. As análises propostas são apresentadas na unidade nefelométrica de turbidez (NTU ou UNT). Uma pequena fração do fluido é então depositado no recipiente próprio do equipamento para a realização do ensaio. Para cada ponto de análise foi determinado uma leitura de turbidez.

II. Ensaio de sólidos em suspensão (2540D - *Standard Methods for the Examination of Water and Waste water 20th Edition*):

O ensaio de sólidos em suspensão foi realizado segundo a APHA (1998) e utilizando o filtro de fibra de vidro GF/C 47mm x 1,2um. Para cada ponto de análise o volume total da amostra homogeneizada, de aproximadamente 3 litros de fluido, foi passado no conjunto de filtragem. Quando a capacidade de filtragem da membrana foi excedida antes de completar a passagem do volume total de litros, o volume passante foi reportado. Nos casos onde esse volume passante foi menor que a metade da quantidade total de material do ponto de análise, realizou-se mais uma filtragem com o material restante a fim de recolher dados para retirar a média e agregar mais confiabilidade ao resultado analítico do material desse ponto. Na Figura 32 são ilustrados os equipamentos utilizados para a realização do ensaio. O conjunto de filtração, a bomba a vácuo e a membrana são essenciais para a execução.

Pela diferença de peso da membrana utilizada na filtragem da amostra é possível quantificar os sólidos em suspensão. Conhecendo o volume exato de cada amostra acondicionada por ponto de análise, obtém-se uma relação de quantidade de sólidos em suspensão por volume amostrado em cada fase do ensaio de permeabilidade combinada. Na Figura 33 podem ser observadas as membranas referentes ao ensaio realizado no corpo de prova MB03 que era formada por Solo 1 e areia natural.

Figura 32 - Equipamentação de filtragem utilizado no ensaio de sólidos em suspensão.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 33 - Foto das membranas do ensaio realizado na amostra MB03.



FONTE: Autoria própria, 2023.

III. Ensaio de sólidos totais (2540G - *Standard Methods for the Examination of Water and Waste water 20th Edition*):

Esse ensaio de sólidos totais foi proposto com o objetivo de possibilitar uma interpretação sobre o comportamento de carreamento de finos do material base pelo material do filtro. Para isso, o desmonte da célula adaptada do ensaio de permeabilidade foi feito com todo cuidado para que o material do filtro percolado fosse recolhido sem contaminação e interferência externa. Com esse material separado, ele foi submetido novamente a lavagem na peneira # 200 (0,75mm) tomando o cuidado de reservar a água contaminada passando pelo peneiramento. Prezando pela constância, foi utilizado até cerca de 2L de água para a lavagem de cada material filtro.

Na Figura 34 são apresentadas fotos do processo de estratificação dos materiais do corpo de prova, sempre com todo cuidado para que não houvesse contaminação e perda de material ensaiado. Na Figura 35, é ilustrado o processo de

lavagem do material e consequente preparação do líquido com sólidos passante da peneira 200.

Figura 34 - (a) Retirada do material filtro do corpo de prova. (b) Lavagem do material filtro retido na base do corpo de prova. (c) Interface de contato material filtro e material base dividida com tecido de tule. (d) Retirada do material base do corpo de prova.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Com o preparo da água de lavagem foi possível realizar o ensaio secando o material em estufa a 110°C. Os materiais dos recipientes foram sucessivamente repostos até que todo volume lavado estivesse seco, restando apenas a massa dos sólidos totais passantes na peneira 200 presente no material filtro. A Figura 36 contém imagens da estufa onde o ensaio foi realizado, do dessecador onde a amostra pode

esfriar sem que houvesse ganho de umidade, e de algumas amostras ao final do ensaio.

O ensaio dos sólidos totais foi então realizado com a água da lavagem afim de recolher dados comparativos quanto à quantidade de fino retida no material filtro com a percolação de água. Para cada corpo de prova ensaiado um quantitativo de sólidos totais finos retido em seu material filtro foi determinado através da diferença de peso do recipiente antes e depois da secagem de toda água utilizada para a lavagem da areia.

Figura 35 - Fotos do processo de lavagem do material filtro extraído de um corpo de prova ensaiado.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 36 - Ensaio de sólidos totais.



FONTE: Autoria própria, 2023.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa etapa deste estudo consistiu na apresentação e discussão dos dados obtidos nos ensaios propostos. A metodologia utilizada permitiu além das análises individuais, estabelecer relações de comparação dos materiais base para diferentes materiais filtro.

5.1 Caracterização

A caracterização dos materiais propostos na pesquisa foi definida a partir das necessidades experimentais analíticas. Por isso, os ensaios propostos para os materiais base são diferentes dos filtros e são apresentados a seguir separadamente. Uma atenção especial deve ser dada ao ensaio granulométrico devido sua essencialidade na determinação dos parâmetros de dimensionamento.

5.1.1 Materiais base

A obtenção dos parâmetros de umidade ótima (w_{ot}), e peso específico máximo de um solo ($\gamma_{d,max}$), é dada a partir das suas curvas de compactação e segue a norma ABNT NBR 7182 (ABNT, 2020). Na Figura 37 (a, b, c, d) a seguir é possível visualizar a curva formada com os pontos compactados obtidos para os solos trabalhados. Nos pontos de máximo das curvas se encontram as coordenadas correspondentes aos valores de umidade e peso específico seco. Assim, para o Solo 1 w_{ot} é 31,00% e $\gamma_{d,max}$ é 13,93kN/m³; para o Solo 2 w_{ot} é 23,13% e $\gamma_{d,max}$ é 15,68kN/m³; para o Solo 3 w_{ot} é 15,00% e $\gamma_{d,max}$ é 17,17kN/m³; e para o Rejeito w_{ot} é 12,30% e $\gamma_{d,max}$ é 20,90kN/m³.

Os valores obtidos em todos os ensaios de caracterização dos materiais base utilizados nesta pesquisa estão apresentados de forma resumida na Tabela 11.

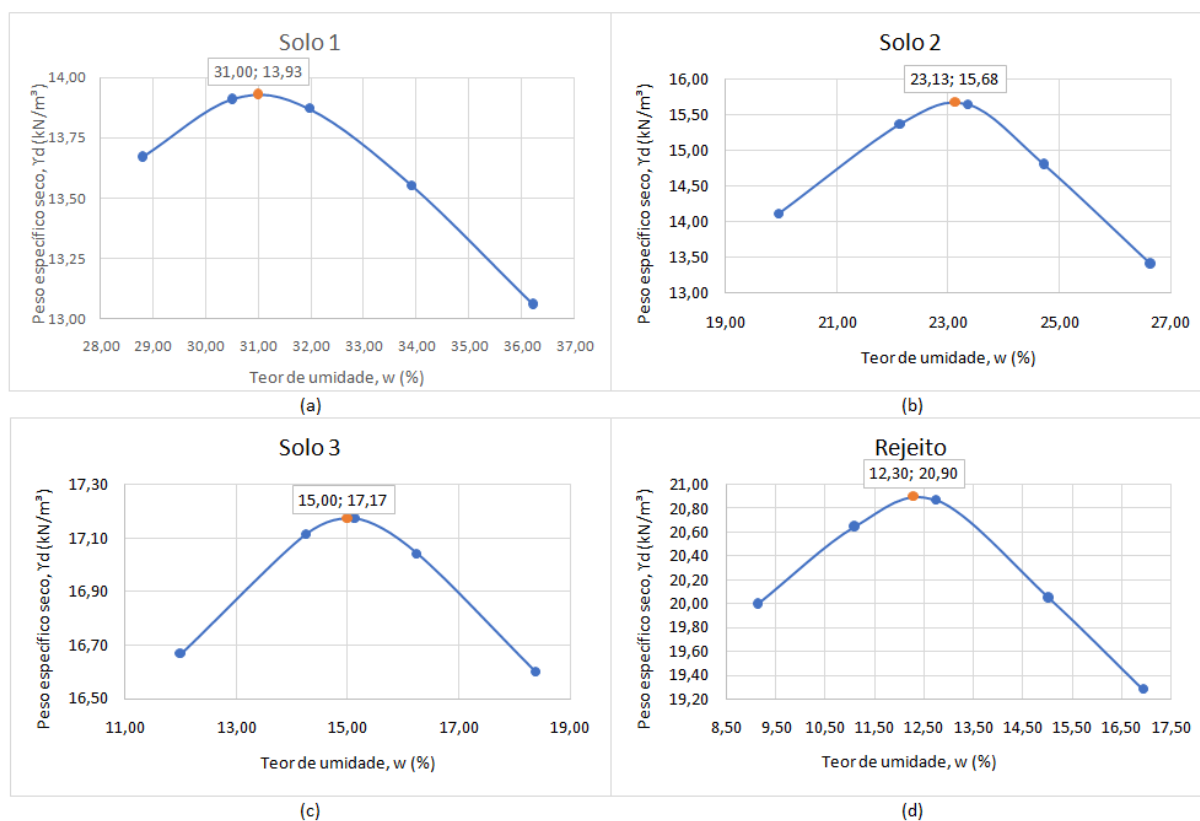
A caracterização dos materiais foi feita a partir dos resultados encontrados para os Limites de Atterberg, massa específica dos sólidos, granulometria e classificação apenas para os solos. Partindo das diretrizes da norma ABNT NBR 6458 (ABNT, 2017), o valor de massa específica dos sólidos (ρ_s) para o Solo 1 foi de 2,87 g/cm³, para o Solo 2 foi de 2,59 g/cm³, para o Solo 3 foi de 2,66 g/cm³, e para o Rejeito foi de 3,27 g/cm³.

Tabela 11 - Resumo dos resultados de caracterização dos materiais base

			Solo 1	Solo 2	Solo 3	Rejeito
Granulometria	Argila	%	66	5	5	11
	Silte	%	11	42	24	58
	Areia	%	23	53	68	31
	Pedregulho	%	0	0	3	0
Caracterização	ρ_s	g/cm ³	2,87	2,59	2,66	3,27
	LL	%	78	42	38	23
	LP	%	43	21	18	15
	IP	%	35	21	20	8
	USC		MH	CL	SL	
Compactação	W _{ot}	%	31,00	23,13	15,00	12,30
	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$	kN/m ³	13,93	15,68	17,17	20,90

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 37 - Curvas de compactação dos materiais base (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Rejeito.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Os limites de Atterberg, nesse estudo foram dados pelos parâmetros de limite de liquidez (LL), e de limite de plasticidade (LP), e índice de plasticidade (IP), segundo previsto nas normas ABNT NBR 6459 (ABNT, 2017a) e ABNT NBR 7180 (ABNT, 2016a). Na Tabela 12 a seguir apresentam-se os valores correspondentes para cada material base em estudo.

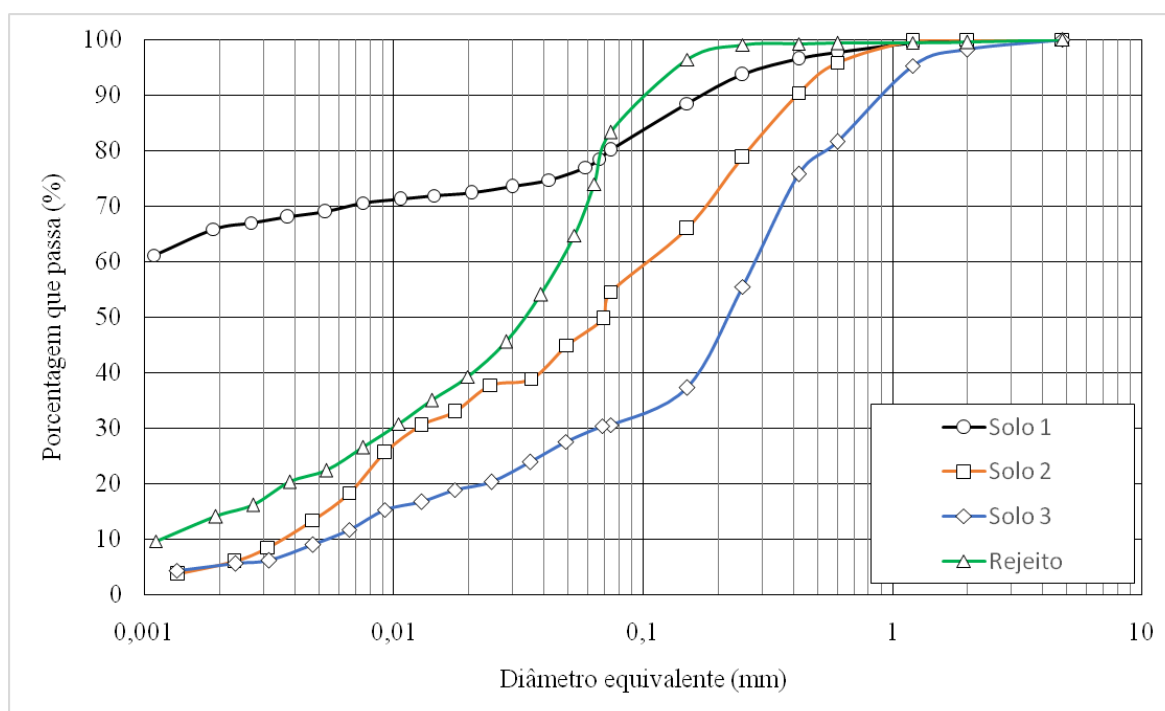
Tabela 12 - Limites de consistência dos solos estudados.

	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo 1	78	43	35
Solo 2	42	21	21
Solo 3	38	18	20
Rejeito	23	15	8

FONTE: Autoria própria, 2023.

Essencial para este estudo, a definição das curvas granulométricas é determinante para os cálculos dos critérios de dimensionamento de filtro de obra de terra. A análise granulométrica realizada segundo a ABNT NBR 7181 (ABNT, 2017b) abrange a formação da curva granulométrica de cada material e a quantificação das composições de argila, silte, areia e pedregulho, presentes. A Figura 38 a seguir apresenta dos gráficos com a curva constituinte de cada material e na Tabela 13 se encontram as composições das frações granulométricas de cada solo.

Figura 38 - Curvas granulométricas dos solos estudados como materiais base.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Tabela 13 - Quantificação das frações granulométricas dos solos estudados.

	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Solo 1	66	11	23	0
Solo 2	5	42	53	0
Solo 3	5	24	68	3
Rejeito	11	58	31	0

FONTE: Autoria própria, 2023.

Em função dos resultados da análise granulométrica e dos limites de consistência, foi possível classificar os solos segundo o sistema unificado de classificação dos solos (USC, *Unified Soil Classification*) como:

Solo 1: MH – Silte de alta compressibilidade

Solo 2: CL – Argila de baixa compressibilidade

Solo 3: SC – Areia argilosa

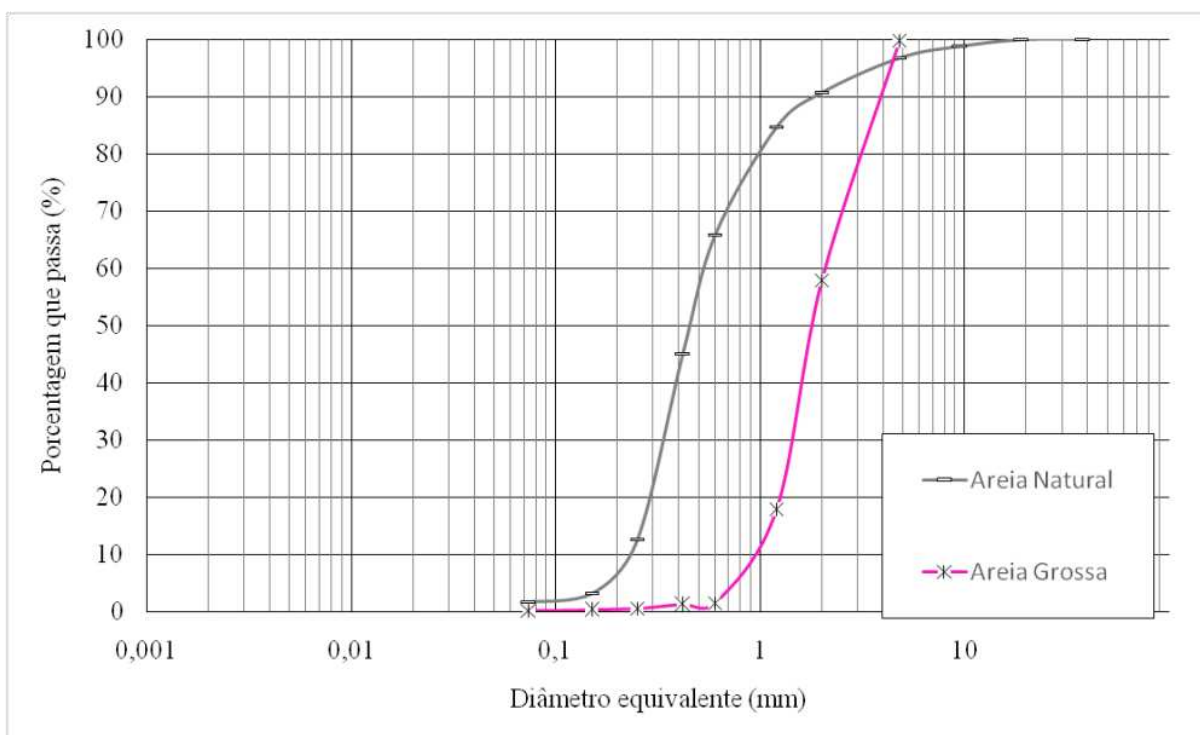
A escolha desses quatro materiais base como possíveis materiais a serem protegidos por um filtro na drenagem de água de sua estrutura abre possibilidades de construção e compreensão de cenários geotécnicos. A análise comportamental do contato desses diferentes materiais com o material filtro fomenta uma percepção e interpretação que vai além do usual. Tratam-se de solos com origens naturais de formação e o Rejeito, que é um material que já foi trabalhado em inúmeros processos e possui variáveis que influenciam diretamente no seu comportamento, dificultando em muitos casos análises comparativas estipuladas pela teoria de mecânica dos solos. Ao trabalhar com o Rejeito podem ocorrer resultados completamente diferentes ou contrários aos esperados pelos estudos de solos. Isso acontece por tratar-se de um sedimento que sofreu muitos manejos executados na mineração, como frente de lavra e filtragem. Esse beneficiamento engloba muitas variáveis que influenciam diretamente nas características e comportamentos desse material fabricado. Portanto, a classificação do Rejeito nesta pesquisa é feita como Rejeito de fração silto-arenosa baseada em sua granulometria. Apesar de toda essa diferenciação, todos os materiais caracterizados são tratados nesta pesquisa como solo-base ou material base.

5.1.2 Materiais filtro

Para os materiais filtro obteve-se o valor de massa específica dos sólidos para a areia natural de 2,684 g/cm³ e para a areia grossa de 2,665 g/cm³. Já a análise

granulométrica compôs as seguintes curvas e porcentagens de material na sua composição apresentados na Figura 39 e Tabela 14. A curva granulométrica dos dois materiais lado a lado evidencia como a granulometria deles é diferente. Apesar dos dois materiais não apresentarem nenhuma porcentagem de argila e silte, suas porcentagens de areia e pedregulho são bem distintas, sendo a Areia Natural composta em sua maioria por areia e a Areia Grossa composta por uma porção de areia maior que pedregulhos, entretanto com uma diferença de mais de 30% na fração arenosa quando comparado os dois materiais. Os valores encontrados na análise granulométrica condizem com a ideia de a areia natural ser mais bem graduada e ter mais finos preenchendo seus vazios.

Figura 39 - Curvas granulométricas dos solos estudados como materiais filtro.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Tabela 14 - Quantificação das porções das análises granulométricas dos solos estudados.

	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Areia Natural	0	0	91	9
Areia Grossa	0	0	57	43

FONTE: Autoria própria, 2023.

A análise qualitativa da presença de matéria orgânica na areia adquirida para realização dos ensaios foi feita numa porção retirada após todo montante ter sido

devidamente seco e homogeneizado. Levou-se em consideração que este seria o pior cenário granulométrico uma vez que a manipulação do material para utilização ou peneiramento acaba eventualmente causando perdas de partículas. O resultado deste ensaio foi obtido a partir da comparação das cores dos líquidos expostos à reação química. Como a tonalidade obtida na areia ficou mais clara do que a solução padrão, o índice de matéria orgânica presente no agregado foi considerado aceitável. A imagem da Figura 40 a seguir ilustra o resultado final comparativo satisfatório da areia utilizada na pesquisa quanto seu quantitativo de matéria orgânica presente, uma vez que a solução mais escura do frasco da esquerda é a solução padrão para comparação visual segundo norma, e a solução de cor marrom claro do frasco da direita é a solução de reação de matéria orgânica da areia utilizada. No frasco do meio foi colocado vazio entre os comparativos apenas para separação.

Figura 40 - Resultados do ensaio de determinação de impurezas orgânicas em agregados.



FONTE: Autoria própria, 2023.

A Tabela 15 apresenta os resultados de caracterização de todos os materiais utilizados nesta pesquisa, tanto dos materiais base quanto dos materiais filtro.

Tabela 15 - Resumo dos resultados de caracterização de todos os materiais trabalhados na pesquisa.

			Solo 1	Solo 2	Solo 3	Rejeito	Areia natural	Areia grossa
Granulometria	Argila	%	66	5	5	11	0	0
	Silte	%	11	42	24	58	0	0
	Areia	%	23	53	68	31	91	57
	Pedregulho	%	0	0	3	0	9	43
Caracterização	ρ_s	g/cm ³	2,87	2,59	2,66	3,27	2,684	2,665
	LL	%	78	42	38	23		
	LP	%	43	21	18	15		
	IP	%	35	21	20	8		
	USC		MH	CL	SL			
Compactação	W _{ot}	%	31,00	23,13	15,00	12,30		
	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$	kN/m ³	13,93	15,68	17,17	20,90		

FONTE: Autoria própria, 2023.

5.2 Dimensionamento do material filtro

Levando em consideração os critérios discutidos na bibliografia desse estudo, a Tabela 16 apresenta as correlações calculadas.

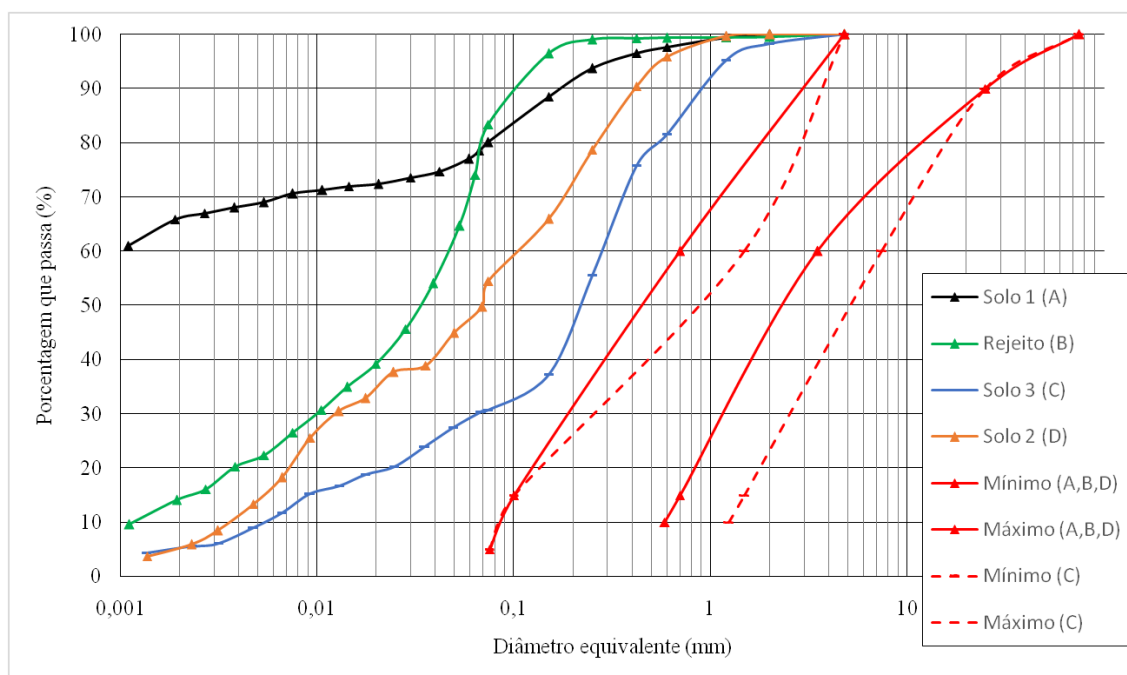
Tabela 16 - Critério de dimensionamento do material filtro para cada solo base.

DIMENSIONAMENTO DO MATERIAL FILTRO								
		Material Base			Material Filtro			
		d ₁₅	d ₈₅	d ₅₀				
		A SOLO 1	0	0,128	0			
		B REJEITO	0,0021	0,08	0,0351			
		C SOLO 3	0,0089	0,7	0,069			
D SOLO 2		0,0052	0,332	0,227				
CRITÉRIOS	Terzaghi	A				0 ≤	D ₁₅	≤ 0,512
		B				0,0084 ≤	D ₁₅	≤ 0,32
		C				0,0356 ≤	D ₁₅	≤ 2,8
		D				0,0208 ≤	D ₁₅	≤ 1,328
	USBR	A				0 / 0	=	D ₁₅ ≤ 0,64
		B				0,0105 / 0,084	=	D ₁₅ ≤ 0,4
		C				0,0445 / 0,356	=	D ₁₅ ≤ 3,5
		D				0,026 / 0,208	=	D ₁₅ ≤ 1,66
				curva paralela ao material base				
				D _{max} =75mm				
	Sherard e Dunningan	A				D ₁₅ < 0,7	só areia (4,8mm até 40%)	
		B				D ₁₅ < 0,7	só areia (4,8mm até 40%)	
C		% passante (#200)		99,78813	D ₁₅ < -4,3222			
D					D ₁₅ < 0,7	só areia (4,8mm até 40%)		

FONTE: Autoria própria, 2023.

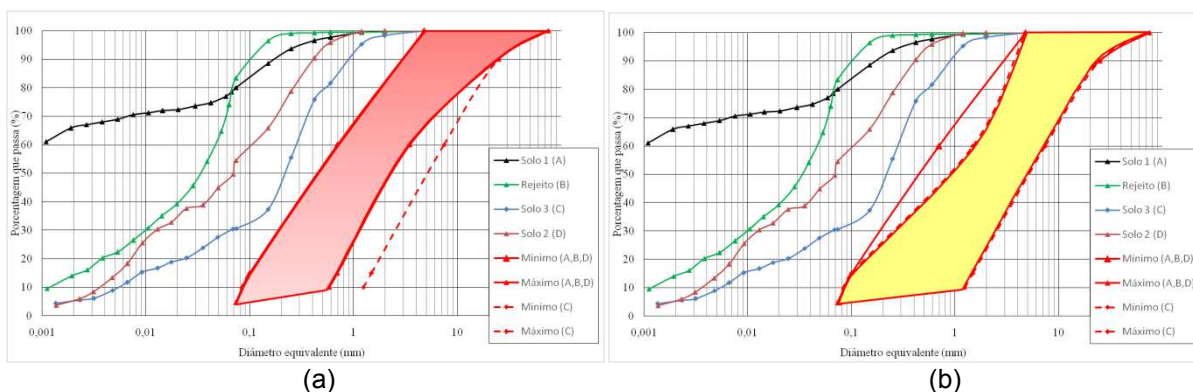
Com base no passo a passo proposto por Pimenta Filho (2013) e Fell *et al* (2005) foram definidos os intervalos de granulometria adequados para cada um dos materiais base desse estudo. A Figura 41 expõe tanto as curvas granulométricas dos solos e rejeito, como também o intervalo granulométrico calculado para eles. O intervalo encontrado para os Solos 1, 2 e para o Rejeito foi o mesmo e está compreendido dentro dos limites destacados com linhas vermelhas contínuas. Já o intervalo calculado para o Solo 3 está delimitado no gráfico abaixo por linhas tracejadas vermelhas. Na Figura 42 estão destacados os intervalos de dimensionamento calculados para os materiais Solo 1, Rejeito e Solo 2 (a) em vermelho, e para o Solo 3 (b) em amarelo.

Figura 41 - Gráfico dos intervalos proposto para material filtro de cada material base.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 42 - Gráficos com os intervalos de material filtro para (a) Solo 1, Rejeito e Solo 2, (b) Solo 3

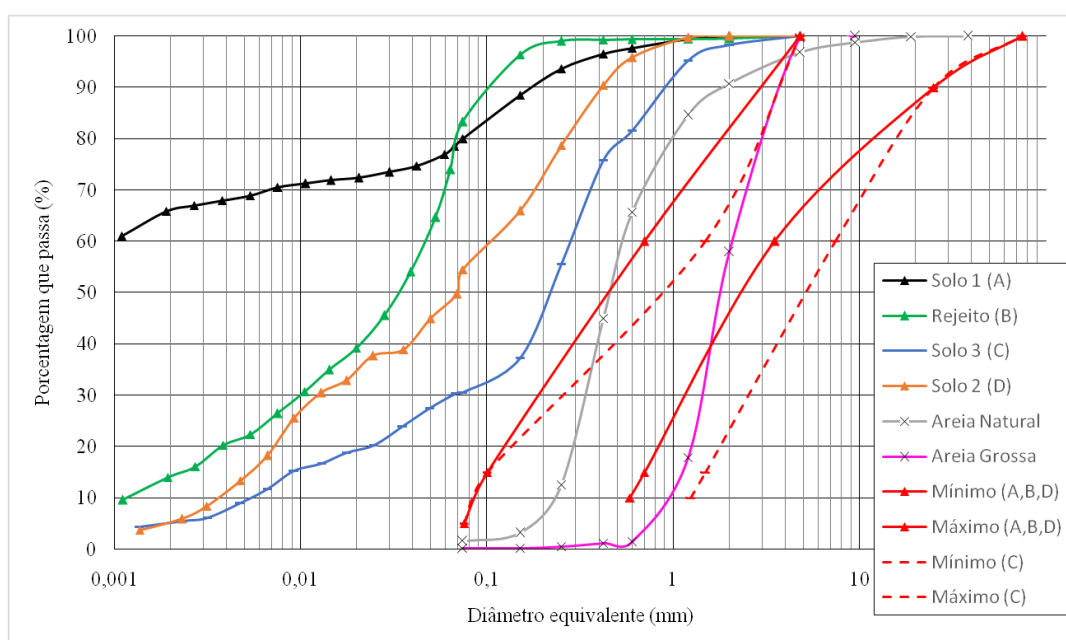


FONTE: Autoria própria, 2023.

Apesar da diferença considerável nas granulometrias dos materiais Solo 1, Rejeito e Solo 2, a faixa granulométrica indicada para o material filtro foi a mesma. Isso acaba acontecendo devido aos valores limites do dimensionamento. As definições estipulam um valor mínimo ou máximo fixo para alguns dos pontos o que acaba sendo adotado ao final da compatibilização de dados, por exemplo, $D_{5min} = 0,075 \text{ mm}$ (Tabela 9). Vale ressaltar que o passo-a-passo deixa abertura para ajustes e tomada de decisões baseadas em justificativas de prática ou de projeto, como por exemplo, quanto ao coeficiente de uniformidade adotado, uma vez que a NRCS indica que $C_u \leq 6$ podendo então ser qualquer valor até 6 desde que aplicável e seguro segundo conhecimentos e experiências na área para tal adequação. As relações envolvendo valores maiores que, ou menores que, permitem ajustes que normalmente só são adotados nos casos de vasto conhecimento, pois influenciam diretamente em parâmetros como o coeficiente de uniformidade do material filtro e consequentemente na eficiência dos mecanismos de filtragem.

Aplicando as granulometrias das areias propostas para os materiais filtro nos intervalos dimensionados, observa-se que nenhuma das duas são completamente compreendidas. A areia grossa ficou dentro do intervalo na parte superior da curva, já a areia natural ficou dentro do intervalo na parte inferior da curva, como pode ser constatado na Figura 43 com a granulometria da areia grossa destacada na cor rosa e com a granulometria da areia natural apresentada na cor cinza.

Figura 43 - Gráfico das curvas granulométricas dos materiais base e filtro.

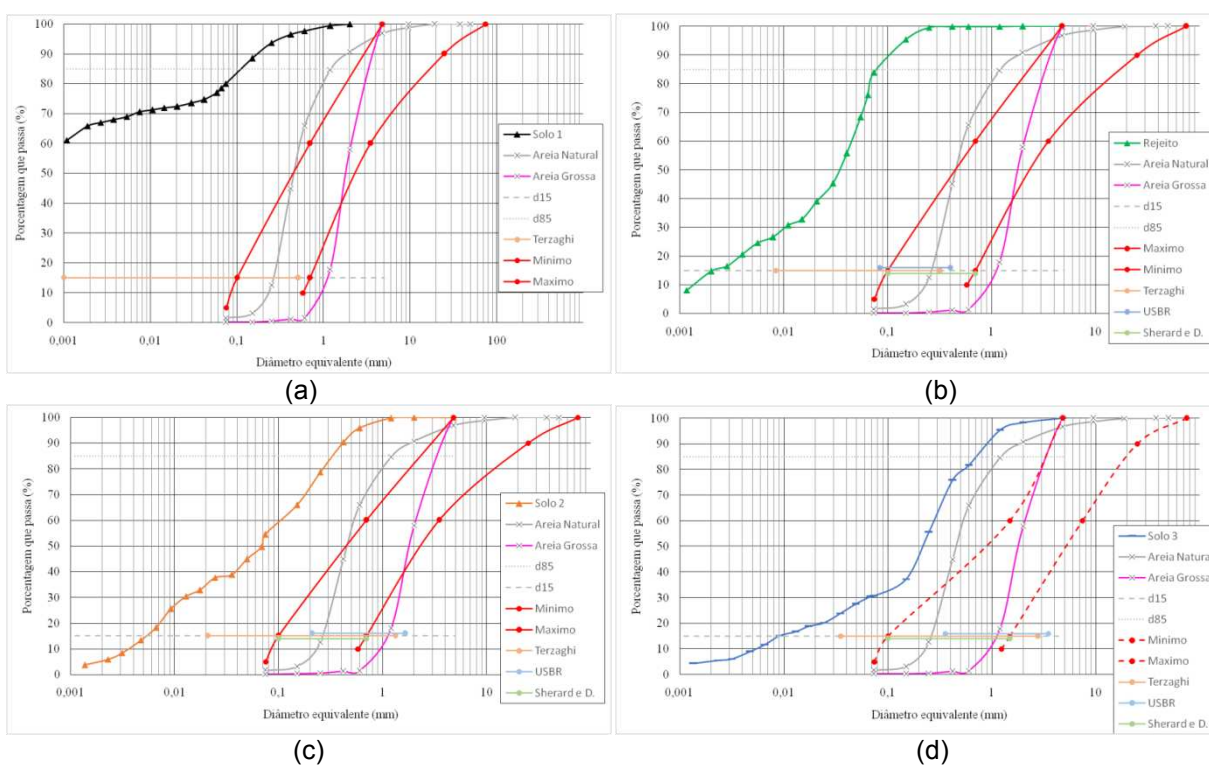


FONTE: Autoria própria, 2023.

Os critérios clássicos de dimensionamento levam em consideração principal a definição do intervalo granulométrico de D15 para um material filtro, ou seja, é definido um intervalo possível que compreende um valor aceitável para o diâmetro equivalente de uma malha de peneiramento para que apenas 15% do material consiga passar por ela. Na Figura 44 estão ilustradas as curvas granulométricas de cada material com as análises de dimensionamento propostas por Terzaghi, USBR e Sherard e Dunningan, assim como o seu intervalo correspondente já definido no passo-a-passo.

Dando enfoque à compatibilização granulométrica em D15, observa-se nos gráficos a e b da Figura 44 que apenas a areia natural pode ser considerada adequada, mas no gráfico c da mesma figura além da adequação da areia natural, a areia grossa também satisfaz os intervalos propostos pelos critérios de Terzaghi e da USBR. Ou seja, para o Solo 1 e Rejeito a areia natural é o material ideal, já no caso do Solo 2, existe a possibilidade de ser a areia natural ou a grossa. No caso do Solo 3 (Figura 44d), a areia grossa compreende todos intervalos proposto pelos critérios de dimensionamento, já a areia natural não está adequada aos valores possíveis de D15 estabelecidos pela USBR.

Figura 44 - Gráficos dos intervalos de dimensionamento para o material base com os materiais filtro
(a) Solo 1 (b) Rejeito (c) Solo 2 (d) Solo 3.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Em uma situação hipotética de projeto, levando em consideração apenas os critérios clássicos, o material filtro interpretado como mais adequado a ser utilizado seria a areia natural. Apesar de nenhum dos materiais filtro trabalhados estarem compreendidos completamente no intervalo granulométrico calculado, a areia natural foi o material que atendeu aos critérios de D15 nos solos 1 e 2 e no Rejeito, e também teve grande adesão no Solo 3. Entretanto, uma investigação mais profunda pode assegurar uma tomada de decisão mais segura e consciente sendo então necessário investigações experimentais, como as seguintes.

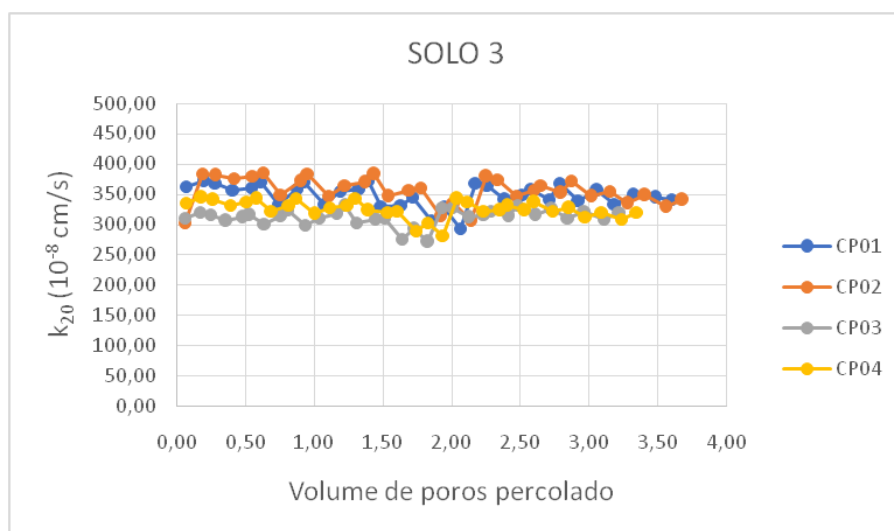
5.3 Permeabilidade

I. Permeabilidade com equipamento de Caneschi (2012):

Considerando os dados recolhidos do ensaio para cada respectivo solo-base, foram ilustrados gráficos de dispersão com cada leitura recolhida para que fosse possível observar o desenvolver de cada permeabilidade.

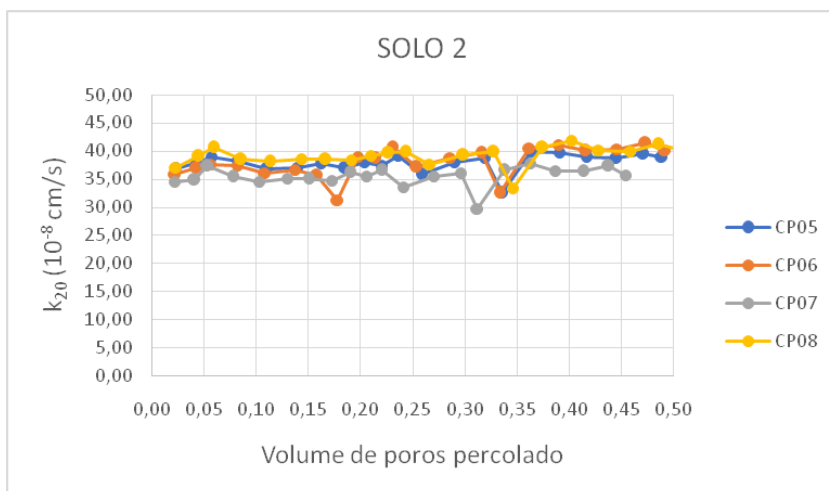
As Figuras Figura 45, Figura 46, Figura 47 e Figura 48 a seguir apresentam os gráficos com os resultados plotados. As determinações de k_{20} estão expressas em função do volume de poro percolado (vpp), e os gráficos organizados por tipo de solo ensaiado com os dados individuais dos corpos de prova correspondentes.

Figura 45 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Solo 3.



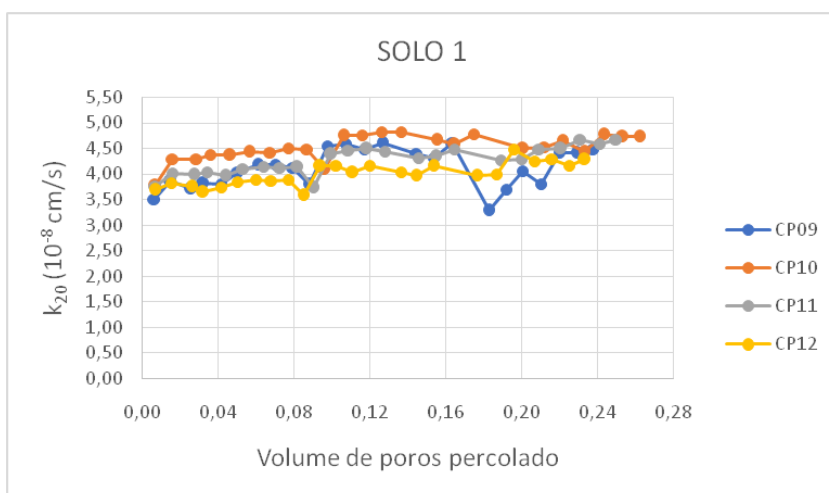
FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 46 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Solo 2.



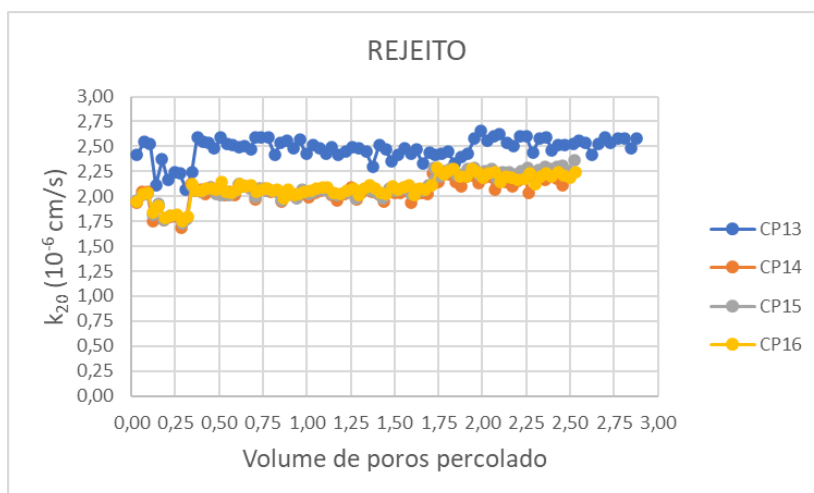
FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 47 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Solo 1.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 48 - Gráfico de permeabilidade em função dos poros percolados, Rejeito.



FONTE: Autoria própria, 2023.

A média dos valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade a 20°C dos ensaios de permeabilidade, realizados com quatro repetições, assim como o respectivo desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 17, para o gradiente de 15,2.

Tabela 17 - Análise descritiva dos ensaios de permeabilidade dos solos para cada repetição.

Material	Repetição A			Repetição B			Repetição C			Repetição D		
	k_{20}^1	S^1	CV^2	k_{20}^1	S^1	CV^2	k_{20}^1	S^1	CV^2	k_{20}^1	S^1	CV^2
Solo 3	349	18,9	0,05	356	22,7	0,06	312	13,8	0,04	325	15,0	0,05
Solo 2	37,9	1,65	0,04	37,9	2,71	0,07	35,4	1,69	0,05	39,1	1,78	0,05
Solo 1	4,11	0,38	0,09	4,52	0,25	0,06	4,26	0,27	0,06	3,99	0,23	0,06
Rejeito	248	11,5	0,05	205	11,3	0,05	209	13,8	0,07	209	11,7	0,06

k_{20} – coeficiente médio de permeabilidade a 20°C; S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação;

¹ – unidade de 10^{-8} cm/s; ² – unidade de %.

FONTE: Autoria própria, 2023.

Analisando a Tabela 17, observa-se que para todas as repetições realizadas em cada solo o coeficiente de variação foi menor que 0,1% o que confirma a uniformidade dos dados e consequente comportamento dos solos-base sob percolação de água. Considerando a média dos últimos três valores de k_{20} obtidos em cada CP foi possível definir o valor final do coeficiente de permeabilidade para cada solo neste ensaio. Assim, para o Solo 3 foi de $3,29 \times 10^{-6}$ cm/s, para o Solo 2 de $3,91 \times 10^{-7}$ cm/s, para o Solo 1 de $4,52 \times 10^{-8}$ cm/s, e para o Rejeito de $2,31 \times 10^{-6}$ cm/s.

Correlacionando os valores de permeabilidade encontrados com as frações granulométricas de cada material obtida na caracterização, observa-se que apesar do Solo 2 conter sua fração arenosa mais de 20% acima do Rejeito, a permeabilidade do Rejeito foi maior que a definida para o Solo 2. Fato que se baseado na teoria de mecânica dos solos clássica não aconteceria uma vez que a presença da areia num solo está diretamente ligada à sua capacidade de percolação de um fluido. Portanto, existem diversas variáveis que influenciam na determinação da condutividade hidráulica desse material fabricado que é o Rejeito.

Com a definição do parâmetro de permeabilidade para os solos desse estudo, eles podem ser classificados em termos de facilidade de percolação de água sendo o mais permeável o Solo 3, seguindo do Rejeito, Solo 2, e por fim, o menos permeável o Solo 1. Comparando numericamente, o Solo 1 tem pouco mais de 1% da capacidade de percolação do Solo 3.

Relacionando os resultados de permeabilidade com os de granulometria definidos na caracterização dos materiais base, é possível correlacionar o baixo valor de k_{20} do Solo 1 com o alto teor de argila na sua composição, uma vez que as argilas são reconhecidas no meio geotécnico como minerais finos com elevada área de superfície de partícula para sua massa fazendo com que consequentemente suas partículas sofram forte interação. Já o Solo 3, que possui maior coeficiente de permeabilidade apresenta alta porcentagem de areia em sua composição, que são solos granulares não coesivos.

Dentre os vários parâmetros que influenciam na permeabilidade citados nessa bibliografia, a estrutura do solo é uma das mais complexas. A estrutura de um material corresponde ao arranjo das partículas primárias com as demais substâncias, desde formatos geométricos até interação de elétrons presentes na camada superficial dos grãos.

A espessura da dupla camada difusa é função da densidade de carga, do potencial elétrico na superfície, da concentração eletrolítica, da valência do cátion, do pH, da constante dielétrica do meio e da temperatura. A mudança de alguma característica que influencia nesta espessura, pode gerar aumento ou redução da dupla camada difusa, e como, as forças de atração e repulsão das partículas estão integralmente ligadas a esta espessura, as mesmas serão alteradas também (FERNANDES, 2017).

Em geral, a aumento da dupla camada difusa aumenta a tendência de dispersão das partículas em suspensão. Quanto mais soltas essas partículas estão dentro da solução do material, maior a possibilidade de elas se realocarem para algum poro diminuindo os possíveis caminhos por onde o fluido percolaria e consequentemente diminuindo sua condutividade hidráulica. Já a redução da dupla camada difusa aumenta a tendência das partículas em suspensão se floclarem oferecendo maior quantidade de vazios para o fluido percolar. Portanto, quanto menor a dupla camada difusa do material, mais floclado ele será e sua permeabilidade será maior.

II. Ensaio de permeabilidade com carga constante (NBR 13292, ABNT 2021):

Visando a determinação do coeficiente de permeabilidade das areias utilizadas, foi realizado o ensaio de acordo com a norma ABNT NBR 13292 (ABNT,

1995). Esse é o ensaio indicado para a determinação da permeabilidade em materiais granulares, sendo sob carga hidráulica constante. Foram realizadas duas repetições para cada material em estudo e os dados obtidos podem ser observados na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18 - Coeficientes de permeabilidade dos materiais granulares.

	Repetição A			Repetição B		
	k (cm/s)	S (cm/s)	CV	k (cm/s)	S (cm/s)	CV
Areia natural	$8,58 \times 10^{-3}$	$0,09 \times 10^{-3}$	0,010%	$8,53 \times 10^{-3}$	$0,15 \times 10^{-3}$	0,018%
Areia grossa	$2,59 \times 10^{-2}$	$0,01 \times 10^{-2}$	0,005%	$2,59 \times 10^{-2}$	$0,01 \times 10^{-2}$	0,006%

k – coeficiente de permeabilidade; S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

FONTE: Autoria própria, 2023.

Fazendo a média dos valores individuais recolhidos, o coeficiente médio de permeabilidade da areia natural é de $8,55 \times 10^{-3}$ cm/s, e para a areia grossa é de $2,59 \times 10^{-2}$ cm/s. A partir dos valores de permeabilidade encontrados, observa-se a influência da presença de finos nos resultados obtidos. A Areia Natural que contém maior fração de finos na sua granulometria apresentou menor condutividade hidráulica que a Areia Grossa.

5.4 Ensaio de percolação com materiais combinados

Como é referido nas normas do Regulamento de Segurança de Barragens, NPB (1993), nos filtros, a capacidade de vazão deve ser 100 vezes superior à do núcleo na situação de pleno armazenamento. Este valor é usado também, para a determinação da seção mínima útil para o sistema de drenagem (DIAS, 2015).

Estatisticamente verifica-se que a maioria dos acidentes com barragens de terra ocorreram devido à falta de um sistema eficiente de controle de fluxo. Os fatores de segurança convencionais empregados em relação à vazão para filtros e drenos é muito alto podendo variar de 10 a 100. São assim, facilmente justificados pelas incertezas com relação aos coeficientes de permeabilidade dos materiais, notadamente de fundação e também quanto à colmatção dos filtros, pelas permeabilidades variarem em escala logarítmica, e pela natureza heterogênea dos materiais, tanto da fundação quanto do maciço.

A Tabela 19 e a Tabela 20 a seguir esclarecem os dados obtidos para os corpos de prova ensaiados de material base, Solo 1, Solo 2, Rejeito ou Solo 3, com o

material filtro, areia natural ou areia grossa, assim como alguns de seus parâmetros. Para a areia natural foram realizadas três repetições em cada combinação. Entretanto, para a areia grossa foram realizadas duas repetições. Isso devido à falta de material disponível, visto que a composição da granulometria da areia grossa se fez a partir da areia natural para que suas características de origem fossem as mesmas.

Tabela 19 - Composição de dados e moldagem dos corpos de prova solo base e areia natural.

Material	Corpo de prova	V/2 (cm ³)	m _{areia} (g)	m _{solo} (g)	w _{f,S} (%)	ρ _{d,S} (g/cm ³)	GC _{med} (%)	Vv (cm ³)
Solo 1	mb01	770,18	1173,21	848,50	30,72	0,843	59,41	543,75
Solo 1	mb02	780,17	1186,57	858,80	30,45	0,844	59,48	550,80
Solo 1	mb03	773,4	1178,56	842,20	30,68	0,833	58,7	549,11
Solo 2	mb04	780,17	1187,16	949,20	23,73	0,984	61,58	491,51
Solo 2	mb05	779,65	1184,87	947,70	22,83	0,99	61,95	489,62
Solo 2	mb06	779,65	1185,48	946,70	22,98	0,987	61,76	490,40
Rejeito	mb08	780,17	1185,03	1124,20	12,81	1,277	59,95	475,12
Rejeito	mb09	773,4	1175,32	1115,00	12,76	1,279	60,05	471,00
Rejeito	mb13	779,65	1187,39	1111,50	12,74	1,265	59,39	477,93
Rejeito	mb07	770,18	1183,69	1108,60	12,83	1,275	59,86	469,81
Solo 3	mb10	780,17	1196,38	941,90	14,36	1,055	60,27	470,44
Solo 3	mb12	778,08	1185,95	941,00	14,55	1,055	60,27	469,19
Solo 3	mb11	779,65	1185,20	942,10	14,57	1,054	60,21	470,91

V/2 – metade do volume do corpo de prova; m_{areia} – massa de areia; m_{solo} – massa de solo; w_{f,S} – teor de umidade final do solo; ρ_{d,S} – massa específica seca do solo; GC_{med} – grau de compactação medido; Vv – volume de vazios.

FONTE: Autoria própria, 2023.

Tabela 20 - Composição de dados e moldagem dos corpos de prova solo base e areia grossa.

Material	Corpo de prova	V/2 (cm ³)	m _{areia} (g)	m _{solo} (g)	w _{f,S} (%)	ρ _{d,S} (g/cm ³)	GC _{med} (%)	Vv (cm ³)
Solo 1	cmb05	770,18	1136,82	853,30	30,46	0,849	59,83	542,21
Solo 1	cmb06	780,17	1188,44	854,80	30,07	0,843	59,41	550,80
Solo 2	cmb09	779,65	1186,46	949,20	22,26	0,995	62,27	480,26
Solo 2	cmb14	773,4	1107,25	940,80	22,25	0,995	62,27	476,41
Rejeito	cmb11	778,08	1127,22	1134,10	12,25	1,299	60,99	469,19
Rejeito	cmb07	770,18	1119,75	1120,00	12,37	1,294	60,75	465,19
Solo 3	cmb04	770,18	1140,00	932,40	14,36	1,059	60,49	463,65
Solo 3	cmb02	780,17	1202,56	943,20	15,07	1,051	60,04	472,00

V/2 – metade do volume do corpo de prova; m_{areia} – massa de areia; m_{solo} – massa de solo; w_{f,S} – teor de umidade final do solo; ρ_{d,S} – massa específica seca do solo; GC_{med} – grau de compactação medido; Vv – volume de vazios.

FONTE: Autoria própria, 2023.

A vazão a cada volume de poro percolado dos corpos de prova ensaiados pode ser observada nos gráficos das figuras a seguir. Com fins comparativos, todo corpo de prova ensaiado sob mesma condição de repetição teve seus resultados plotados o mesmo gráfico. Por exemplo, na Tabela 19 referente às combinações com areia natural, o Solo 1 foi utilizado com areia natural nos corpos de prova MB01, MB02 e MB03 e tem seu comportamento ilustrado na Figura 53. Assim, as figuras a seguir são referentes às combinações de cada material base com areia natural e com areia grossa. É possível observar na Tabela 21 e na Tabela 22 os valores médios da permeabilidade de cada corpo de prova considerando todos os pontos de amostragem.

Os resultados dos ensaios de percolação com materiais combinados de material base com areia grossa compreenderam intervalos próximos de valores apresentando então baixos coeficientes de variação. Visualmente o comportamento da determinação do parâmetro de cada material seguiu o mesmo desenvolvimento.

Tabela 21 - Dados médios de percolação para cada corpo de prova ensaiado.

Material	Repetição A			Repetição B			Repetição C			Repetição D		
	Q ¹	S ¹	CV ²	Q ¹	S ¹	CV ²	Q ¹	S ¹	CV ²	Q ¹	S ¹	CV ²
Solo 3	0,13	0,03	0,20	0,17	0,06	0,34	0,22	0,08	0,36	-	-	-
Solo 2	0,15	0,07	0,49	0,19	0,10	0,53	0,41	0,08	0,20	-	-	-
Solo 1	2,16	0,41	0,19	1,10	0,56	0,51	1,45	0,19	0,13	-	-	-
Rejeito	0,25	0,12	0,48	0,31	0,05	0,17	0,47	0,23	0,49	0,31	0,07	0,24

Q – vazão de percolação; S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ¹ – cm³/s; ² – %.

FONTE: Autoria própria, 2023.

Tabela 22 - Dados médios de percolação para cada corpo de prova ensaiado.

Material	Repetição A			Repetição B		
	Q ¹	S ¹	CV ²	Q ¹	S ¹	CV ²
Solo 3	0,19	0,06	0,29	0,21	0,05	0,22
Solo 2	1,29	0,80	0,62	1,32	0,85	0,64
Solo 1	5,19	0,40	0,08	5,31	0,47	0,06
Rejeito	4,25	0,63	0,15	3,97	1,86	0,47

Q – vazão de percolação; S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ¹ – cm³/s; ² – %.

FONTE: Autoria própria, 2023.

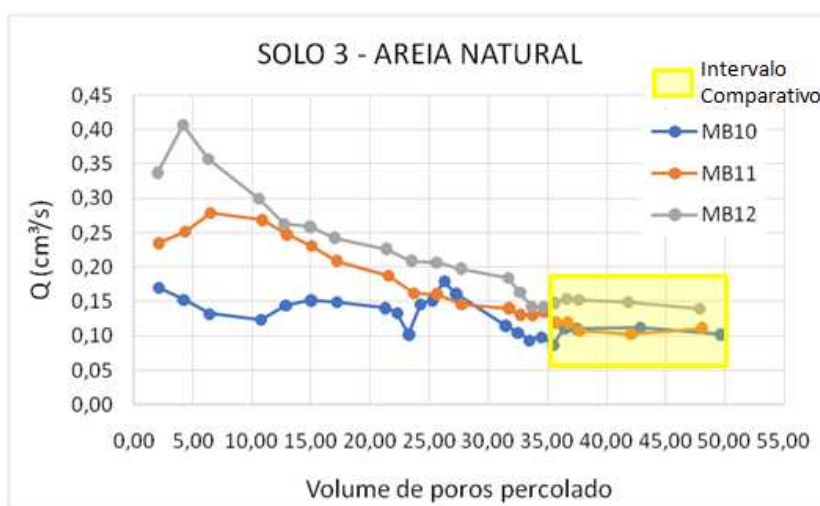
A primeira perspectiva evidente ao ver os gráficos plotados de todos os ensaios realizados é a maior variabilidade dos dados nos ensaios combinados com

areia natural do que com a grossa, o que remete ao resultado de adequação granulométrica proposto pelo intervalo dimensionado onde a areia grossa que cumpriu com os critérios difundidos. Por outro lado, apesar da granulometria da areia natural não estar completamente adequada ao intervalo dimensionado de material filtro, os seus dados de percolação apresentaram baixo coeficiente de variação ficando as três repetições de cada material dentro de um pequeno intervalo de valores.

Interpretando o gráfico da Figura 49 o comportamento do Solo 3 pode ser compreendida com uma variação maior no início da percolação seguido de uma tendente uniformização dos dados. É considerado então que o princípio do ensaio compreende o intervalo de saturação das amostras para que enfim seus valores percolados se aproximassem ao longo do aumento de volume.

Na Figura 50 as curvas de percolação do Solo 3 combinados com a areia grossa são bastante similares e compreendem um comportamento decrescente seguido de aparente estabilização assim como quando ensaiado com areia natural, característico da fase de saturação. Em uma comparação mais abrangente dos dados, é interessante relatar que o tempo total de ensaio dos corpos de provas MB12 e CMB04 são praticamente os mesmos e seu comportamento gráfico também é bastante semelhante.

Figura 49 - Curva de percolação do Solo 3 com areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 50 - Curva de percolação do Solo 3 com areia grossa.

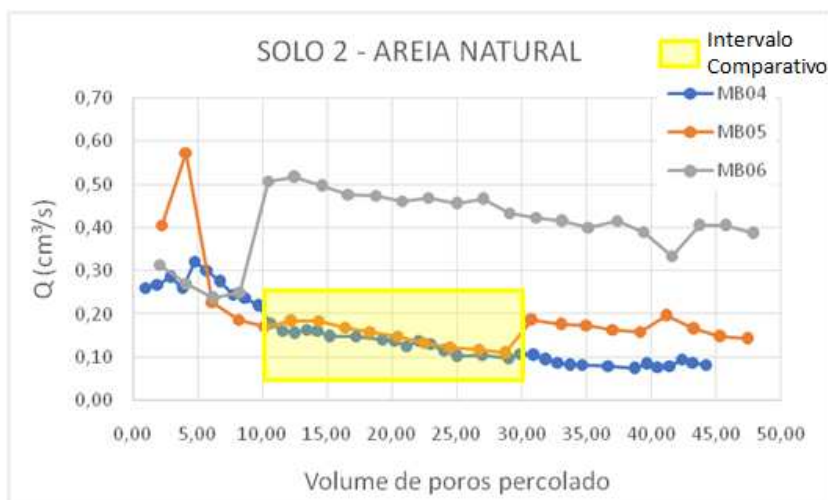


FONTE: Autoria própria, 2023.

O gráfico do Solo 2 com areia natural na Figura 51 apresenta uma discrepância considerável observada principalmente no MB06 durante alcance dos 10 volumes de poros percolados. Nesse mesmo momento foi relatado uma alteração no posicionamento da mangueira de coleta e uma alteração aumentando perda de carga do sistema. Desconsiderando essa interferência e analisando puramente a progressão da percolação observa-se o mesmo comportamento dos demais corpos de prova ensaiados. No cenário geral, acontece a progressão da saturação até estabilização dos parâmetros.

Na Figura 52 os gráficos do Solo 2 com areia grossa ilustram comportamentos semelhantes aos corpos de prova MBs, que utilizaram areia natural, com valores iniciais altos decrescendo para valores mais uniformes. A diferença maior pode ser observada no decorrer da percolação após a saturação uma vez que a vazão decai reduzindo a saída do fluido a bem próxima de nula. Esse cenário induz a interpretação de ocorrência de colmatção no material filtro através de possíveis obstruções dos poros de percolação pelo carreamento de partículas do Solo 2.

Figura 51 - Curva de percolação do Solo 2 com areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 52 - Curva de percolação do Solo 2 com areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

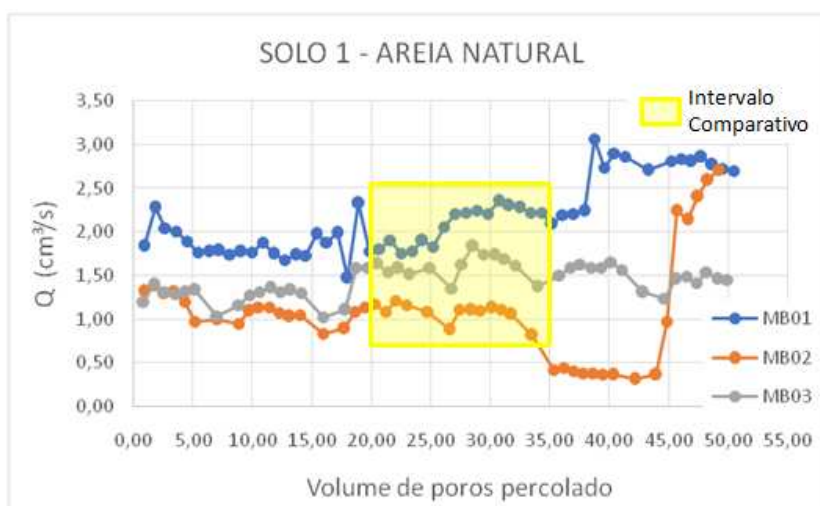
Na combinação do Solo 1 com areia natural da Figura 53, os picos de alteração da vazão de percolação do MB02 nos volumes de aproximadamente de 35 e 45 volumes de poros percolados e no MB01 em cerca de 40 volumes de poros percolados coincidiram com o relato de pausa no andamento do ensaio. Quanto à saturação, não apresentou o decrescer de um pico como os anteriores, fato que pode ser justificado pela alta concentração de argila e sua baixa capacidade de condutividade hidráulica habitual.

A Figura 54 apresenta as vazões do Solo 1 com areia grossa que sofre um leve aumento no início do ensaio podendo ser interpretado como a fase de expulsão do ar dos vazios do solo pouco compactado. Antes que a percolação seja facilitada pela diferença de vazios entre os solos granulares e os finos, a água tem que expulsar

o ar dos seus próprios vazios para que a saturação seja atingida. Tanto no caso combinado com areia natural quanto com areia grossa a vazão de percolação é considerada bastante estabilizada não sofrendo, portanto, bruscas alterações.

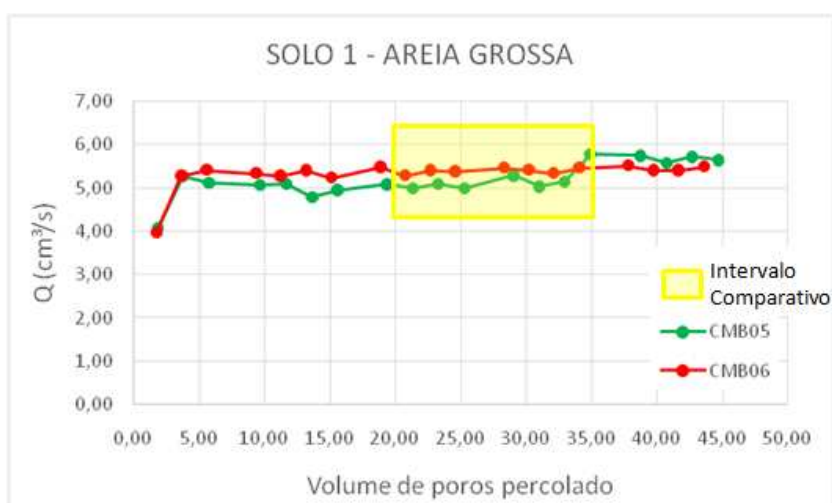
Experimentalmente a medição da saturação é um desafio então é usual adotar uma saturação como satisfatória quando acontece uma uniformidade da vazão do fluido por um corpo de prova. Sendo assim, é válido atribuir outras formas de validação da saturação dos materiais para contribuir com o entendimento de certas discrepâncias que podem ser observadas.

Figura 53 - Curva de percolação do Solo 1 com areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 54 - Curva de percolação do Solo 1 com areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

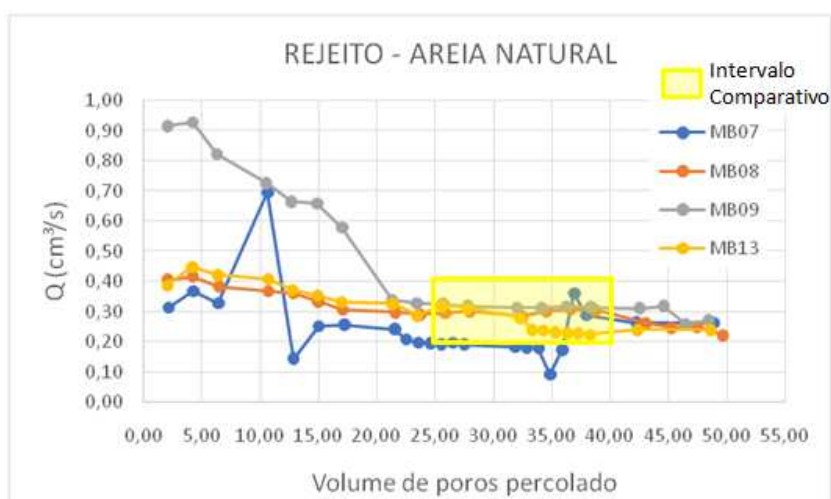
Uma das características marcantes do rejeito é sua anisotropia. Segundo Rezende (2013), de acordo com os resultados de seus estudos, a amostra de rejeito

parte de uma condição anisotrópica e, no geral, à medida que aumenta a tensão confinante do ensaio de permeabilidade, a anisotropia diminui. Analisando os resultados obtidos para a vazão de percolação do fluido no Rejeito combinado com areia natural (Figura 55), a inconstância da fase inicial dos dados pode ser atribuída à anisotropia do material, à fase de saturação, e ao rearranjo das partículas até que houvesse início da estabilização dos valores de leitura.

Na Figura 56 o gráfico ilustra o comportamento da vazão de percolação do Rejeito quando combinado com a areia grossa. Analisando as curvas, observa-se, assim como com a areia natural, uma inconsistência da fase inicial atribuída a anisotropia e variações do material, seguida por uma certa estabilização. Um pouco antes de atingir o volume de 40 poros percolados, o CMB11 sofre uma brusca queda na vazão. Essa alteração comportamental coincidiu com uma interrupção da percolação para abastecimento de água na célula de interface. Nesse momento o corpo de prova teve um “congelamento” de fluxo, ou seja, a água ficou parada dentro do corpo de prova, e depois de aproximadamente 25 min o sistema foi novamente submetido à percolação. Depois dessa pausa, os valores de vazão caíram muito.

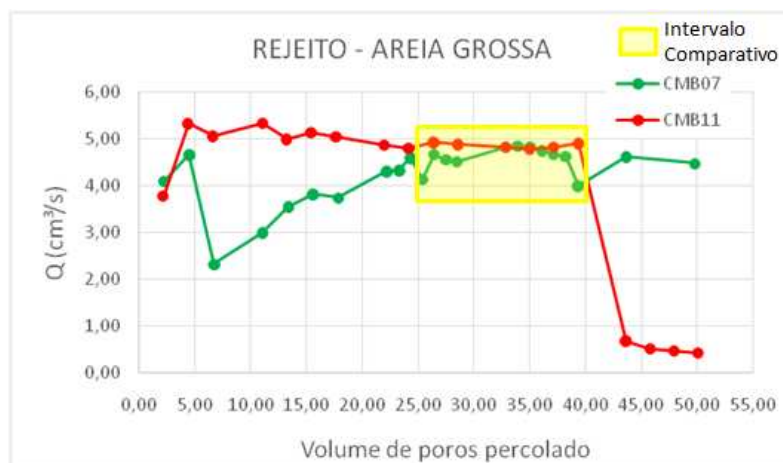
Quando o fluido percolado foi acondicionado para a realização do ensaio de sólidos em suspensão, observou-se uma decantação de partículas no fundo do recipiente, como na Figura 57, depois de um tempo em descanso. Conectando essa ocorrência com a queda da vazão depois de uma pausa na percolação no CMB11, ela pode ter acontecido devido à acomodação de partículas nos poros dos materiais e diminuindo a facilidade de escoamento do fluido.

Figura 55 - Curva de percolação do rejeito com areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 56 - Curva de percolação do rejeito com areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 57 - Foto das partículas decantadas do fluido percolado no ensaio Rejeito com areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Para análise comparativa dos valores de vazão de percolação encontrados para as diferentes combinações de material filtro, foram consideradas médias dos valores de vazão nos mesmos intervalos de volume de poros percolados definidos no caso de utilização da areia grossa e no de areia natural com o mesmo material base. Por exemplo, no caso do Rejeito, observa-se estabilização dos valores medidos no intervalo de 25 a 40 volumes de poros percolados, e então é feita a média dos valores de vazão medidos para cada situação de material filtro utilizado na combinação de materiais. Os resultados estão ilustrados na Tabela 23 com os respectivos valores médios de Q e o intervalo em que foram calculados.

Tabela 23 - Valores médios da permeabilidade para os solos-base em suas diferentes combinações.

		Solo 3	Solo 2	Solo 1	Rejeito
Intervalo de média	VPP	35 a 50	10 a 30	20 a 35	25 a 40
Areia natural	Q (cm ³ /s)	0,122	0,143 ^a	1,587	0,291*
Areia grossa	Q (cm ³ /s)	0,152	1,090	5,293	4,715

Q – vazão de percolação; VPP – volume de poros percolados; * - média calculado com os valores de MB08, MB09 e MB13; ^a – média calculada com os valores de MB04 e MB05.

FONTE: Autoria própria, 2023.

Comparando os valores de vazão obtidos para cada material base e sua combinação de material filtro, observa-se que no caso do Solo 3, não houve muita diferença do valor médio num mesmo intervalo sendo essa traduzida por um leve aumento no ensaio realizado com areia grossa. Esses resultados sendo praticamente iguais, permite a interpretação semelhante de eficiência de infiltração tanto com a utilização da areia natural quanto com a areia grossa como material filtro para uma obra de terra que contenha um material a ser protegido como o Solo 3.

Para os casos combinados utilizando o Solo 2 como material protegido, o intervalo analisado compreende os volumes finais de poros percolados presentes nas duas situações de estudo. Observa-se então uma diminuição da vazão de percolação considerando a combinação utilizando areia grossa como material filtro. Esse dado comparativo confirma a interpretação anteriormente proposta de ter ocorrido uma possível colmatação dos poros de percolação da areia grossa.

Comparando os valores nos estudos comparativos com o Solo 1, a diferença da vazão de percolação chega a ser mais de 3,5 cm³/s a mais nos corpos de prova combinados com areia grossa do que com areia natural. Ou seja, o fluido percolou mais facilmente quando o material filtro apresentou uma granulometria menos graduada e espaços de vazios maiores que acabam oferecendo menos dificuldade de percolação do fluido percolante. Esse comportamento é o esperado quando, sem pensar no material protegido, é interpretada a maior ou menor facilidade de percolação de um material granular. O que deve ser relatado é que contrário à expectativas de projeto, esse solo com alta porcentagem de argila na sua composição, mais de 60% de fração argilosa, quase não apresentou carreamento de partículas no fluido de percolação e teve o comportamento de vazão condizentes às ditadas pelo material filtro utilizado.

No caso do Rejeito, a diferença dos valores de percolação quase atingiu um acréscimo de $4,5 \text{ cm}^3/\text{s}$. A vazão de percolação nos corpos de prova utilizando Rejeito e areia grossa foi significativamente maior que utilizando areia natural. Diferentemente do acontecido com o Solo 1, o fluido percolante recolhido com essa alta vazão apresentou presença visível de partículas sólidas em suspensão de coloração escura como o Rejeito. O que desperta a discussão de ineficiência de filtragem da areia grossa como material filtro desse material base. Apesar dos resultados granulométricos de caracterização apontarem uma maior porcentagem da fração siltosa no Rejeito do que no Solo 2, e no Solo 2 ter ocorrido possível colmatção nos CPs com areia grossa, a comparação da vazão de percolação nos casos Rejeito com areia grossa foi mais expressiva do que com areia natural não indiciando assim colmatção.

Correlacionando os resultados com as granulometrias dos materiais, os solos com maior quantidade de finos tiveram maior dificuldade de percolar na areia que apresentou maior quantidade de finos. Com o caminhar do fluido na direção do solo para interior do filtro, partículas de finos devem ter sido carregadas na parte imediata de contato formando as zonas de auto filtragem. Se comparados com as permeabilidades encontradas como parâmetro de cada solo nesse estudo, o valor do coeficiente médio de permeabilidade de todos os solos aumentou. Acredita-se que atrelado ao comportamento da vazão de percolação estão o valor do grau de compactação adotado no ensaio, e o surgimento do mecanismo de filtragem onde os finos se distribuem confortavelmente nos vazios da zona de contato da areia com o solo formando caminhos preferenciais para a passagem do fluido.

5.5 Análises de sólidos

I. Turbidez:

No caso desse estudo a turbidez pode ser relacionada diretamente com nível de pureza de uma água que foi o fluido percolante. Quanto mais turvo um fluido, maior quantidade de partículas não dissolvidas no meio. A presença dessas partículas afeta a propagação da luz pela água e o valor medido pelo aparelho turbidímetro.

Para os corpos de prova ensaiados com Solo 1 e areia natural (Figura 58), os fluidos percolados foram utilizados para determinação da turbidez de modo que, em um intervalo volumétrico ilustrado, por exemplo, com a sigla P1 e contendo o volume

de 0 a 5,4 volume de poros percolados (Tabela 24), os valores de turbidez encontrados sejam de 50,65 NTU para o MB01, 66,95 NTU para MB02 e 72,50 NTU para MB03. Ou seja, para o primeiro período de coleta, foram determinados os maiores valores de partículas em suspensão na água. Esse valor sucede por quedas bruscas nos valores medidos de turbidez para cada corpo de prova nos intervalos volumétricos.

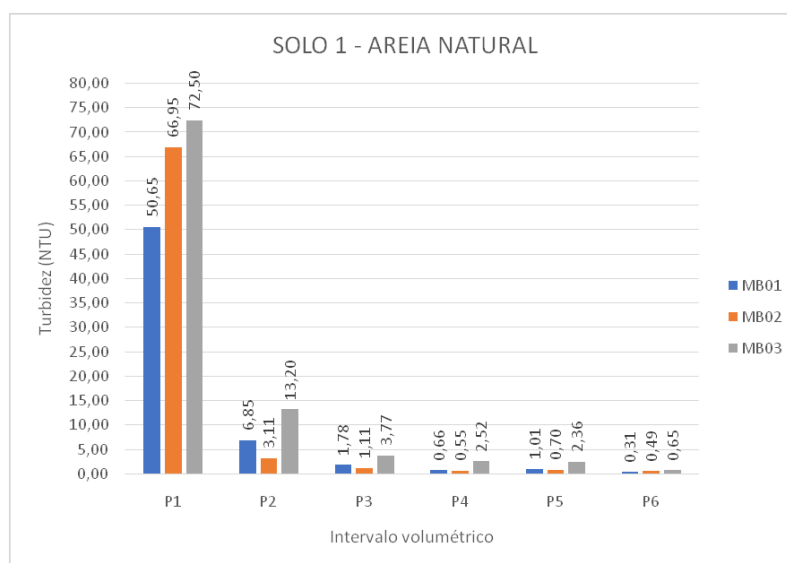
Tabela 24 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 1 e areia natural.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *	P6 *
Solo 1 e Areia Natural	MB 01	0 a 5,4	9,9 a 14,5	18,9 a 23,4	27,9 a 32,5	37,0 a 41,3	46,1 a 50,5
	MB 02	0 a 5,2	9,7 a 14,0	18,6 a 22,9	27,4 a 31,8	36,2 a 40,3	44,8 a 49,2
	MB 03	0 a 5,2	9,8 a 14,2	18,8 a 23,1	27,7 a 32,1	36,7 a 41,0	45,6 a 50,0

*- Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 58 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 1 e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

No caso da utilização da areia grossa como material filtro do Solo 1, como ilustrado na Figura 59, observa-se que a turbidez é alta no primeiro intervalo volumétrico (Tabela 25) novamente seguido por brusca queda. Quando comparados os dois cenários de utilização de material filtro, mesmo o menor valor obtido na combinação com areia natural ainda é maior que o maior valor obtido com areia

grossa, permitindo então a aferição de maior quantidade de partículas em suspensão na água para a situação de menor vazão de percolação.

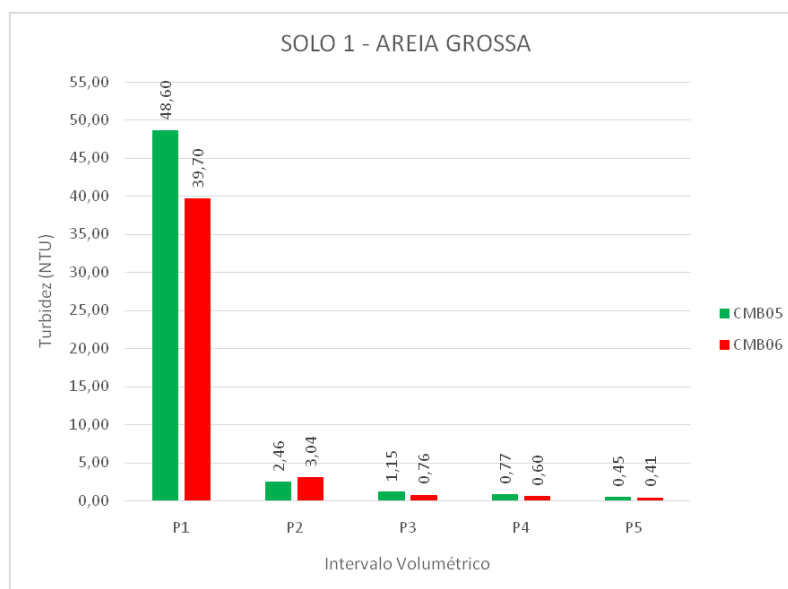
Tabela 25 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 1 e areia grossa.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Solo 1 e Areia Grossa	CMB 05	0 a 5,8	11,7 a 15,6	21,4 a 25,3	31,0 a 35,0	40,8 a 44,7
	CMB 06	0 a 6,3	12,5 a 16,7	22,8 a 27,0	33,2 a 37,3	43,7 a 47,8

*- Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 59 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 1 e areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Nos gráficos abaixo estão representados os valores obtidos para cada ponto amostrado do Solo 2 tanto combinado com areia natural (Figura 60) quanto com areia grossa (Figura 61), assim com os respectivos intervalos volumétricos de cada período de coleta resultante (Tabela 26 e Tabela 27).

Analisando os dados do P1 da Figura 60 é possível observar uma grande variação de comportamento, sendo 5,77 NTU para o MB05, 2,66 NTU para o MB06, quase metade do valor anterior, e 0,68 NTU para o MB04, sendo esse valor até menor que o determinado no P2. Apesar desses comportamentos distintos, a turbidez final dos corpos de prova se manteve pequena e praticamente estável após a inicial em todos os corpos de prova ensaiados com areia natural.

Nas combinações de Solo 2 com material filtro areia grossa os dois corpos de prova apresentaram altos valores de turbidez no primeiro intervalo de volume de poros

percolados seguidos de uma queda brusca. No CMB09 houve interrupção e extinção da percolação durante a coleta do intervalo volumétrico P4. Observa-se na Figura 61 que nesse período em questão houve um aumento significativo da turbidez, podendo ser interpretada como a ocorrência de um alto carregamento de partículas gerando uma colmatação total dos poros do material filtro.

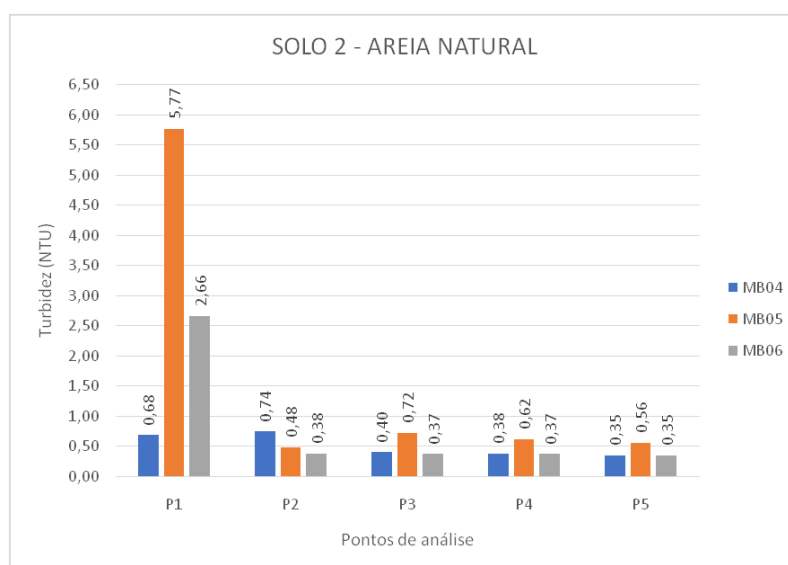
Tabela 26 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 2 e areia natural.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Solo 2 e Areia	MB 04	0 a 5,7	10,6 a 11,5	22,0 a 25,0	29,9 a 34,6	40,5 a 44,2
	MB 05	0 a 6,2	12,3 a 16,3	22,5 a 26,7	33,0 a 37,0	43,3 a 47,4
	MB 06	0 a 6,3	12,5 a 16,6	22,8 a 27,0	33,2 a 37,3	43,7 a 47,8

* - Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 60 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 2 e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

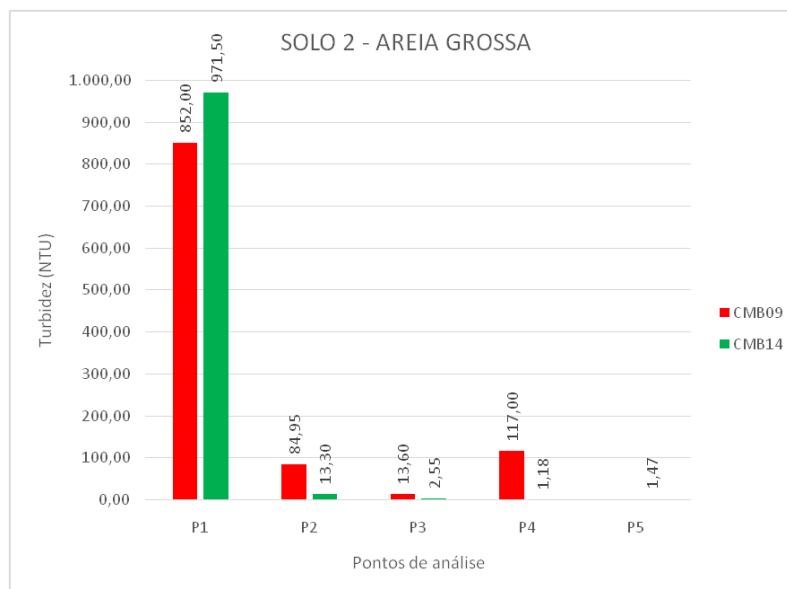
Tabela 27 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 2 e areia grossa.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Solo 2 e Areia Grossa	CMB 09	0 a 6,4	12,3 a 16,6	22,9 a 27,1	31,2 a 32,6	-
	CMB 14	0 a 6,1	11,4 a 16,5	21,9 a 27,0	32,6 a 37,6	41,8 a 48,0

* - Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 61 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 2 e areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Considerando a Figura 62 é possível observar um comportamento com muita variação, alternando os valores medidos de turbidez em altos e baixos. A combinação do Rejeito com areia natural ilustra quão complexo é o tratamento de um material fabricado de alta variabilidade produtiva. Dando enfoque ao intervalo comparativo do gráfico de percolação (Figura 55), observa-se que apesar do MB13 ter maior vazão que o MB07 no volume de 25 poros percolados, no P3 que compreende esse volume (Tabela 28), o valor de turbidez do MB 13 é maior que o MB07, mostrando que há mais partículas sendo carregadas apesar da sua vazão ainda ser alta. E logo no próximo intervalo volumétrico, P4, a vazão de percolação do MB13 diminui e a turbidez também, de forma que as partículas que antes estavam sendo carregada estejam agora obstruindo alguns dos poros diminuindo a passagens do fluido, e consequente vazão. Dentro desse mesmo momento P4, o MB07 sofre uma queda de vazão seguida de um aumento imediatamente sequencial ao mesmo tempo o valor da turbidez dá um salto. Uma interpretação pode ser feita de maneira que estava acontecendo uma colmatação dos poros até que com o impedimento da vazão, o fluido se represou e gerou uma descarga que aumentou instantaneamente a energia aplicada na percolação e expulsou muitas partículas que estavam depositadas nos vazios por onde o fluido voltou a passar.

Dentro do comportamento da percolação do Rejeito com areia grossa, o intervalo volumétrico onde houve uma mudança drástica na vazão do CMB11 não foi compreendido nas análises de turbidez (Tabela 29). O gráfico de turbidez para essa

situação de combinação de materiais ilustrado na Figura 63 também apresenta o comportamento variante, mas em uma escala bem menor de discrepância dos dados.

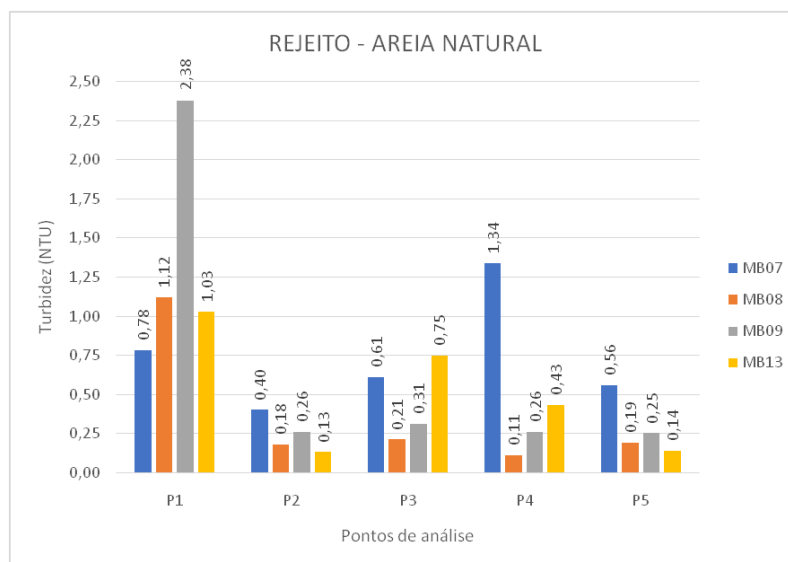
Tabela 28 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Rejeito e areia natural.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Rejeito e Areia Natural	MB 07	0 a 6,5	12,9 a 17,2	22,5 a 27,5	32,9 a 38,0	42,3 a 48,9
	MB 08	0 a 6,5	12,9 a 17,1	23,7 a 28,0	34,6 a 38,8	45,3 a 49,7
	MB 09	0 a 6,3	12,7 a 17,1	23,5 a 27,8	34,2 a 38,4	44,6 a 48,5
	MB 13	0 a 6,3	12,8 a 17,0	23,5 a 27,8	33,3 a 38,3	42,3 a 48,6

* - Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 62 - Gráfico com os dados de turbidez fluido de ensaio rejeito e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

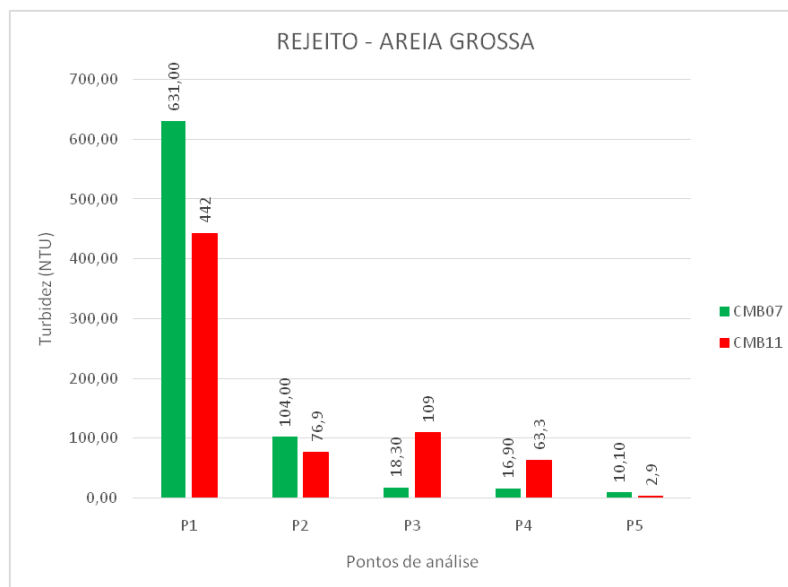
Tabela 29 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 1 e areia grossa.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Rejeito e Areia Grossa	CMB 07	0 a 6,7	13,4 a 17,9	23,3 a 28,5	33,9 a 39,3	43,7 a 49,8
	CMB 11	0 a 6,7	13,2 a 17,6	24,2 a 28,6	35,0 a 39,4	45,8 a 50,1

* - Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 63 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio rejeito e areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

O Solo 3 é o que apresenta como maior fração de composição granulométrica a arenosa, sendo sua porcentagem de finos baixa. Essa característica contribui na compreensão dos baixos valores de turbidez encontrados tanto nos corpos de prova com areia natural (Figura 64) quanto com areia grossa (Figura 65). Nas Tabela 30 e Tabela 31 encontram os respectivos valores de intervalos volumétricos ensaiados. Desconsiderando o dado discrepante do MB12 em P1 com areia natural, observa-se uma constância nos valores de turbidez medidos seguido por uma queda no último intervalo P5. Já com areia grossa, essa queda aconteceu já a partir do segundo intervalo volumétrico P2. É possível então aferir que com a utilização da areia grossa o carreamento dos finos do solo aconteceu logo no primeiro momento de percolação, até mesmo analisando os valores, a turbidez inicial medida ultrapassa 10 NTU para que só depois expresse valores abaixo de 1 como todos os demais.

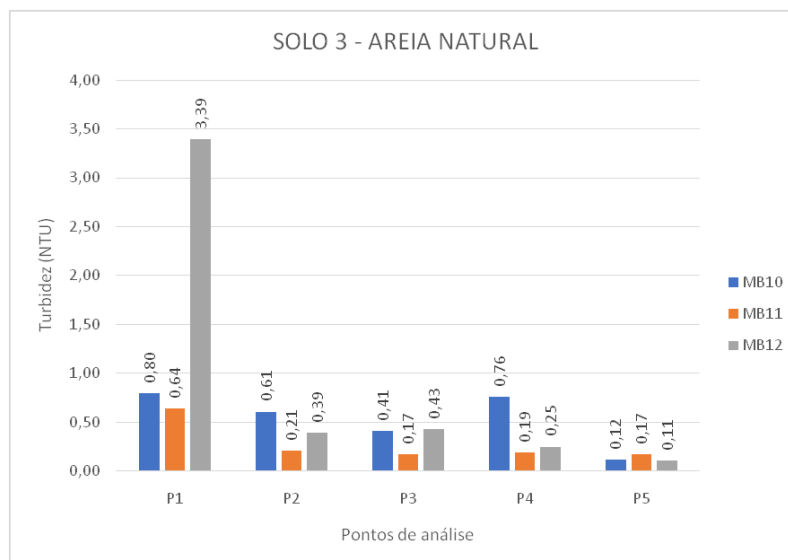
Tabela 30 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 3 e areia natural.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Solo 3 e Areia Natural	MB 10	0 a 6,4	12,9 a 17,2	22,3 a 27,3	32,4 a 37,5	32,8 a 49,6
	MB 11	0 a 6,5	13,0 a 17,2	23,7 a 27,8	32,8 a 37,7	42,1 a 48,1
	MB 12	0 a 6,3	12,7 a 17,0	23,5 a 27,7	32,7 a 37,7	41,9 a 47,9

* - Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 64 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 3 e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

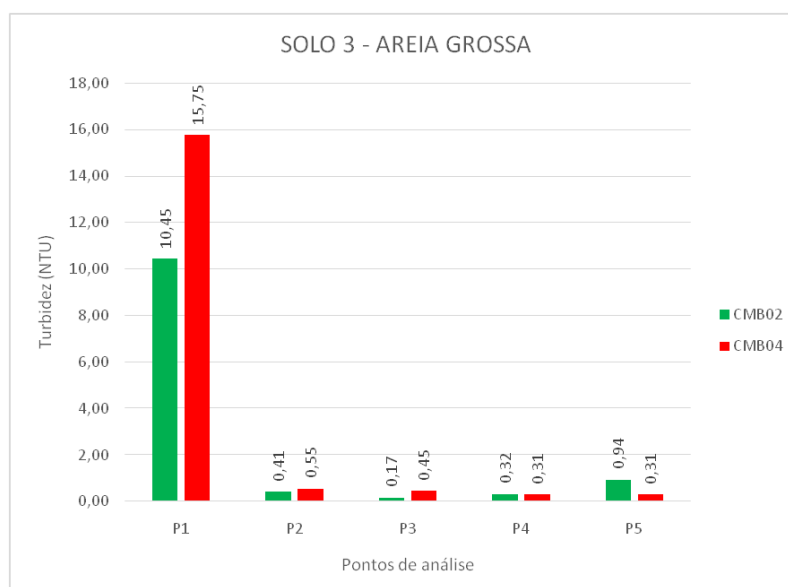
Tabela 31 - Intervalos volumétricos recolhidos para cálculo de turbidez e sólidos em suspensão de cada corpo de prova com Solo 3 e areia grossa.

		P1 *	P2 *	P3 *	P4 *	P5 *
Solo 3 e Areia Grossa	CMB 02	0 a 6,0	11,1 a 16,2	21,4 a 26,4	31,6 a 36,7	41,8 a 47,0
	CMB 04	0 a 6,1	11,4 a 16,5	21,7 a 26,8	32,4 a 37,6	43,0 a 48,4

*- Medidas dadas em quantidades de volume de poros percolados

FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 65 - Gráfico com os dados de turbidez do fluido de ensaio Solo 3 e areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Ao considerar o fluido de análise proveniente do ensaio de permeabilidade combinada com areia grossa o comportamento de todos os materiais base se assemelhou mais traduzindo uma característica de um pico inicial marcante sucedendo por baixo valores de NTU.

De modo geral, os níveis de turbidez medidos podem ser correlacionados a um episódio de carreamento instantâneo dos finos no início da percolação. Portanto, o Solo 3 foi o apresentou menores valores iniciais de turbidez se comparado com os outros materiais base, sendo ele o material com menor quantidade de finos. No caso combinado com areia grossa é válido ressaltar que o Solo 1 que possui sua fração argilosa acima de 65% apresentou turbidez menor se comparado com os materiais de fração siltosa significativa como Solo 2 e Rejeito.

II. Sólidos em suspensão:

Como esclarecido na metodologia desta pesquisa, para a realização deste ensaio foram utilizados os fluidos percolados recolhidos na saída de cada corpo de prova. Assim como na apresentação dos resultados de turbidez, os volumes de poros percolados foram divididos em intervalos volumétricos de análise e tem seus valores indicados nas Tabela 24 a Tabela 31 apresentadas anteriormente.

Os dados obtidos para o ensaio de sólidos em suspensão estão apresentados a seguir em gráficos da concentração de sólidos coletado por períodos de amostragem de cada corpo de prova. É evidente uma grande semelhança se comparado com os dados de turbidez. Isso pois a turbidez mede a refração das partículas em suspensão. Então, a observância do mesmo comportamento confirma a credibilidade dos dados colhidos nos ensaios.

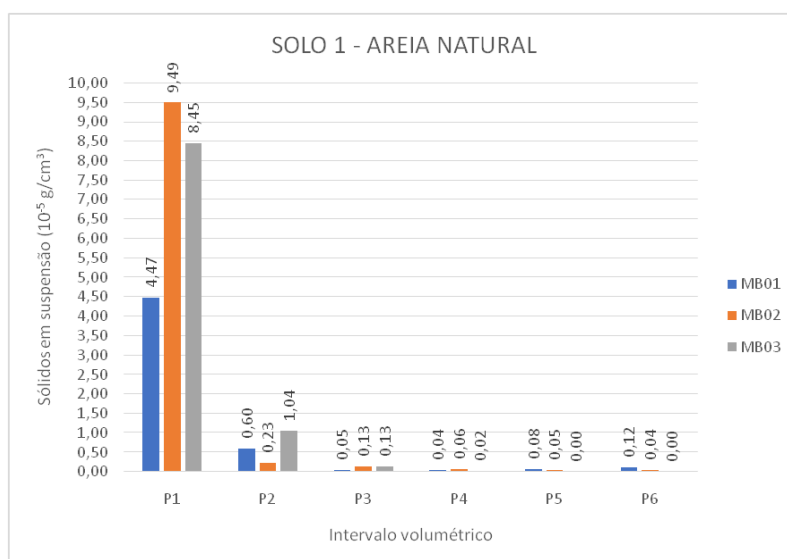
A Figura 66 a seguir apresenta os dados dos três corpos de prova ensaiados com Solo 1 e areia natural. No Apêndice A deste material estão disponíveis os gráficos de cada corpo de prova contendo os tipos de materiais no título, volume de poros percolados na coordenada horizontal, sólidos em suspensão na coordenada vertical do lado direito, e a vazão de percolação (Q) na coordenada vertical do lado esquerdo. É válido destacar que nestes gráficos do apêndice, os dados estão expostos individualmente, portanto, os sólidos em suspensão estão apresentados em gramas pois foram os valores recolhidos em cada membrana de filtragem. Já no gráfico de colunas, os sólidos em suspensão são dados em concentração para que os resultados possam ser comparados diretamente. Na Figura 67 estão os gráficos referentes aos

MB01, MB02 e MB03 que compõe os resultados da Figura 66. Esses dados correlacionados permitem uma melhor interpretação comportamental.

Por exemplo, a Figura 67a referente ao MB01 ilustra em marrom a curva de vazão de percolação no material, as duas retas no canto superior esquerdo do gráfico contêm as repetições com as massas das partículas em suspensão ensaiadas no intervalo volumétrico de 0 a 5,4 v_{pp} , ou seja, com o volume de fluido percolado homogeneizado foi possível ensaiar duas membranas de filtragem onde uma acusou 0,0271g e a outra 0,0257g de sólidos. Quando houver apenas uma reta significa que o volume total foi utilizado para filtrar apenas uma membrana. Interpretando esse gráfico individual, observa-se que depois de um pico de aumento na vazão de percolação no volume de cerca de 38 v_{pp} , houve um aumento dos sólidos em suspensão medidos no P5.

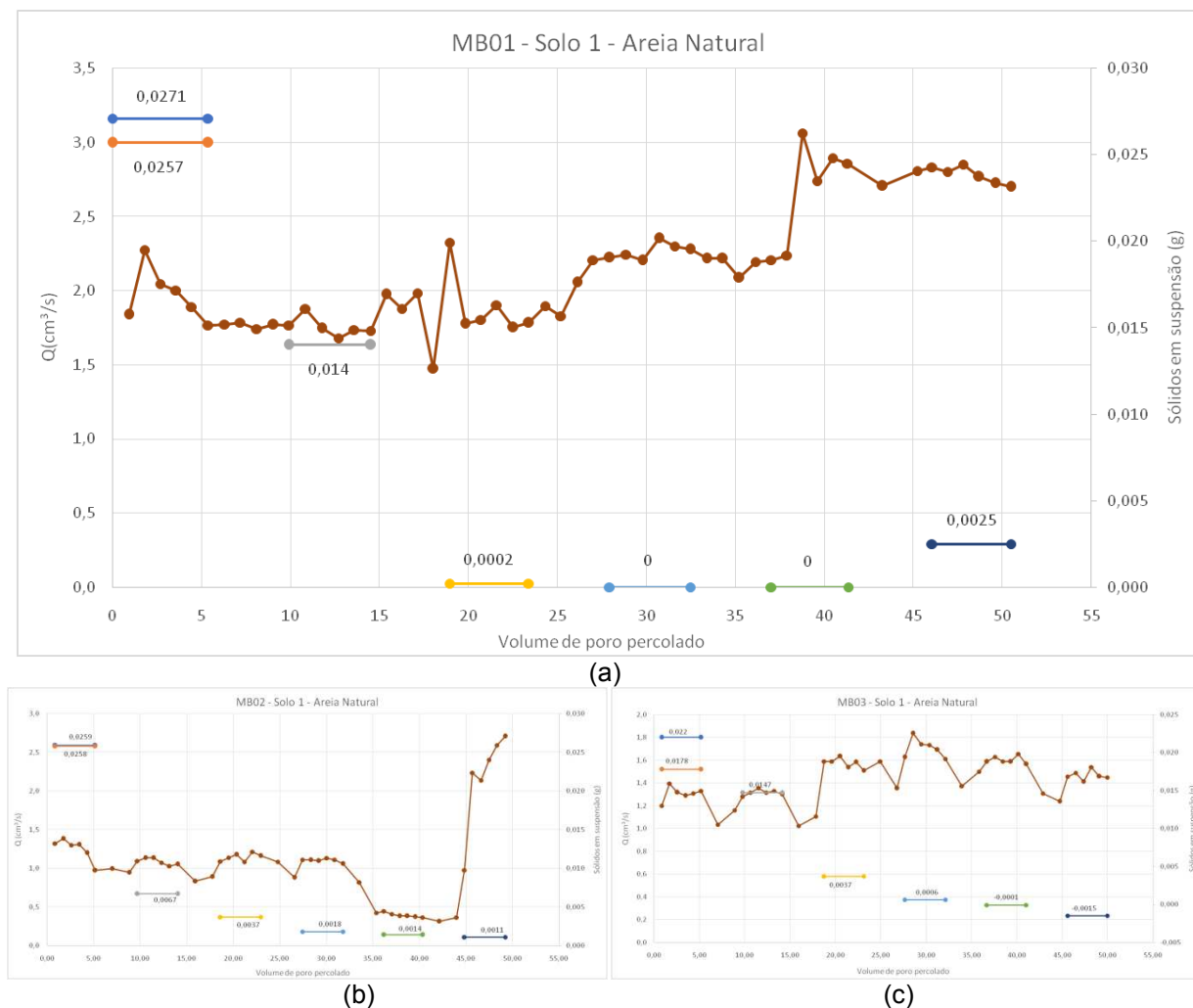
Analisando o gráfico de concentração de sólidos em suspensão, Figura 66 e Figura 68, apresenta valores consideráveis no primeiro intervalo volumétrico de análise seguindo de uma redução grande atingindo números próximos a 0. Esse comportamento pode ser observado independentemente do material filtro utilizado na combinação. A diferença é dada em termos de magnitude de valores. A combinação do Solo 1 com a areia grossa recolheu menor quantidade de partículas carregadas pela percolação do fluido. Esse resultado surpreende se pensar que esse solo tem grande quantidade de argila que é uma partícula fina e a areia grossa tem maior quantidade de vazios entre partículas, dois fatores que facilitariam o carregamento de finos para os poros do material filtro.

Figura 66 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 1 e areia natural.



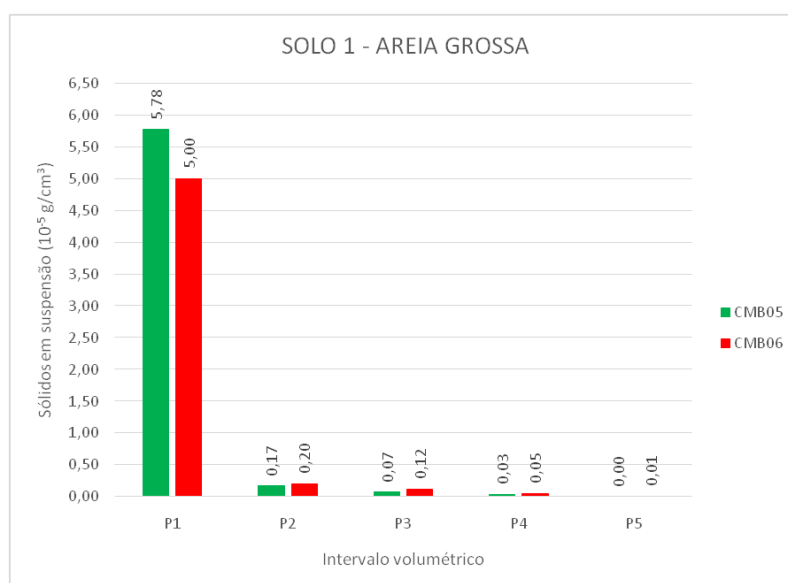
FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 67 - Gráficos correlacionando a massa de sólidos em suspensão e a vazão de percolação por volume de poro percolado para os corpos de prova (a) MB01, (b) MB02 e (c) MB03.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 68 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 1 e areia grossa.

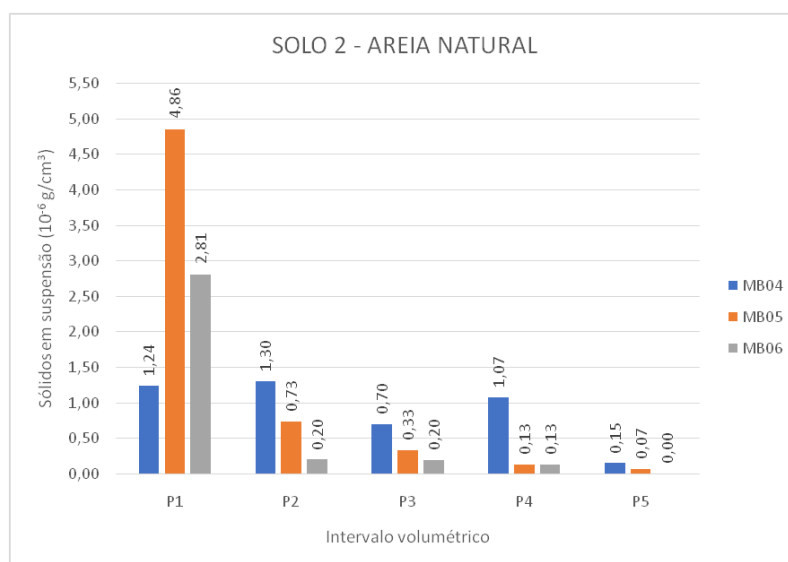


FONTE: Autoria própria, 2023.

Analisando o comportamento do MB04 na Figura 69 existe uma incompatibilidade no primeiro intervalo volumétrico e também não apresenta valores decrescentes como os demais, mas olhando o gráfico individual no Apêndice A observa-se que em termo de quantidade de massa acontece sim uma tendência decrescente dos dados ficando fora do esperando apenas a medição do MB04 no P4. Esse dado discrepante se trata de um fato isolado. Se comparado com o gráfico de turbidez, os resultados para o MB04 apesar de serem coerentes progressivamente, apresentam valores numéricos maiores que podem ser entendidos por uma provável presença de partículas tão pequenas que foram retidas apenas na membrana devido a tratar-se de uma malha com dimensão de micros.

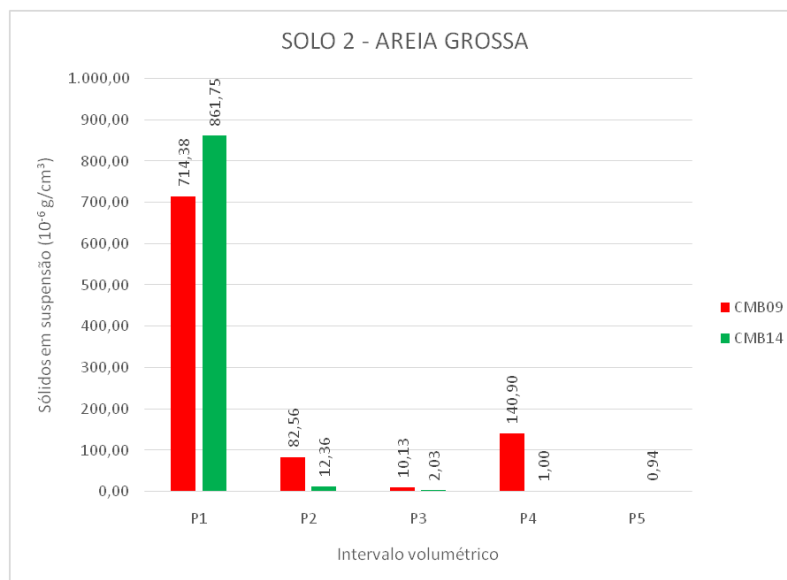
Comparando os valores de concentração de sólidos da Figura 69 com da Figura 70, é evidente o aumento na quantidade de sólidos carregados com a percolação do fluido pelo Solo 2 com areia grossa. A interpretação de colmatação do CMB09 no P4 já feita anteriormente a partir dos dados de turbidez também é afirmada com os dados quantitativos dos sólidos. Analisando o gráfico individual do Apêndice A para o CMB09, é possível correlacionar a diminuição acentuada da vazão no mesmo intervalo em que a massa de sólidos aumentou.

Figura 69 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 2 e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 70 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 2 e areia grossa.



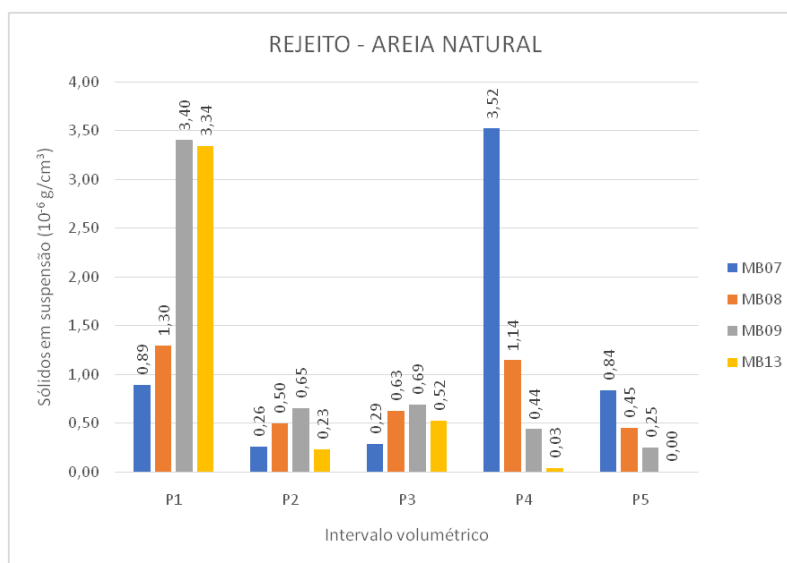
FONTE: Autoria própria, 2023.

Associando o gráfico de sólidos em suspensão (Figura 71) com o de turbidez para o Rejeito com areia natural (Figura 62) diferenças podem ser destacadas. No intervalo volumétrico P1 pode ser observado um valor medido bem mais alto para o MB13 e bem semelhante ao recolhido pelo MB09 apesar de seus dados de vazão nesse período de volumes de poros percolados sejam bem distintos fazendo os dados de turbidez mais coerentes se associados com a percolação. Outro destaque na comparação dos resultados pode ser observado no P3 pelos CPs MB07 e MB13 que apresentaram comportamento menor de concentração do que de turbidez o que pode acontecer uma vez que a turbidez foi medida a partir de uma pequena quantidade de todo volume. No período P4 o dado de sólidos realça ainda mais o aumento de partículas em suspensão do MB07 já acusado na turbidez. Esse valor medido superou todos os valores de concentração até então determinado no gráfico sendo mais significativo. Partindo da interpretação já realizada de uma possível descarga de vazão de percolação, partículas maiores podem também ter sido expulsas do sistema e quando o volume foi homogeneizado elas decantaram mais rapidamente fazendo com que a porção recolhida para turbidez não as tivesse compreendido, sendo acusadas então apenas na filtragem do fluido percolado.

Na Figura 72 o gráfico mostra comportamentos coerentes ao determinado pela turbidez salvo o resultado do CMB07 no P1 que foi bem mais expressivo. Buscando maiores informações no gráfico CM07 – Rejeito – Areia Grossa do Apêndice A observa-se que durante o intervalo volumétrico ensaiado houve um peno aumento

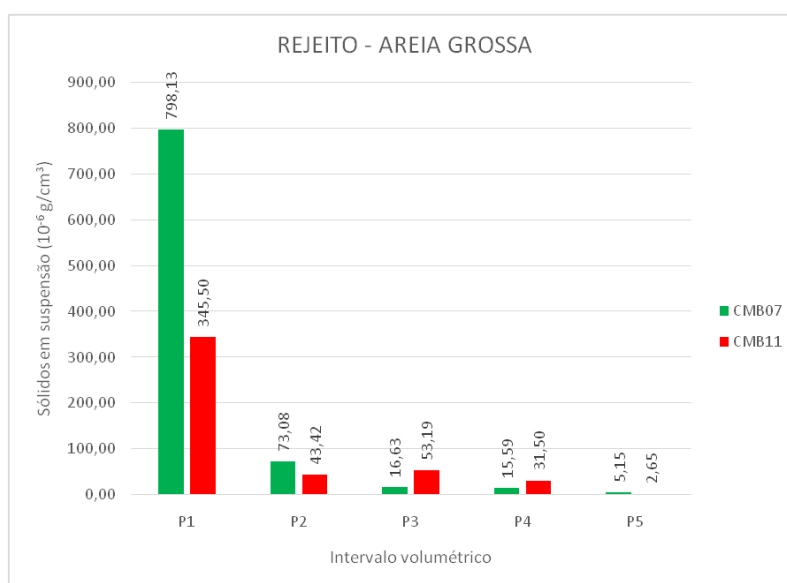
seguido de uma queda acentuada na vazão de percolação. Conectando os comportamentos, a percolação do fluido no sistema estava carreando partículas tanto do material base para o material filtro quanto para fora da célula. O volume de partículas reacomodadas e movimentadas estava grande ocasionando, portanto, obstrução dos poros o que diminuiu bruscamente a vazão. Com essa grande quantidade, partículas de maior dimensão devem ter sido expulsas sendo acusadas então apenas no ensaio de sólidos em suspensão.

Figura 71 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Rejeito e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 72 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Rejeito e areia grossa.

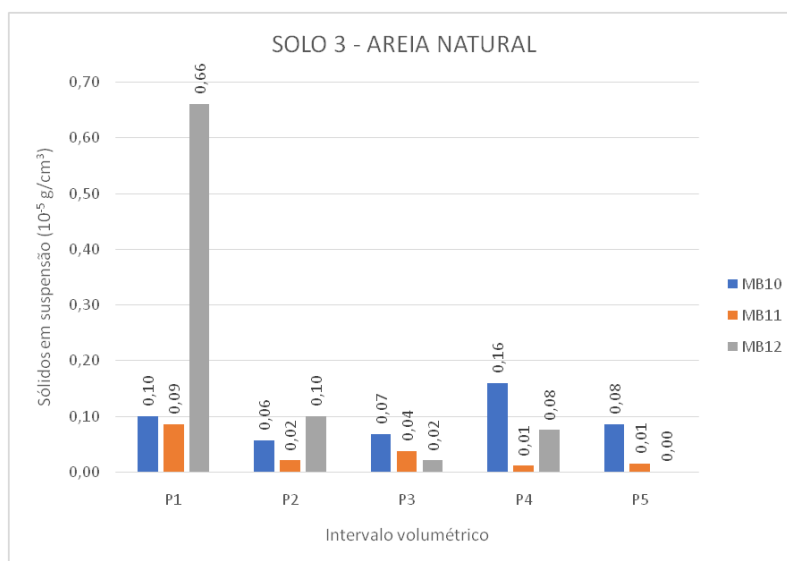


FONTE: Autoria própria, 2023.

No caso dos sistemas combinados tanto de Solo 3 com areia natural quanto com areia grossa, o formato de desenvolvimento dos seus gráficos de sólidos em suspensão (Figura 73 e Figura 74) são semelhantes aos de turbidez. Analisando o gráfico individual MB12 – Solo 3 – Areia Natural do Apêndice A, o primeiro intervalo volumétrico coincidiu com um comportamento de aumento seguido de queda da vazão de percolação no corpo de prova. Essa alteração da vazão justifica o valor de MB12 diferente dos demais no P1.

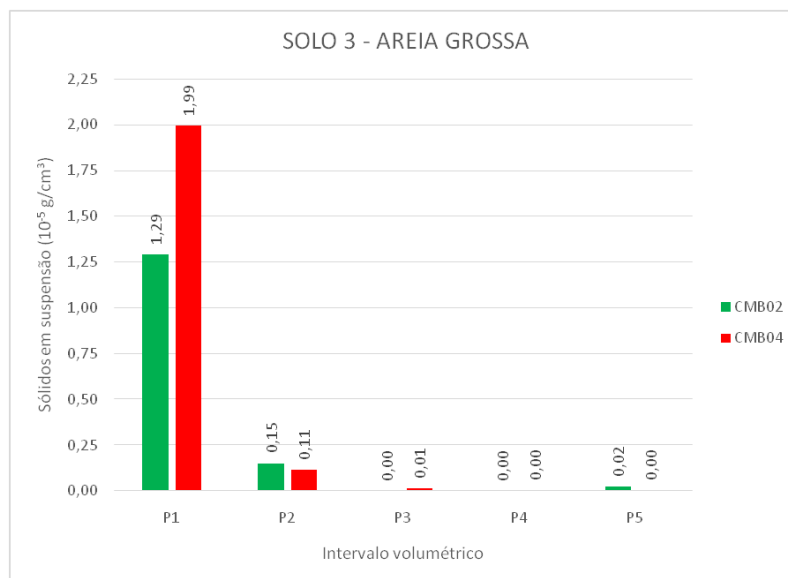
Para a utilização da areia grossa como material filtro no ensaio, a partir dos resultados de sólidos presentes no fluido percolado podemos reafirmar que o carreamento das partículas ocorreu logo no primeiro período de volume de poros percolados. Se comparado com os resultados da Figura 73, a utilização da areia natural como material filtro gerou uma movimentação de partículas mais constante. O comportamento com maior constância nesse caso não favorece a acomodação das partículas nos poros e permite um fluxo não turbulento.

Figura 73 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 3 e areia natural.



FONTE: Autoria própria, 2023.

Figura 74 - Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido de ensaio Solo 3 e areia grossa.



FONTE: Autoria própria, 2023.

III. Sólidos Totais:

O ensaio de sólidos totais foi realizado com a intenção de medir a quantidade de partículas finas infiltraram para dentro do material filtro. Assim, foi retirado o quantitativo demonstrado na Tabela 32. Os valores para areia natural e grossa foram retirados dos materiais limpos com fins comparativos.

Tabela 32 - Sólidos totais retidos nas amostras de material filtro de areia natural e grossa.

	Solo 1 (g/cm ³)	Solo 2 (g/cm ³)	Solo 3 (g/cm ³)	Rejeito (g/cm ³)	Areia Natural (g/cm ³)	Areia Grossa (g/cm ³)
MB	0,000525	0,001133	0,000682	0,000914	0,000586	
CMB	0,000683	0,005192	0,000828	0,013224		0,00034

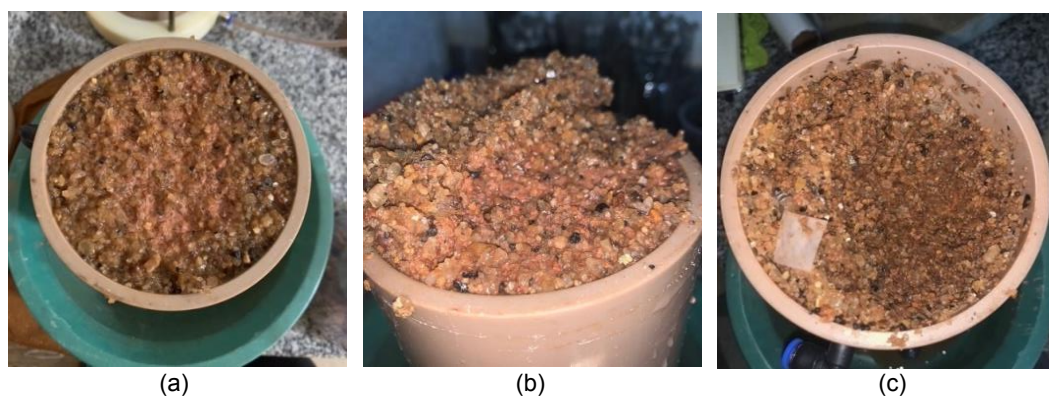
MB – código do ensaio de permeabilidade combinada com areia natural; CMB – código do ensaio de permeabilidade combinada com areia grossa.

FONTE: Autoria própria, 2023.

Comparando os quantitativos retidos nas diferentes areias para o mesmo material, observa-se maior quantidade de finos carregados para dentro do material filtro no caso da utilização da areia grossa. Os maiores quantitativos de partículas retidas no interior do material filtro podem ser identificados no Solo 2 e Rejeito, condizendo com a redução da sua vazão percolação medida no ensaio com materiais combinados. As fotos na Figura 75 mostram a presença de partículas no interior da areia grossa constituinte do material filtro durante a retirada do molde após a realização do ensaio de permeabilidade adaptada combinada, através da coloração rosada do fluido

presente na areia para o caso do Solo 2 e da coloração marrom escura na areia para o caso do Rejeito. A alteração da coloração do fluido de saída é um indício do carreamento de partículas uma vez que as cores deste são semelhantes às cores dos respectivos materiais base.

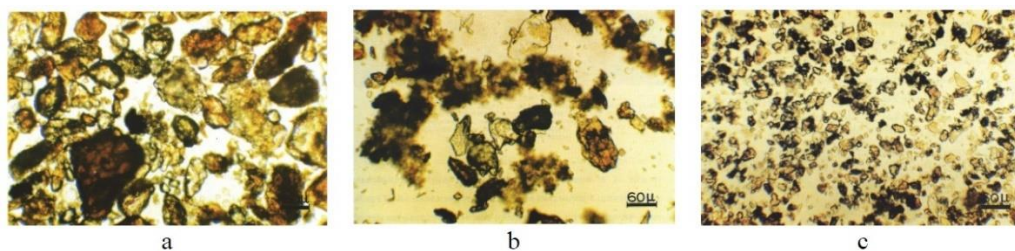
Figura 75 - Fotos da retirada do material filtro de areia grossa do molde com (a,b) Solo 2 e (c) Rejeito.



FONTE: Autoria própria, 2023.

O estudo de Neves e Caldeira (2021) apresenta a Figura 76 com fotos microscópicas investigativas do caso onde ocorreu transporte das partículas do núcleo constituído por um material base para o material do filtro, e determinou-se a dimensão das partículas do material do núcleo retidas na sua interface com o filtro, das que penetraram e permaneceram no filtro, e das que são arrastadas para a saída do filtro.

Figura 76 - Fotografias ao microscópio do filtro de estudo de Neves e Caldeira (2021): a) areias finas e siltes grossos acumulados à superfície do filtro; b) siltes médios a grossos e alguma argila no interior do filtro; c) siltes finos a médios, vestígios de siltes grossos em suspensão na água que passou através do filtro.



FONTE: NEVES & CALDEIRA, 2021.

Pelo estudo publicado por Neves e Caldeira, foram acumulados na superfície do filtro areias finas e siltes grossos, no interior do filtro siltes médios a grossos e alguma argila, e na água passante pelo material filtro siltes finos a médios em suspensão. Essas características também foram observadas no presente estudo. Sendo marcante a infiltração de partículas de silte no interior do filtro de acordo com maior quantidade de vazios do material utilizado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Entender e estudar a granulometria de um material facilita a compreensão dos parâmetros de ensaios. Uma vez que as frações de um solo podem se comportar muito diferentes umas das outras tanto estruturalmente quanto geometricamente. Essencial para as correlações de permeabilidade é a compreensão do arranjo das partículas e como as porções de finos, médios e grossos interagem.

O dimensionamento de um material filtro deve ser realizado com auxílio de experiência prática para que as tomadas de decisões quanto aos ajustes dos critérios ofereçam uma faixa granulométrica indicada mais consciente e prática mantendo atenção sempre às premissas de projeto.

A permeabilidade de um material pode ser influenciada pela mudança de muitos outros parâmetros associados. Associando os resultados de permeabilidade dos materiais base com suas frações granulométricas, observa-se que ao ser tratar de solo (Solo 1, 2 e 3), a permeabilidade foi alta quando o solo que possui um percentual de granulares (areia e pedregulhos) mais que duas vezes maior que o de finos (argila e silte) alto percentual de areia. Já quando essa razão de porcentagem foi pouco maior que um, a permeabilidade foi quase 10 vezes menor. Para os materiais de origem natural, habitualmente e também nesse estudo, quanto maior a fração de finos na sua granulometria, menor sua permeabilidade. Essa associação já não pode ser feita para materiais fabricados, com o Rejeito, que mesmo tendo quase 70% de finos, no caso dessa pesquisa, teve alta condutividade hidráulica.

Considerando as vazões medidas para o cálculo da permeabilidade de Caneschi (2012) e as obtidas nos ensaios com materiais combinados, os valores foram maiores nas situações a que os solos base foram submetidos à percolação em conjunto com material filtro. O contato do material protegido com um material de granulometria diferente, com maior volume de vazios e sem coesão, facilitou a percolação do fluido.

Em termos de eficiência dos materiais filtro propostos, para o Solo 3 de característica predominantemente arenosa a vazão de percolação foi praticamente a mesma para as duas areias. Para materiais com percentual considerável de finos, como Rejeito, Solo 1 e Solo 2, a utilização da areia grossa como material filtro

favoreceu a percolação aumentando, portanto, a vazão se comparado com a areia natural. Esse aumento indica puramente melhor satisfação do critério de permeabilidade considerado no dimensionamento clássico de filtro. Entretanto, somente a consideração desse parâmetro não conclui uma eficiência satisfatória e ideal de filtração.

Analisando os dados do estudo de sólidos, as areias finas, característica do Solo 3, não infiltraram no interior do filtro e nem nos sólidos em suspensão, ficando apenas uma pequena porção retida na zona de contato imediato para realização natural da camada de auto filtração. Já o Solo 2 que tem maioria da sua constituição de porção de finos sendo silte, teve suas partículas tanto carregadas para o interior do material filtro como também presentes em suspensão na água que saiu do corpo de prova. O Solo 1 que tem predominância de partículas de argila, não teve indício marcante de carregamento de partículas nem para o interior do material filtro e nem em suspensão na água passante. O Rejeito, assim como o Solo 2, tem grande constituinte da sua composição granulométrica sendo silte, e teve comportamento de carregamento de partículas também para o interior do filtro e em suspensão no fluido de saída. Esses comportamentos foram observados em ambas utilizações de materiais filtro entretanto com diferentes intensidades.

Nos casos ensaiados combinando o material base com areia natural foi possível observar que a correlação do decorrer da vazão dos corpos de prova permite ampliar o entendimento da percolação do fluido e da movimentação das partículas com o escoamento existente. Toda variação brusca desta vazão de percolação influencia diretamente na quantidade de partículas presentes no fluido de saída. Dependendo do material e da energia de fluxo, essa interação dos sólidos acontece instantaneamente, como no caso do MB07 em P4, ou como um efeito colateral, como no caso MB13 em P1 e P2. É observado que essa correlação comportamental está associada em geral à fração siltosa dos materiais. Mesmo compondo a parte fina de um material, a predominância da fração argilosa não apresentou características de carregamento ou colmatação com a percolação do fluido.

Considerando o critério de retenção do dimensionamento clássico, houveram situações de ineficiência com alto carregamento de sólidos e até mesmo colmatação da estrutura de escoamento. Esse critério considera uma correção diametral da dimensão das partículas do material base e do material filtro. Entretanto, ao considerar a fração fina de um solo-base, a retenção foi diferente diante de predominâncias de

siltos ou argilas. Mostrando-se suficiente nos dois casos de filtros analisados para materiais argilosos, e para materiais siltosos não concreta utilizando areia grossa, mas suficiente para a areia natural. Portanto, o critério de retenção foi alcançado pela areia natural como material filtro de todos os materiais base estudados, e pela areia grossa apenas para o Solo 1 e Solo 3.

Por fim, considerando as análises dos comportamentos tanto na percolação do fluido quanto na retenção das partículas sólidas, a areia natural como material que estava dentro do intervalo granulométrico dos critérios de D15 propostos no dimensionamento calculado, desenvolveu um comportamento satisfatório geral. Nos cenários individuais, apenas a areia natural serviria como material filtro do Solo 2 e do Rejeito. Ambas as areias serviriam para o Solo 1 e o Solo 3, entretanto para o Solo 3 a areia natural se mostrou mais adequada uma vez que com sua utilização houveram menos partículas sólidas em suspensão no fluido recolhido. Já para o Solo 1 a utilização da areia grossa se mostrou mais eficiente tanto na maior percolação quanto no menor carreamento de partículas.

6.2 Indicações de trabalhos futuros

Pensando na contribuição para o avanço dos estudos na área de drenagem e materiais de filtro, as seguintes linhas de pesquisa são sugeridas:

- Realização do ensaio de percolação combinada em um intervalo maior de coleta, principalmente para solos argilosos que nesta pesquisa foi o que obteve resultados diferentes do esperado;
- Investigação da influência da utilização de diferentes valores de coeficiente de uniformidade no dimensionamento dos intervalos granulométricos ideais para filtros;
- Influência das propriedades do material filtro, como permeabilidade, resistência, intemperismo, porosidade, etc, utilizando materiais filtros de origem natural, como areias retiradas dos rios, e materiais de origem processada, como areia britada;
- Validação dos métodos propostos ou mesmo o desenvolvimento de um mais detalhado que possa ser aplicado aos materiais comumente utilizados no mercado de obras de terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: solo - ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2020. 9 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016. 8 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2017. 10 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: solo - determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2017a. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: solo - determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016a. 3 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: solo - análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2017b. 12 p.

ALONSO, T. P. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com permeâmetro de parede flexível.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. 120p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de Segurança de Pequenas Barragens.** Grupo Banco Mundial. Contrato Nº51 ANA/2012. Brasília, DF. 2014.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 20th Edition. Washington, USA, 1998.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5084 – 16A: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.** West Conshohocken, 2020. 24 p.

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de Risco de Erosão e Escorregamento das Encostas com ocupações Desordenadas do Município de Camaragibe – PE**. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife – PE. 2003.

BASTOS, I. G. **Estabilização de encostas através de drenagem profunda: estudo de um caso de estabilização com túnel de drenagem**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. 204p.

BERTRAM, G. E. **An experimental investigation of protective filters**. Soil Mechanics, Series No. 7, Publication No. 267, Graduate School of Engineering, Harvard University. Cambridge, MA, 1940. 1-21 p.

BURITICÁ, J.A. **Análise de Comportamento de Barragens Construídas com Núcleos Argilosos Compactados no Ramo Super Úmido**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2013. 124 p.

CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. Dissertação de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. 3rd edition. John Wiley & Sons Inc. New York, USA, 1988. 465p.

CORREIA A., BARROS E., SILVA J., RAMALHO J. **Análise da turbidez de água em diferentes estados de tratamento**. VIII ERMAC 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2008.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 2ª Edição. Editora Oficina De Textos. São Paulo, Brasil, 2004. 648p.

DAS, M. B. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução da 6 edição americana. São Paulo, Thomson Learning, 2007. 557p.

DIAS, F. M. S. C. R. **Filtros em barragens de aterro: caracterização da sua permeabilidade**. Dissertação de mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2015. 75p.

ECHEVERRI, J. **Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2012. 112p.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Rio de Janeiro, 2003. 277p.

ERSOY, B.; HASELSTEINER, R. **The seepage analysis of the embankment dams of flood retention basin in Poland**. 26th Internatcional Commission on Large Dams Congress. Austria, 2018. 1635-1646p.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical Engineering of Dams**. Taylor & Francis Group plc. London, UK, 2005. 905p.

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Filters for Embankment Dams, Best Practices for Design and Construction**. U.S. Department of Homeland Security, USA, 2011. 332p.

FERNANDES, M.T. **Avaliação das técnicas de laboratório e campo para realização de ensaios de permeabilidade de solos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2017. 159p.

FILIZOLA, H. F.; DE ALMEIDA FILHO, G. S.; CANIL, K.; DE SOUZA, M. D. **Controle dos Processos Erosivos Lineares (ravinas e voçorocas) em Áreas de Solos Arenosos**. Emprapa. Jaguariúna, SP. ISSN 1516-4683. 2011.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **The statistics of embankment dam failures and accidents**. Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, No.5. National Research Council Canada. Ottawa, 2000. 1000-1024 p.

HUMES, C. **Considerações sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção de obras geotécnicas**. Dissertação de doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995. 209 p.

HUNTER, R.P. **Development of Transparent Soil Testing using Planar Laser Induced Fluorescence in the Study of Internal Erosion of Filters in Embankment Dams**. Master of Science in Engineering Geology. University of Canterbury. Christchurch, New Zealand, 2012. 202p.

ICOLD - INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Embankment Dams – Granular Filters and Drains**. Bulletin N° 95, 1994.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas: Relatório de pesquisa**. Brasília: Silva, A. P. M., Viana, J. P., Cavalcante, A. L. B., 2012.

KENNEY, T. C.; LAU, D. **Internal stability of granular filters**. Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, nº2, 1985. 215-255 p.

LEITE, J. C. **Estudos laboratoriais de percolação em colunas de misturas de solos lateríticos compactadas: equipamentos e ensaios**. 2000. 223 f. Tese de Doutorado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

MARTINS, E. V. E. **Avaliação do uso de areia britada produzida pela cominuição de rochas granulíticas, visando utilização em filtros de obras de terra**. **Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica da Universidade da Bahia. Salvador, 2012. 123p.

McLEAN, A. C., GRIBBLE, C. D. **Geology for Civil Engineers**. 2nd edition. E & FN Spon. London, UK, 1985. 333p.

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

NEVES, E. M., CALDEIRA, L. **50 anos de investigação sobre o comportamento estrutural de barragens de aterro**. Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Portugal, 2021. pp 307-336.

NOGUEIRA, O. A. **Determinação de modelo matemático preditivo para a estimativa do coeficiente de permeabilidade de solos arenosos**. Dissertação de conclusão de curso. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019. 123p.

PIMENTA FILHO, M. A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. 124p.

QUEIROZ, B. P. **Estudo da permeabilidade de um solo estabilizado com subprodutos agrofloretais da madeira de pinus**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2018.

QUEIROZ, B. P. **Efeito da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo de alta compressibilidade**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2021.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2013. 181p.

SANTOS, A. **Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2004. 191 p.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. **Basic properties of sand and gravel filters**. Journal of Geotechnical Engineering. American Society of Civil Engineers, vol. 110, 1984. 684-700 p.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; TALBOT, J. R. **Filters for silts and clays**. Journal of Geotechnical Engineering. American Society of Civil Engineers, vol. 110, 1984. 701-718 p.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P. **Filters and leakage control, in embankment dams**. In: Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. ASCE Geotechnical Engineering Division Conference. 1-30., 1985.

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P. **Critical filters for impervious soils**. In: Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol.115, N°7, 1989. 927-947 p.

SILVA, D. S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016. 162p.

SILVA, I. A. da., CAMPAGNA, A. R., LIPP-NISSINEN, K. H. **Recuperação de áreas degradadas por mineração: uma revisão de métodos recomendados para garimpos**. Pesquisas em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. V45. 2018.

TERZAGHI, K. **Soil physical basis of mechanics of earth structures**. F. Deuticke, Wien. 1926.

USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. **The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters**. Earth Laboratory Report nº EM-425. 1955. 12 p.

USBR - UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO. 1977.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Investigation of filter requirements for underdrains**. US Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Technical Memorandum. nº. 183-1. 1941.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Filter experiments and design criteria**. US Corps of Engineers, Waterways Experiment Vicksburg, Technical Memorandum. nº. 3-360, 1953. 52 p.

ZEDAN, A.J.; FARIS, M.R.; ABDULSATTAR, A.A. **Seepage Analysis through an Earth Dam (KHASHA-CHAI Dam) as a Case Study**. Engineering and Technology Journal, Vol. 35, No. 2. Iraq, 2017. 172-181p.

APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentados os gráficos correlacionando os sólidos em suspensão, e permeabilidade por volume de poro percolado, para cada corpo de prova submetido ao ensaio de permeabilidade adaptada combinada.

