

Avaliação da granulometria de materiais de filtros para obras de terra

Evaluation of the granulometry of filter materials for earthworks

Ana Clara Ceschim Perim ¹; Rejane Nascentes ²; Bruno Pereira de Queiroz ³

¹ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. E-mail: ana.perim@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3391-061X>

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. E-mail: rejane.nascentes@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6992-2551>

³ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. E-mail: bruno.queiroz@ufv.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2351-2995>

Resumo: A percolação de um fluido através do solo está relacionada à capacidade de aliviar as tensões de uma obra de terra. A certificação dos critérios clássicos de permeabilidade e retenção em filtros de barragens permite análise de mecanismos de filtragem, colmatção dos finos, infiltração e carreamento de partículas. Assim, esta pesquisa traz a diferença do comportamento de percolação em diferentes materiais base, sendo solo 1 com mais de 60% de fração argilosa, solo 2 com predominância de silte como porção fina, solo 3 com característica arenosa, e rejeito de mineração, para dois tipos de material filtro, com 90% e 60% de fração de areia. Dada a realização de ensaios de permeabilidade, percolação combinada, sólidos em suspensão e totais, análises das interações dos materiais permitiram observar, dentre demais discussões, que a utilização da granulometria mais aberta no material filtro não satisfaz o critério de retenção dos materiais base com características siltsosas, mas quando combinada com materiais com alta fração argilosas, seus maiores vazios não favoreceram o carreamento de partículas. Concluiu-se ser adequada a areia melhor graduada como material filtro para drenagem de obras de terra que utilizem algum dos quatro tipos de materiais base estudados, diante das práticas ideais de concepção.

Palavras-chave: Filtro; Drenagem; Carreamento de partículas.

Abstract: The percolation of a fluid through the soil is related to the ability to relieve the stresses of an earthwork. The certification of the classical criteria of permeability and retention in dam filters allows analysis of filtration mechanisms, colmatation of fines soils, particle infiltration and transport. Thus, this research highlights the difference of the percolation behavior in different base materials, being soil 1 with more than 60% of clay fraction, soil 2 with predominance of silt as a fine portion, soil 3 with sandy characteristic, and mining tailing, for two types of filter material, with 90% and 60% of sand fraction. Given the performance of permeability, combined percolation, suspended and total solids tests, analysis of materials interactions allowed to observe, among other discussions, that the use of a more open granulometry as a filter material did not satisfy the retention criteria for base materials with silty characteristics, but when combined with high clay fraction base materials, their larger voids did not favor the transport of particles. It was concluded that the best graded sand is suitable as a filter material for drainage of earthworks that use any of the four types of base materials studied, given ideal design practices.

Keywords: Filter; Drainage; Transport of particles.

1. Introdução

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. Para condição saturada de estudo, a aplicação de uma tensão num solo com água acarreta o desenvolvimento de poro-pressão que pode ser dissipada gerando um acréscimo de tensão no solo que, normalmente, 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). Estudos comprovam que a utilização dos filtros a jusante pode prevenir de forma confiável a erosão de vazamentos concentrados, mesmo quando gradientes e velocidades de fluxo forem muito maiores do que as que poderiam existir em uma barragem. (Sherard & Dunnigan, 1989).

O primeiro estudo difundido de dimensionamento de drenagem foi proposto por Terzaghi em 1926 que definiu 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. Assim, o dimensionamento da granulometria ideal para o material filtro garante a percolação da água sem que haja erosões, carreamento de partículas, colmatção ou piping, além de apontar uma granulometria aceitável para escolha do material filtro.

Quando uma argila ou uma areia sofrem variações de volume específico resultantes da alteração da tensão efetiva, continuam a ser, do ponto de vista das suas partículas sólidas, o mesmo material. O material sólido é o mesmo, mas as modificações do volume específico conferem-lhe propriedades mecânicas diferentes (Neves & Caldeira, 2021).

Atualmente, com a implementação de obra com novas finalidades, destinações e tecnologias, como o empilhamento de rejeito na mineração, muito se discute sobre o quão adequado é a otimização dos critérios clássicos em projetos, uma vez que continuam em evidência e sendo amplamente utilizados. Logo, o presente estudo propõe uma análise comparativa da eficiência de filtragem de quatro materiais base diferentes para dois tipos de materiais filtro.

2. Metodologia

O material da base ou material protegido, é aquele que compõe a estrutura e está em contato direto com o filtro de drenagem. Neste estudo três deles são de origem natural coletados no Campus Viçosa/MG da Universidade Federal de Viçosa (UFV), denominados Solo 1, Solo 2 e Solo 3, e o quarto é chamado de Rejeito sendo originário das atividades de extração de minério de ferro, cedido pela mineradora CSN - Companhia Siderúrgica Nacional por parceria de pesquisa com a UFV. O conjunto operacional e produtivo da CSN Mineração encontra-se no Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais.

Para o material filtro a areia, comercializada como média, foi adquirida na cidade de Viçosa/MG, sendo a primeira variação a areia diretamente como é fornecida, chamada de Areia Natural, e o segundo material filtro uma areia caracterizada como areia mal graduada, obtida através do peneiramento com a porção passante na peneira de 4,75 mm e retida na peneira de 1,18 mm, e denominada Areia Grossa. A Figura 1 a seguir ilustra os materiais descritos e, portanto, utilizados.



Figura 1 – Fotos dos materiais utilizados, sendo eles: Solo 1, Solo 2, Solo 3, Rejeito, Areia Grossa e Areia Natural.
Fonte: Autores (2022).

A primeira metodologia da pesquisa engloba ensaios de caracterização, sendo eles, ensaio de compactação segundo NBR – Norma Brasileira 7182 (ABNT, 2020) que resulta nos dados de umidade ótima (w_{ot}) e peso específico seco máximo ($\gamma_{d,max}$) da amostra ensaiada, ensaio de granulometria segundo NBR 7181 (ABNT, 2017) e ensaio de massa específica dos sólidos (ρ_s) segundo NBR 6458 (ABNT, 2017).

Para o dimensionamento do intervalo granulométrico do material filtro, foram seguidas as diretrizes propostas por USDA SCS- *United States Department of Agriculture Soil Conservation Service* em 1986, revisadas por NRCS- *Natural Resources Conservation Service* em 1994 e em consonância com ICOLD- *International Commission on Large Dams* em 1994, as quais são comumente interpretadas como critérios suficientemente adequados aos projetos de engenharia e de filtros em barragens. Estando disponíveis em Fell et al (2005, p.361).

Os critérios clássicos de dimensionamento se baseiam no comportamento das vazões em materiais granulares sendo o primeiro deles o critério de retenção, critério de estabilidade ou critério de piping, que define uma relação onde as dimensões dos vazios entre os grãos do filtro sejam pequenas o suficiente para que as partículas do material protegido não consigam se infiltrar, e o segundo critério de permeabilidade, e define uma relação onde o filtro tenha condutividade hidráulica suficiente para garantir as condições de escoamento esperadas. Depois de Terzaghi (1926), foram publicados diversos estudos complementares, entre eles os publicados pela USBR - *United States Bureau of Reclamation* (1977) e por Sherard e Dunningan (1985 e 1989).

O fluxograma na Figura 2 ilustra as etapas da metodologia adotada, que engloba os ensaios de determinação dos coeficientes de permeabilidade com carga constante, utilizando o ensaio difundido por Caneschi (2012) para os materiais base, e a norma NBR 13292 (1995) para os materiais filtro. Como também ensaios de determinação da percolação em materiais combinados; quantificação individual dos sólidos em suspensão presentes no fluido passante no ensaio de percolação, nos moldes do ensaio 2540D (APHA - *American Public Health Association*, 1998); e determinação dos sólidos com o fluido decorrente da lavagem do material filtro depois de retirado do ensaio de percolação, segundo 2540G (APHA, 1998).

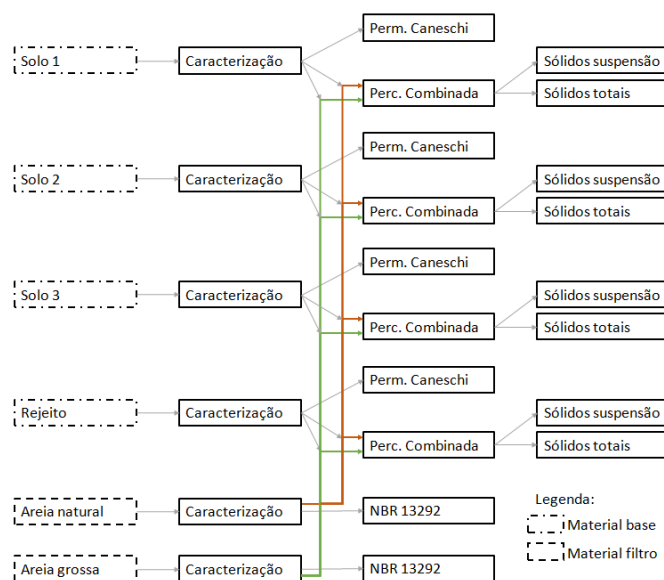


Figura 2 – Fluxograma das etapas de ensaio e suas conexões.

Fonte: Autores(2022).

Dos ensaios não normatizados realizados nesta pesquisa, o ensaio de permeabilidade com o aparato de Caneschi foi utilizado para determinação de permeabilidade nos Solo 1, 2, 3 e Rejeito. Seus detalhes podem ser acessados em Caneschi (2012). Neste estudo se faz necessário registrar que o fluido selecionado para percolação em todos os corpos de prova foi a água destilada, que todos os corpos de prova ensaiados foram montados com compactação estática e obedecendo um grau de compactação variando de $-2\% < 99\% > +1\%$ com a umidade variando até 2% no valor da ótima característica, e que foram realizadas o mínimo de três repetições para os quatro tipos de material base selecionados.

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, recolhendo então dados da vazão de saída de um fluido em um sistema com material base e filtro atuando simultaneamente. Utilizando o mesmo princípio de Caneschi (2012) e adaptando os tamanhos do corpo de prova, para possibilitar a deposição direta de dois materiais, e da célula de interface, aumentando a capacidade volumétrica de fluido disponível para realização completa de um ensaio com alta vazão.

Nesse ensaio o grau de compactação foi definido de $60\% \pm 2\%$ e umidade variando até 2% no valor da ótima ($w_{ot} \pm 2\%$) para o material protegido afim de manter a coesão e consistência contrabalanceada à uma grande quantidade de vazios percolantes, e umidade de $95\% \pm 2\%$ seco à estufa para o material filtro. A lavagem do material filtro antes da moldagem foi adotada com objetivo de retirar os finos da granulometria de constituição, associando a presença de finos na areia após a percolação predominantemente ao carreamento de partículas do material base. Quanto à pressão do ensaio de percolação, a carga hidráulica aplicada na percolação foi gravitacional tendo um gradiente equivalendo a um valor de 9,61 e perda de carga no material filtro desprezível. O fluxo descendente da água foi adotado afim de facilitar a infiltração das partículas no material filtro por estar a favor da gravidade. O quantitativo proposto para esse ensaio foi de 3 repetições para cada combinação de materiais. Todo fluido percolado foi recolhido, devidamente pesado, aferido sua temperatura, e anotado o tempo cronometrado de intercorrência, para que posteriormente fosse utilizado no ensaio de sólidos em suspensão. Já o material utilizado para o ensaio de sólidos totais foi obtido da lavagem do material filtro após a realização do ensaio de percolação combinada, afim de quantificar os finos retidos no interior do filtro.

Com auxílio e instrução técnica do LESA - Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFV, os ensaios de sólidos em suspensão e totais foram realizados segundo as normas americanas de saúde pública, APHA 1998. Para a realização do ensaio de suspensão foi utilizado filtro de fibra de vidro (GF/C 47 mm x 1,2 µm) e um volume de filtragem de 3 litros por período. Para a lavagem do material filtro extraído do interior do corpo de prova ao final do ensaio de percolação combinada foi utilizada peneira # 200 (0,75 mm), recolhendo o fluido residual, cerca de 2 litros, para ensaio de sólidos totais dada pela secagem total do material em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Maiores detalhes da metodologia utilizada estão disponíveis na tese de mestrado Perim (2023).

3. Resultados e discussão

Segundo as normas brasileiras, a Tabela 1 exibe os dados de caracterização obtidos do Solo 1, Solo 2, Solo 3 e Rejeito, materiais base, e das respectivas areias natural e grossa, materiais filtro. Com os dados obtidos destacam-se a alta porcentagem de argila presente no Solo 1, a predominância de silte na parte de finos do Solo 2, a grande porção arenosa do Solo 3 e um Rejeito de fração silto-arenosa. É importante considerar que apesar da utilização de teorias de mecânica dos solos que é indicada aos solos de origem natural como Solo 1, 2 e 3, pode dificultar análises comparativas e concretas do Rejeito. Por tratar-se de um sedimento que sofreu muitos manejos executados na mineração, como frente de lavra e filtragem, essas variáveis que influenciam nas características e comportamentos desse material fabricado. Já comparando os dados dos materiais filtro, observa-se uma diferença de mais de 30% na fração arenosa.

Tabela 1 – Resultados de caracterização dos materiais base e filtro.

Resultados de caracterização						
Caracterização	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Rejeito	Areia Natural	Areia Grossa
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
ρ_s (g/cm ³)	2,87	2,59	2,66	3,27	2,684	2,665
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: Autores (2023).

A curva granulométrica do material base é determinante para os cálculos dos critérios de dimensionamento de filtro. A partir dela é definido o intervalo granulométrico ideal para que um material filtro respeite e seja eficiente aos critérios

de permeabilidade e retenção. Nas Figura 3 a seguir estão destacadas as curvas granulométricas dos materiais bases e filtro utilizados nesse estudo. Comparando os solos de origem natural, é possível observar que o Solo 1, apresentado em preto, é majoritariamente fino, sendo assim oposto do Solo 3, apresentado em azul, que é predominantemente arenoso. Já o Solo 2, apresentado em laranja, possui uma granulometria intermediária com proporções quase meio a meio de finos e arenosos. A curva granulométrica do material base de origem fabricada, Rejeito, apresentada em verde, tem característica de pior graduação. A granulometria da areia grossa é destacada na cor rosa e da areia natural na cor cinza. A diferença percentual na curva granulométrica dos dois condiz com a ideia de a areia natural ser mais bem graduada e ter mais finos preenchendo seus vazios.

Com os dados de caracterização foram definidos os intervalos de granulometria adequados para cada um dos materiais base desse estudo. Na Figura 3 também estão ilustrados os intervalos granulométricos calculados para os materiais protegidos. A faixa definida para os Solos 1, 2 e para o Rejeito foi a mesma 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. 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 graficamente.

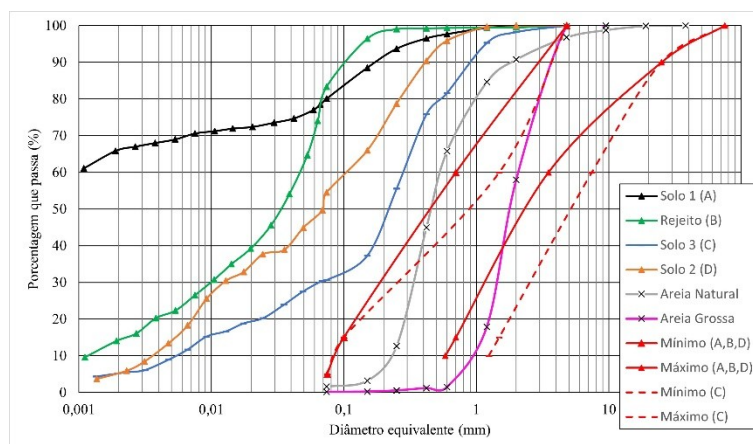


Figura 3 – Curvas granulométricas dos materiais e intervalos de dimensionamento.

Fonte: Autores (2023).

Para o dimensionamento é definido um intervalo possível que compreende um intervalo de valores aceitáveis para o diâmetro equivalente de uma malha de peneiramento para que apenas 15% do material consiga passar por ela (D15). Na Figura 4 estão ilustradas as curvas granulométricas de cada material com as análises de dimensionamento propostas por Terzaghi, USBR e Sherard e Dunningan. Observa-se nos gráficos a e b da Figura 4 que 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 4d), 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.

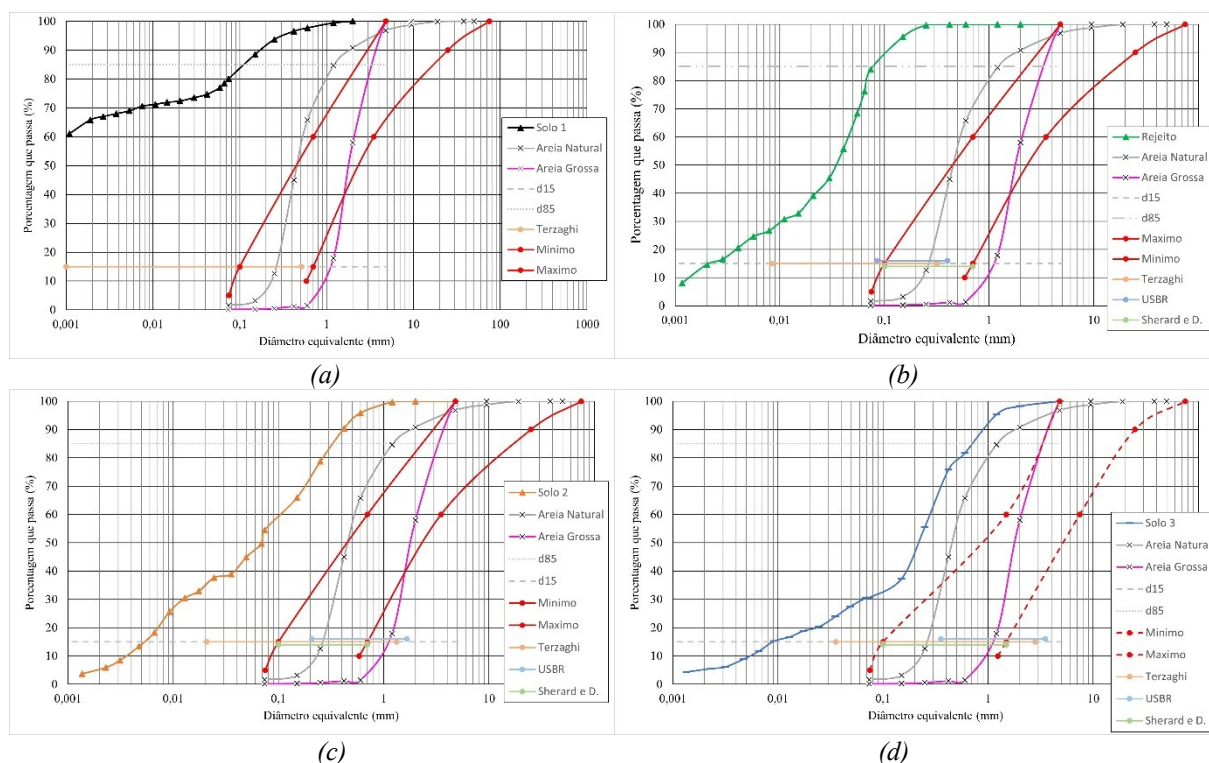


Figura 4 – Gráficos dos intervalos de dimensionamento para o material base com os materiais filtro (a) Solo 1 (b) Rejeito (c) Solo 2 (d) Solo 3.
Fonte: Autores (2023).

Considerando os dados recolhidos no ensaio de permeabilidade para cada respectivo material base realizados com quatro repetições, obtiveram-se os dados médios de k_{20} , coeficiente de permeabilidade a 20°C, para o Solo 1 de $4,52 \times 10^{-8}$, para o Solo 2 de $3,91 \times 10^{-7}$ cm/s, para o Solo 3 foi de $3,29 \times 10^{-6}$ 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 de um material fabricado como é o Rejeito. Também 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 percentagem de areia em sua composição, que são solos granulares não coesivos.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade das areias, 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. Sendo assim, a areia natural, que contém maior fração de finos na sua granulometria, apresentou menor condutividade hidráulica que a areia grossa.

No ensaio de percolação, a vazão a cada volume de poro percolado dos corpos de prova pode ser observada nos gráficos das figuras a seguir. Na Figura 5 estão os desenvolvimentos individuais dos materiais base com a areia natural na Figura 6 os mesmos só que combinados com a areia grossa. A primeira perspectiva 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.

Interpretando os gráficos da Figura 5 o comportamento dos Solos 2 e 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. Já a combinação com o Solo 1 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. O gráfico do Solo 2 com areia natural na Figura 5b 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. Analisando os resultados obtidos para a vazão de percolação do fluido no Rejeito combinado com areia natural, 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.

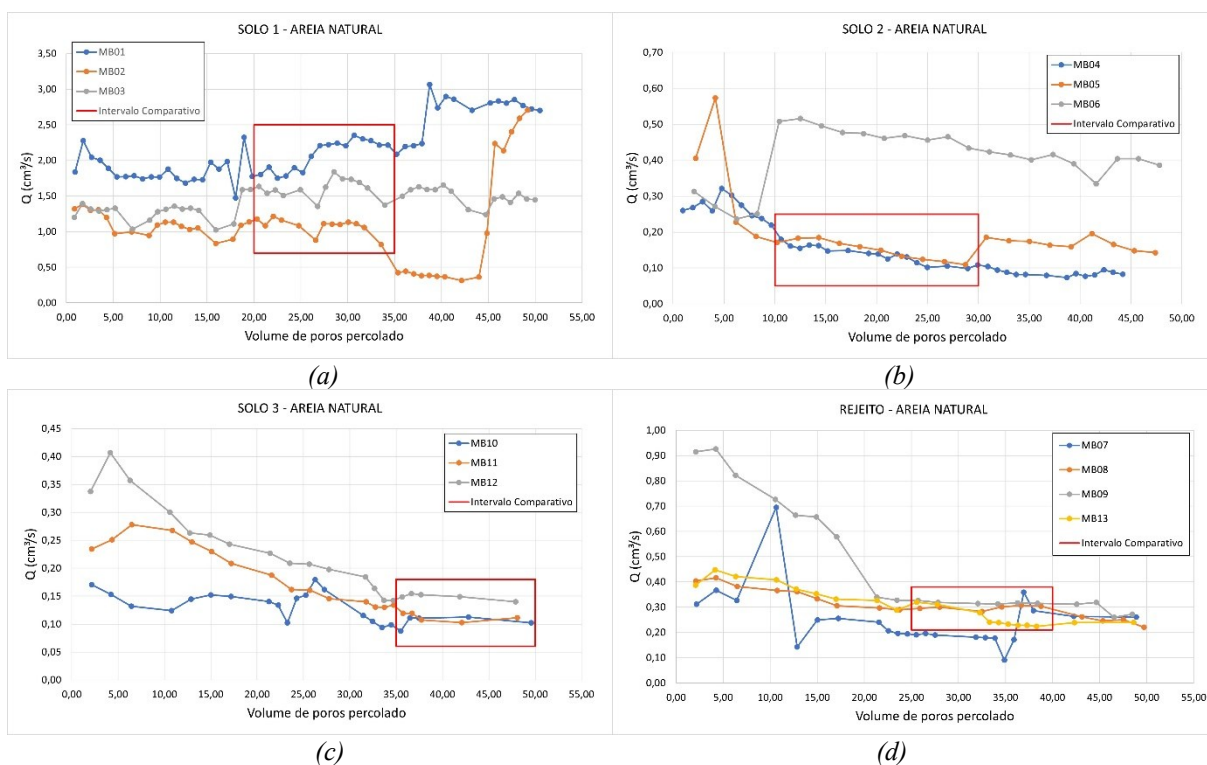


Figura 5 – Gráfico de percolação combinado com areia natural (a) Solo 1 (b) Solo 2 (c) Solo 3 (d) Rejeito.
Fonte: Autores (2023).

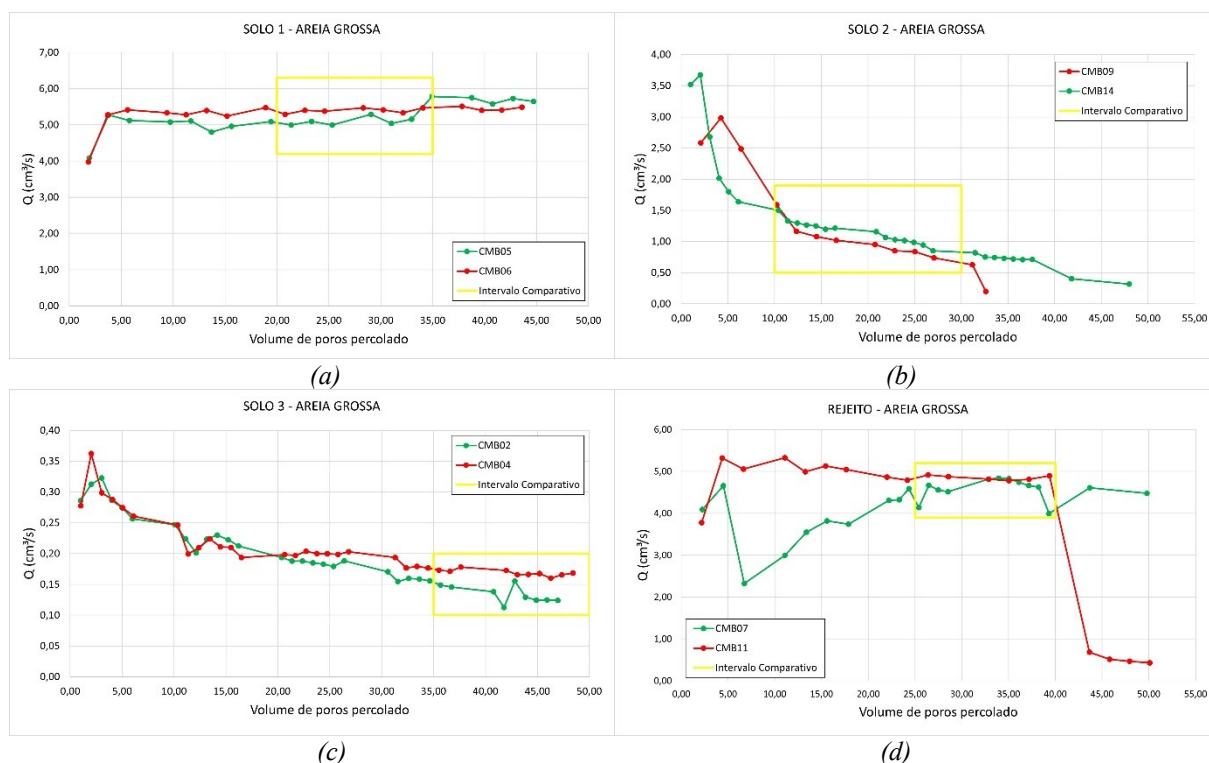


Figura 6 – Gráfico de combinado com areia grossa (a) Solo 1 (b) Solo 2 (c) Solo 3 (d) Rejeito.

Fonte: Autores (2023).

Tanto no caso combinado com areia natural quanto com areia grossa a vazão de percolação do Solo 1 é considerada bastante estabilizada não sofrendo, portanto, bruscas alterações, como pode ser ilustrado na Figura 6. As curvas de percolação dos Solos 2, 3 combinados com a areia grossa também são bastante similares entre si, e compreendem um comportamento decrescente seguido de aparente estabilização assim como quando ensaiado com areia natural, característico da fase de saturação. No andamento do ensaio com Solo 2 a vazão decai reduzindo a saída do fluido a bem próxima de nula, induzindo a interpretação de ocorrência de colmatagem no material filtro através de possíveis obstruções dos poros de percolação pelo carreamento de partículas. Em uma comparação mais abrangente da combinação com Solo 3, 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. Observando o comportamento da percolação na combinação do Rejeito com a areia grossa, houve 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 a queda dos valores de vazão ocorrido após o episódio, conectado à observação de uma maior decantação de partículas no fundo do recipiente de acondicionamento do fluido percolado, permite a interpretação da ocorrência de uma acomodação de partículas nos poros dos materiais e diminuindo a facilidade de escoamento do fluido.

Para análise comparativa dos valores de vazão de percolação de um mesmo material base com diferentes combinações de material filtro, foi definido um intervalo comparativo de volume de poros percolados e calculadas as médias dos valores de vazão em cada utilização da areia grossa e da areia natural. Na Tabela 2 a seguir estão ilustrados os intervalos e seus resultados médios de vazão.

Tabela 2 – Valores médios da percolação para os materiais base em suas diferentes combinações.

Média da percolação dos protegidos combinados			
Material	Intervalo de média (VPP)	Areia Natural	Areia Grossa

		Q (cm ³ /s)	Q (cm ³ /s)
Solo 1	20 a 35	1,587	5,293
Solo 2	10 a 30	0,143 ^a	1,090
Solo 3	35 a 50	0,122	0,152
Rejeito	25 a 40	0,291*	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: Autores (2023).

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. Para os casos combinados utilizando o Solo 2 observa-se uma diminuição da vazão de percolação considerando a combinação utilizando areia grossa como material filtro. Esse dado comparativo reafirma a interpretação anteriormente proposta de ter ocorrido uma possível colmatagem dos poros de percolação da areia grossa. Com os resultados do Solo 3 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 características semelhantes. No caso do Rejeito, a diferença dos valores de percolação quase atingiu um acréscimo de 4,5 cm³/s. A vazão de percolação nos corpos de prova utilizando Rejeito e areia grossa foi significativamente maior que utilizando areia natural.

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.

Os fluidos resultantes das percolações combinadas foram recolhidos e acondicionados em cerca de 5 períodos de volumes de poros percolados para que pudessem ser ensaiadas e analisada a evolução ou não da presença de sólidos em suspensão sendo carregados para fora do sistema filtrante. Na Figura 7 a seguir os intervalos de coletas e seus respectivos volumes de poros percolados são descritos individualmente.

Os dados dos sólidos em suspensão estão apresentados na Figura 7 com os valores de concentração de sólidos por intervalo ensaiado. No Apêndice A contém interpretações ilustrativas de cada corpo de prova permitindo analisar a quantificação de recolhimento de sólidos em suspensão e a percolação em um mesmo ensaio.

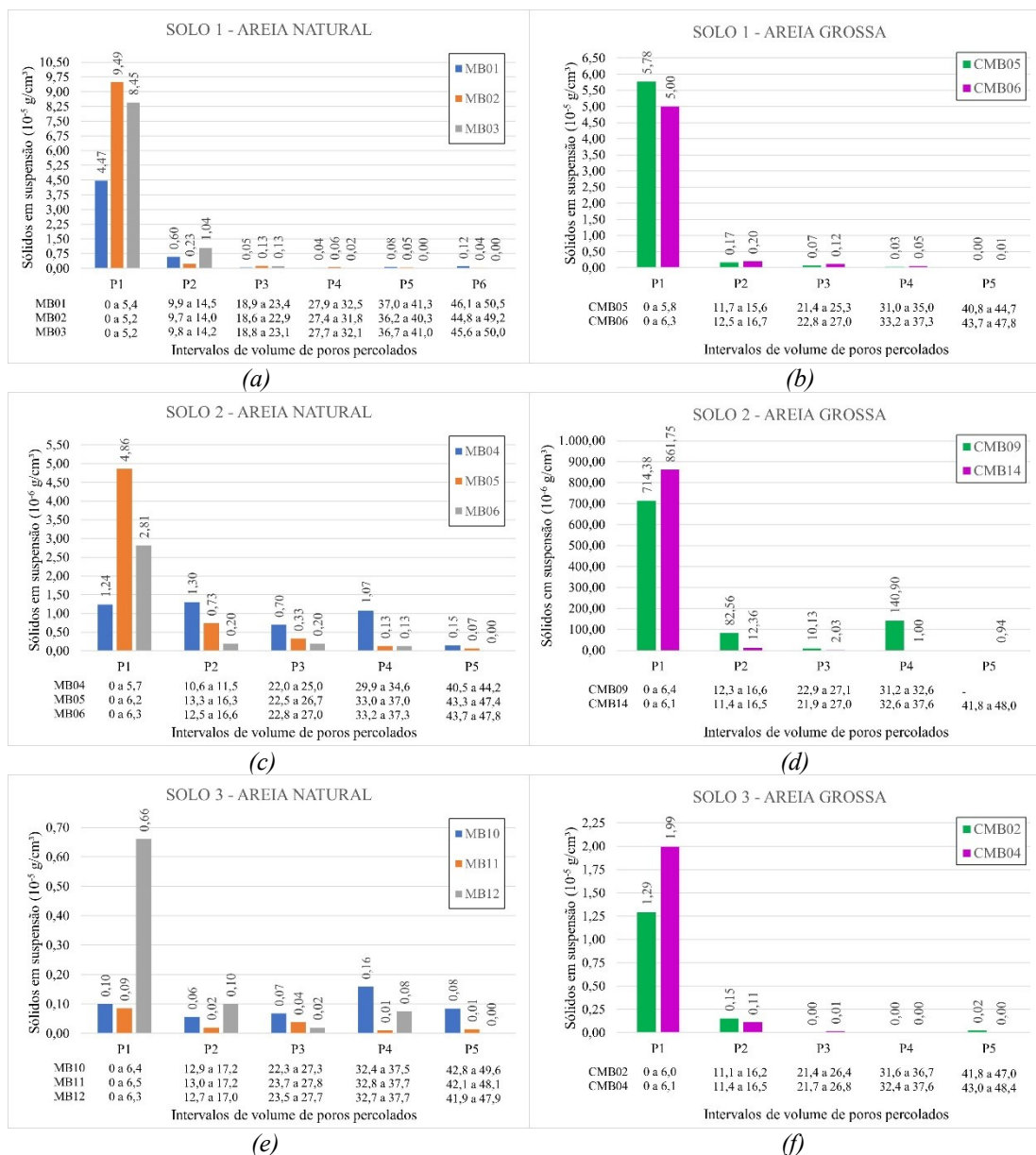
Analisando o gráfico de concentração de sólidos em suspensão para o Solo 1, Figura 7a,b, estes apresentam valores consideráveis no primeiro intervalo volumétrico de análise seguindo de uma redução grande atingindo números próximos a 0. Esse comportamento pode ser observado independentemente do material 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.

Comparando os valores de concentração de sólidos do Solo 2, Figura 7c,d, é evidente o aumento na quantidade de sólidos carregados com a percolação do fluido pelo Solo 2 com areia grossa. A interpretação de colmatagem do CMB09 no P4 é afirmada com os dados quantitativos dos sólidos. Analisando os dados de percolação para esse mesmo período de volume de poros percolados, no caso do CMB09, é possível correlacionar a diminuição acentuada da vazão no mesmo intervalo em que a massa de sólidos aumentou.

Com a utilização da areia grossa como material filtro no ensaio com Solo 3, Figura 7f, os resultados de sólidos presentes no fluido percolado descrevem que o carregamento das partículas ocorreu logo no primeiro período de volume de poros percolados. Se comparado com os resultados da Figura 7e, 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.

Na Figura 7g,h, onde o rejeito é combinado em ambas situações, pode ser observado valores consideráveis de sólidos em suspensão devido a percolação inicial e consequente lavagem das partículas. No período P4 do rejeito com areia natural destaca-se um aumento de partículas em suspensão do MB07, sendo o mais significativo. Compatibilizando com

os dados de percolação, o MB07 sofre uma queda de vazão seguida de um aumento imediatamente sequencial. 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. Quanto à queda brusca de vazão destacada em CMB11, conectando os comportamentos, a percolação do fluido no sistema estava carregando 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 podem ter sido expulsas, sendo acusadas então no ensaio de sólidos em suspensão.



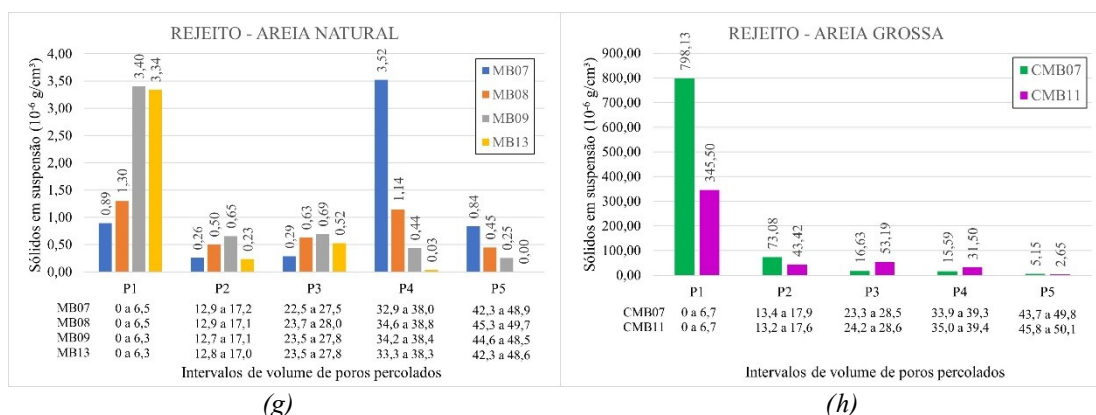


Figura 7 – Gráfico dos sólidos em suspensão por cada intervalo volumétrico de fluido percolado recolhidos (a) Solo 1 e areia natural, (b) Solo 1 e areia grossa, (c) Solo 2 e areia natural, (d) Solo 2 e areia grossa, (e) Solo 3 e areia natural, (f) Solo 3 e areia grossa, (g) Rejeito e areia natural, e (h) Rejeito e areia grossa.

Fonte: Autores (2023).

O ensaio de sólidos totais foi realizado com a intenção de medir a quantidade de partículas finas infiltraram para dentro do material filtro. Na Tabela 3 é possível observar os dados quantitativos da massa das partículas que estavam no interior do filtro ao final da percolação. Os valores para areia natural e grossa foram retirados dos materiais limpos com fins comparativos.

Tabela 3 – Sólidos totais retidos nas amostras de material filtro de areia natural e grossa.

Sólidos totais retidos no filtro percolado (g/cm³)						
Combinação	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Rejeito	Areia natural	Areia grossa
Areia natural	0,000525	0,001133	0,000682	0,000914	0,000586	
Areia grossa	0,000683	0,005192	0,000828	0,013224		0,00034

Fonte: Autores (2023).

Matematicamente 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 de percolação medida no ensaio com materiais combinados. As fotos na Figura 11 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 carregamento de partículas uma vez que as cores deste são semelhantes às cores dos respectivos materiais base.

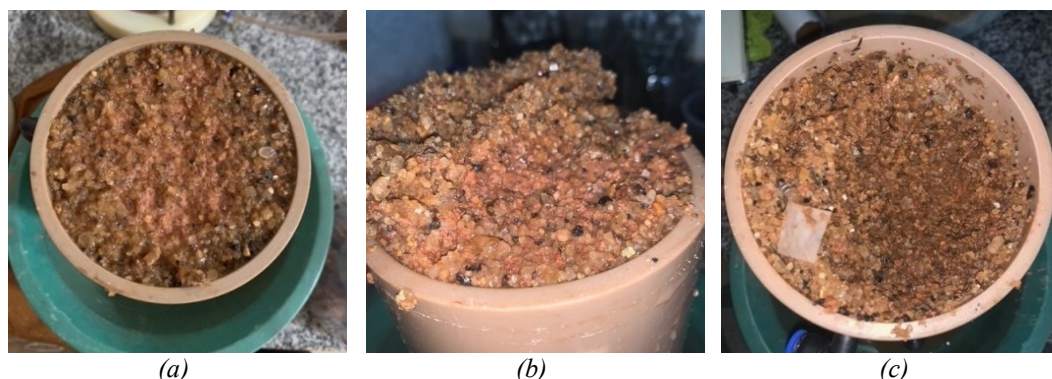


Figura 11- Fotos da retirada do material filtro de areia grossa do molde com (a,b) Solo 2 e (c) Rejeito.

Fonte: Autoria própria (2023).

Pelo estudo publicado por Neves e Caldeira (2021) com microscopias investigativas em filtro de drenagem, 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.

4. Considerações finais

Essencial para as correlações de permeabilidade é a compreensão do arranjo das partículas e como as porções de finos, médios e grossos interagem. 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 acontece devido aos valores limites do dimensionamento dependerem de 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 apenas um valor limite máximo $C_u \leq 6$. Esses ajustes 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 filtração.

Quanto à vazão de percolação e granulometrias características protegidas, os materiais base com maior quantidade de finos em sua composição ofereceram maior dificuldade de passagem do fluido quando em contato com a areia bem graduada. É passível a interpretação que com o caminhar do fluido no sentido base-para-filtro, partículas de finos do primeiro material são em sua maioria carregadas para a parte imediata de contato formando as zonas de auto filtração.

Na comparação da vazão de percolação combinado com as medidas para definição da permeabilidade de cada material protegido, o valor do coeficiente médio de fluxo foi maior em todos os casos em contato com o filtro. Atrelado ao comportamento da vazão de percolação estão fatores determinantes como o grau de compactação do material base adotado no preparo para execução do ensaio, cerca de 60% no ensaio combinado e 99% no ensaio de permeabilidade, e o surgimento do mecanismo de filtração, onde acontece uma conformização dos finos nos vazios da zona de contato imediata base-filtro formando caminhos preferenciais de fluidez. O contato do material protegido com um material de granulometria diferente, com maior volume de vazios e sem coesão, facilitou a percolação do fluido. E toda variação brusca desta vazão de percolação influencia diretamente na quantidade de partículas presentes no fluido de saída.

Nos dados do estudo de sólidos, a porção fina do solo arenoso, característica do Solo 3, teve um quantitativo pouco expressivo tanto na análise do fluido percolado quanto dos sólidos retidos no interior do material filtro, mesmo assim os dados dos sólidos totais são maiores que os em suspensão, permitindo a interpretação da ocorrência do transporte dos finos do material base apenas o suficiente para a formação da zona de auto filtração. 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 acusada no ensaio de sólidos totais, e nem em suspensão na água passante pelo sistema de percolação combinada. Já no estudo com o rejeito e com o Solo 2, sendo materiais com grande constituinte de silte em sua composição granulométrica, ambos apresentaram comportamento de carregamento de partículas tanto para o interior do filtro quanto em suspensão no fluido de saída. Esses comportamentos foram observados nas utilizações dos dois diferentes materiais filtro, entretanto com diferentes intensidades.

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, ou seja, bem graduada, seria eficaz como material filtro do Solo 2 e do Rejeito. Ambas as areias atenderiam como material filtro no caso dos Solo 1 e 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 oferecendo maior percolação quanto menor carreamento de partículas. Em contrapartida aos resultados esperados na proposição do estudo, o Solo 1 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 desenvolvimento da vazão condizentes as ditadas pelo material filtro utilizado. Fato que confirma a necessidade de estudo e avanço nas pesquisas aplicadas de mecânica dos solos para embasamento de projetos cada dia mais eficientes e seguros.

Agradecimentos

Agradecimento a Deus, familiares, amigos, professores, técnicos do LEC, CAPES, CNPq, FAPEMIG e, em especial, a UFV que oportuniza e contribui com o avanço em pesquisas e formações superiores.

Referências

- APHA. American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation. Washington, DC, USA: APHA, 1998. 874p.
- CANESCHI, F. P. *Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente*. Viçosa-MG, 2012. 136f. Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.
- Fell, R.; Macgregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G. *Geotechnical Engineering of Dams*. London, UK: Taylor & Francis Group plc., 2005. 905p.
- NRCS. Natural Resources Conservation Services. *Gradation design of sand and gravel filters*. National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA: NRCS, 1994. 633p.
- Neves, E. M.; Caldeira, L. 50 anos de investigação sobre o comportamento estrutural de barragens de aterro. *Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, pp 307-336. Portugal, 2021.
- PERIM, A. C. C. *Avaliação da granulometria de materiais de filtros para obras de terra*. Viçosa-MG, 2023. 141f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2023.
- Sherard, J. L.; Dunnigan, L. P. Filters and Leakage Control, in *Embankment Dams. Seepage and Leakage from Dams and Impoundments*, ASCE Symposium, Denver, CO, USA, 1-30, 1985.
- Sherard, J. L.; Dunnigan, L. P. Critical Filters for Impervious Soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, v.115(7), 927-947, 1989.
- Terzaghi, K. Soil Physical Basis of Mechanics of Earth Structures. *Publisher F. Deuticke*, Wien (in German), 1926.
- USBR. United States Bureau of Reclamation. *Design of Small Dams*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA: USBR, 1997. 904p.

Apêndice A

Este apêndice reúne os gráficos de cada corpo de prova submetido ao ensaio de percolação combinada, apresentando o tipo de material 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.

