

Avaliação da Granulometria de Materiais de Filtros para Rejeito de Mineração

Ana Clara Ceschim Perim 1
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, ana.perim@ufv.br

Bruno Pereira de Queiroz 2
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, bruno.queiroz@ufv.br

Rejane Nascentes 3
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, rejane.nascentes@ufv.br

Roberto Lopes Ferraz 4
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, rferraz@ufv.br

RESUMO: A drenagem de uma obra de terra é essencial para controlar o alívio de tensões de um maciço. Sua eficiência depende da determinação do material filtro utilizado, de modo a atender o dimensionamento granulométrico, que é calculado com base em critérios de permeabilidade e retenção. Considerando dois materiais filtros, sendo um deles uma areia natural com mais de 90% de fração arenosa e o outro uma areia grossa com quase 60% de areia, e um material base, sendo um rejeito com alta porcentagem constituinte de silte, o presente trabalho estuda a diferença de comportamento de percolação da água quando associados, permitindo assim a análise do carreamento de partículas para o interior do filtro e consequente compreensão do surgimento ou não de uma zona de auto filtragem, da colmatação dos finos, e da infiltração de partículas. A discussão principal deste estudo se fez através da realização de um ensaio de percolação do material base em contato direto com material filtro, onde além dos dados de vazão recolhidos, o fluido de saída foi ensaiado para medir as partículas em suspensão carregadas com o escoamento. A análise do comportamento drenante utilizando diferentes granulometrias permitiu considerar mais adequada a utilização da areia natural como material filtro constituinte da drenagem de uma obra de terra com esse rejeito de mineração. Utilizando a areia grossa como material filtro, a análise do carreamento de partículas pelo interior da areia grossa através do ensaio de sólidos totais apresenta resultados quantitativos significativos que, junto aos dados mineralógicos, indicam a presença de hematita que não existia na mineralogia individual das areias antes de submetidas à percolação em contato com rejeito.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de rejeitos, Drenagem, Carreamento de partículas, Filtros em barragens.

ABSTRACT: The drainage of an earthwork is essential to control the stress relief of a massif. Its efficiency depends on the determination of the filter material used in order to meet the particle size dimensioning calculated based on permeability and retention criteria. Considering two filter materials, one of them a natural sand with more than 90% of sandy fraction and the other a coarse sand with almost 60% of sand, and the base material being a waste with a high percentage of silt, the present work studies the difference in water percolation behavior when associated, thus allowing the analysis of the carriage of particles into the filter and consequent understanding of the emergence or not of a self-filtering zone, the clogging of the fines, and the infiltration of particles. The main discussion of this study was made possible by performing a percolation test of the base material in contact with filter material where in addition to the collected flow data, the outlet fluid was tested to measure the suspended particles carried with the flow. The analysis of the draining behavior using different granulometries allowed us to consider more appropriate the use of natural sand as a filter material constituting a drainage of earthworks with this mining tailings. Using coarse sand as a filter material, the analysis of the carriage of particles within the coarse sand through the total solids test presents significant quantitative results that, together with the mineralogical data, indicate the presence of hematite that did not exist in the individual mineralogy of the sands before being subjected to percolation in contact with tailings.

KEYWORDS: Tailing Dam, Drainage, Particle transportation, Dam Filters.

1 INTRODUÇÃO

Em busca de exercer uma mineração responsável, o IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração divulgou em 02 de setembro de 2019 uma Carta Compromisso Perante a Sociedade enfatizando os desafios e incentivos relacionados as atividades mineradoras, que atualmente ainda geram uma grande quantidade de resíduos. Os rejeitos tratam-se de produtos dos processos de beneficiamento do minério. Usualmente são depositos em pilhas, e consideram os dimensionamentos e premissas das obras de terra, incluindo a utilização de drenagem, para garantir o grau de segurança dos projetos que o utilizam. Entretanto, por se tratar de um material de origem fabricada, não pode ser classificado como solo, permitindo o questionamento se a utilização dos critérios de Terzaghi no dimensionamento do material filtro seria a mais adequada.

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).

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.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A escolha dos materiais a serem utilizados nesta pesquisa considerou o rejeito como material base, ou seja, material a ser protegido, devido a presença frequente do rejeito no meio da mineração, e duas areias com granulometrias diferentes como material filtro. Quanto à origem dos materiais, o rejeito de extração de minério de ferro foi cedido pela mineradora CSN - Companhia Siderúrgica Nacional, através de uma parceria de pesquisa entre a empresa e a UFV – Universidade Federal de Viçosa. Os ativos da CSN Mineração encontram-se no Quadrilátero Ferrífero do estado de MG - Minas Gerais. A areia, comercializada como média, foi adquirida na cidade de Viçosa / MG. A primeira variante do material filtro selecionada foi a areia natural, diretamente como é fornecida. O segundo material filtro selecionado foi a areia grossa, obtida através da correção granulométrica com peneiramento, utilizando a porção passante na peneira de 4,75 mm e retida na peneira de 1,18 mm, podendo então ser caracterizada como areia grossa mal graduada (Figura 1).



Figura 1. Fotos do material base, rejeito, e dos materiais filtro, areia natural e areia grossa.

Na primeira etapa da pesquisa foram realizados ensaios de caracterização, realizados no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UFV Campus Viçosa, sendo eles, ensaio de compactação segundo NBR – Norma Brasileira 7182 (2020), ensaio de granulometria segundo NBR 7181 (2017) e ensaio de massa específica dos sólidos segundo NBR 6458 (2017). O fluxograma na Figura 2 ilustra as etapas da metodologia adotada. A segunda etapa engloba os ensaios de determinação dos coeficientes de permeabilidade com carga constante, utilizando o difundido por Caneschi (2012) para o rejeito, e a norma NBR 13292 (1995) para as

areias. E também ensaios de determinação da percolação em materiais combinados. Com o recolhimento do fluido passante no ensaio de percolação foi determinada a quificação individual dos sólidos em suspensão, nos moldes do ensaio 2540D (APHA - *American Public Health Association*, 1998). Já a determinação dos sólidos, foi feita segundo 2540G (APHA, 1998) com o fluido decorrente da lavagem do material filtro depois de retirado do ensaio de percolação. Por fim, utilizando os resíduos finais do ensaio de sólidos totais, foram realizados DRX - Difratoformas de Raios-X de lâminas escavadas para obtenção dos dados mineralógicos.

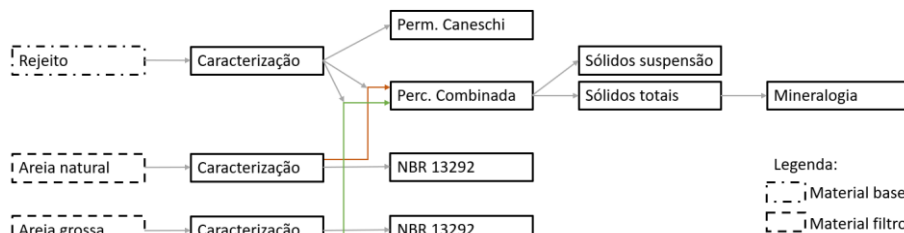


Figura 2. Fluxograma das etapas de ensaio e suas conexões.

O equipamento utilizado para definição da permeabilidade do rejeito foi montado no LEC / UFV, e desenvolvido por Caneschi em 2012 para estudo publicado. No presente trabalho ensaiaram-se 4 corpos de prova do material base para obtenção do coeficiente de permeabilidade. Com o rejeito devidamente umidificado ($w_{ot} \pm 1\%$) e homogêneo, a moldagem de cada CP - Corpo de Prova foi realizada através de compactação estática, considerando grau de compactação variando no intervalo de $-2\% < 99\% > +1\%$ e umidade variando até 2% no valor da ótima ($w_{ot} \pm 2\%$). Para a execução do ensaio foi adotado o valor do gradiente igual a 15,2, e o fluido adotado para percolação em todos os corpos de prova foi a água destilada.

Com auxílio e instrução técnica do LESA - Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFV, foram realizados os ensaios de sólidos em suspensão e totais. Os fluidos para análise dos sólidos em suspensão foram recolhidos na saída do corpo de prova de percolação combinada, acondicionados em garrafas plásticas etiquetadas e mantidos em ambiente climatizado em torno de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para realização deste ensaio foi utilizado filtro de fibra de vidro (GF/C 47 mm x 1,2 um) e um volume de filtragem de 3 litros. Já os fluidos para análise dos sólidos totais foram recolhidos, da lavagem na peneira # 200 (0,75 mm) do material filtro extraído do interior do corpo de prova ao final do ensaio de percolação combinada, acondicionados e mantidos da mesma maneira. Tal realização foi feita com secagem total do material em estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ de cerca de 2 litro de fluido.

Afim de recolher os dados mineralógicos das partículas lavadas do interior dos materiais filtro, depois de ensaiado combinadamente com o rejeito, foram realizados no Laboratório de Mineralogia de UFV os ensaios de DRX Rigaku (radiação $\text{CoK}\alpha$, $\lambda = 1,78901\text{ \AA}$) utilizando lâminas escavadas montadas com o material seco retirado do ensaio de sólidos totais quando finalizado. Foram ensaiadas 4 lâminas, sendo uma para rejeito combinado com areia natural, outra para o rejeito combinado com areia grossa, outra da lavagem individual da areia natural, sem ter sido combinada e ensaiada, a última da lavagem individual da areia grossa.

2.1 Dimensionamento do material 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 estudo precursor de dimensionamento de filtro de drenagem foi proposto em 1926 por Terzaghi e é conhecido como Critérios Clássicos de Dimensionamento. Ele se baseia no comportamento das vazões em materiais não coesivos e uniformes, ou seja, granulares. O primeiro deles é 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. O segundo critério, é o 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 dimensionamento da faixa granulométrica do filtro adotado nesta pesquisa foi definido a partir das 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 filtros em barragens. E está disponíveis no trabalho Fell *et al* (2005).

2.2 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. O ensaio segue a mesma ideologia executiva do ensaio de permeabilidade de Caneschi (2012) e utiliza um o corpo de prova diferente sendo este de PVC - Policloreto de Vinila, altura de 20 cm, 9,7 cm de diâmetro, com frisos diametrais para impedimento de fluxo preferencial, e saídas laterais para avaliação de perda de carga. Os parâmetros adotados foram grau de compactação de $60 \% \pm 2 \%$ para o rejeito, e $95 \% \pm 2 \%$ para o material filtro. Na preparação do material filtro as areias foram lavadas na peneira # 200 (0,75 mm) e posteriormente secadas em estufa, a fim de diminuir possíveis sólidos em suspensão. O material resultante deste ensaio (fluido percolado) foi devidamente acondicionado para ser utilizados nos ensaios de sólidos em suspensão.

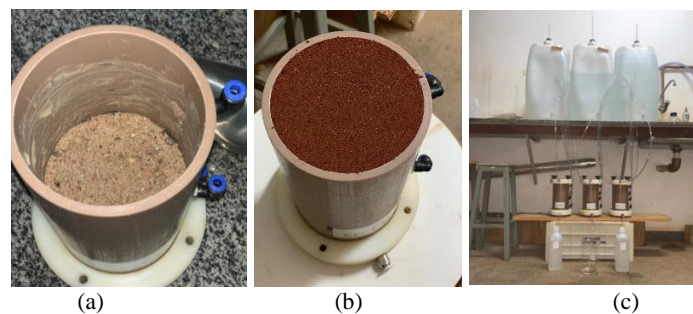


Figura 3. (a) Montagem do material filtro no corpo de prova; (b) Montagem do material base no corpo de prova; (c) Ensaio em andamento.

Na montagem de cada corpo de prova o material filtro foi colocado por baixo, em contato direto com a base, compactado estaticamente com peso de 500 g em três camadas iguais. Imediatamente acima foi compactado o material base da mesma forma, resultando num contato direto entre areia e rejeito (Figura 3). Ao todo foram preparados e ensaiados 4 corpos de prova com rejeito combinado com areia natural e 2 corpos de prova com rejeito combinado e areia grossa, em condição descendente de fluxo. No sistema, a perda de carga no material filtro foi considerada desprezível, e o gradiente foi de 9,61. Os valores determinados são da vazão do fluido percolante em um sistema com material base e filtro atuando simultaneamente, e seguiram as mesmas equações de cálculo de Caneschi (2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a execução dos ensaios de caracterização, segundo as normas brasileiras difundidas, a Tabela 1 exhibe os dados obtidos do rejeito, material base, e das respectivas areias natural e grossa, materiais filtro. 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 do material filtro. Na Figura 4 estão destacadas as curvas granulométricas individuais dos materiais e o respectivo intervalo. Comparando a curva granulométrica dos dois materiais filtro observa-se uma diferença de mais de 30 % na fração arenosa, o que condiz com a ideia de a areia natural ser mais bem graduada e ter mais finos preenchendo seus vazios.

Ainda na Figura 4 estão ilustradas as análises de dimensionamento propostas por Terzaghi, USBR, Sherard e Dunningan em suas faixas granulométricas correspondentes. Compatibilizando as granulometrias

das areias, propostas para os materiais filtro, nos intervalos granulométricos dimensionados, observa-se que nenhuma das duas estão 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. Analisando o intervalo granulométrico em d15 – Diâmetro equivalente à 15 % de material passante, apenas a areia natural atende aos critérios clássicos propostos por Terzaghi, USBR e Sherard e D., e pode ser dita adequada como material filtro.

Tabela 1. Resultados de caracterização dos materiais.

	Compactação		Caracterização				
	W _{ot} (%)	γ _{d,máx} (kN/m ³)	ρ _s (g/cm ³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Rejeito	12,30	20,90	3,27	11	58	31	0
A. Natural			2,68	0	0	91	9
A. Grossa			2,66	0	0	57	43

w_{ot} – umidade ótima; γ_{d,máx} – peso específico seco máximo; ρ_s – massa específica dos sólidos.

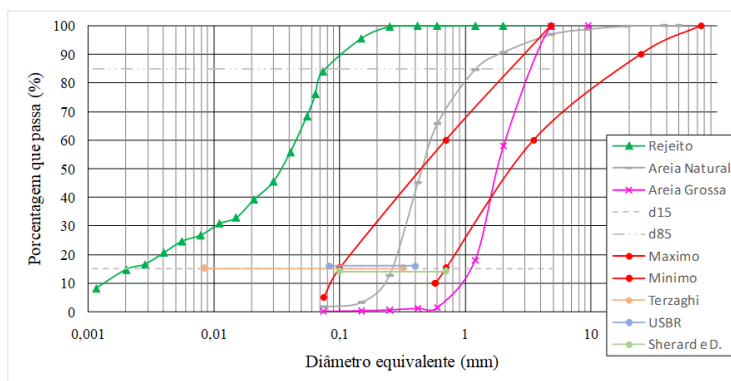


Figura 4. Dimensionamento do material filtro para o rejeito.

3.1 Resultados de permeabilidade

A média dos valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade a 20 °C dos ensaios de permeabilidade de Caneschi (2012), assim como o respectivo desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na Tabela 2. Observando os resultados, o primeiro dado encontra-se com maior discrepância se comparado com os demais. Logo, considerando apenas as três repetições mais convergente, o coeficiente de permeabilidade médio do rejeito de $2,08 \times 10^{-6}$ cm/s. Correlacionando a permeabilidade encontrada com as frações granulométricas presente neste rejeito, sua condutividade hidráulica é alta comparado com 30 % de areia constituente, distanciando-se das correlações de mecânica dos solos clássicas.

Tabela 2. Análise descritiva dos ensaios de permeabilidade do Rejeito.

	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
Rejeito	248	11,5	0,05	205	11,3	0,05	209	13,8	0,07	209	11,7	0,06

k₂₀ – coeficiente médio de permeabilidade a 20 °C; S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ¹ – 10⁻⁸ cm/s; ² – %.

Fazendo a média dos valores individuais de permeabilidade recolhidos para as areias (Tabela 3), 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.

Na Tabela 4 os resultados dos ensaios de percolação com materiais combinados utilizando a 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 3. 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.

Tabela 4. Dados médios de percolação para cada corpo de prova de Rejeito ensaiado com cada areia.

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
Rejeito + AN	0,25	0,12	0,48	0,31	0,05	0,17	0,47	0,23	0,49	0,31	0,07	0,24
Rejeito + AG	4,25	0,63	0,15	3,97	1,86	0,47	-	-	-	-	-	-

AN – Areia Natural; AG – Areia Grossa; Q – vazão de percolação; S – desvio padrão; CV – coef. de variação; ¹ – cm³/s; ² – %.

Analisando os resultados obtidos para a vazão de percolação do fluido (Figura 5 a,b), tanto no caso do rejeito combinado com areia natural como com areia grossa, a inconstância da fase inicial dos dados pode ser atribuída à anisotropia do material, à fase de saturação, e ao rearranjo das partículas. E assim é interpretado até que houvesse início da estabilização dos valores de leitura seguida por certa estabilização. Essa sequência de valores relativamente estabilizados só é quebrada com uma brusca queda na vazão do corpo de prova denominado CMB11, um pouco antes de atingir o volume de 40 poros percolados. 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. Observando a facilidade de decantação das partículas no fluido recolhido do ensaio (Figura 5 c), uma possível justificativa seria a ocorrência da acomodação de partículas nos poros, diminuindo a facilidade de escoamento do fluido.

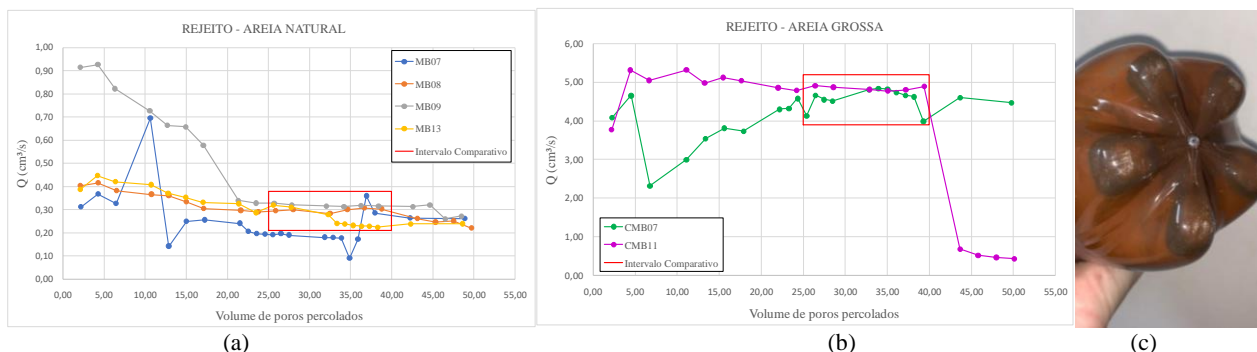


Figura 5. (a) Dados dos ensaios de percolação do rejeito com areia natural; (b) Dados dos ensaios de percolação do rejeito com areia grossa; (c) Foto do fluido percolado.

O intervalo visivelmente mais estável do ensaio acontece no intervalo de 25 a 40 volumes de poros percolados. Assim, nesse período, a média das vazões do material combinado com areia natural é igual a 0,291 cm³/s, considerando os corpos de prova denominados MB08, MB09 e MB13, e com areia grossa é igual a 4,715 cm³/s. Observa-se que a diferença dos valores de percolação quase atingiu um acréscimo de 4,5 cm³/s da vazão com a utilização da areia grossa, o que acresce ao fato do fluido percolante recolhido com essa alta vazão ter apresentado partículas sólidas visíveis em suspensão de coloração escura característica do rejeito. O fato dessa vazão ter sido mais expressiva e com maior quantidade de partículas em suspensão, infere a interpretação de maior tendência ao carregamento de partículas e não de colmatação. Acredita-se também 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.

As interpretações dos dados do ensaio de sólido em suspensão (Figura 6 a,b) mostram que, no intervalo volumétrico P1, de ambas situações, pode ser observado valores consideráveis de sólidos em suspensão devido a percolação inicial e consequente lavagem das partículas. Os comportamentos seguintes apresentam certa estabilidade nos dois casos combinados (Figura 6). No período P4 do rejeito com areia natural destaca-se um

aumento de partículas em suspensão do MB07. Esse valor medido superou todos os valores de concentração até então determinado no gráfico, sendo 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 colmatção 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 carreando partículas, tanto do material base para o material filtro quanto para fora da célula. O volume de partículas acomodadas 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 no ensaio de sólidos em suspensão.

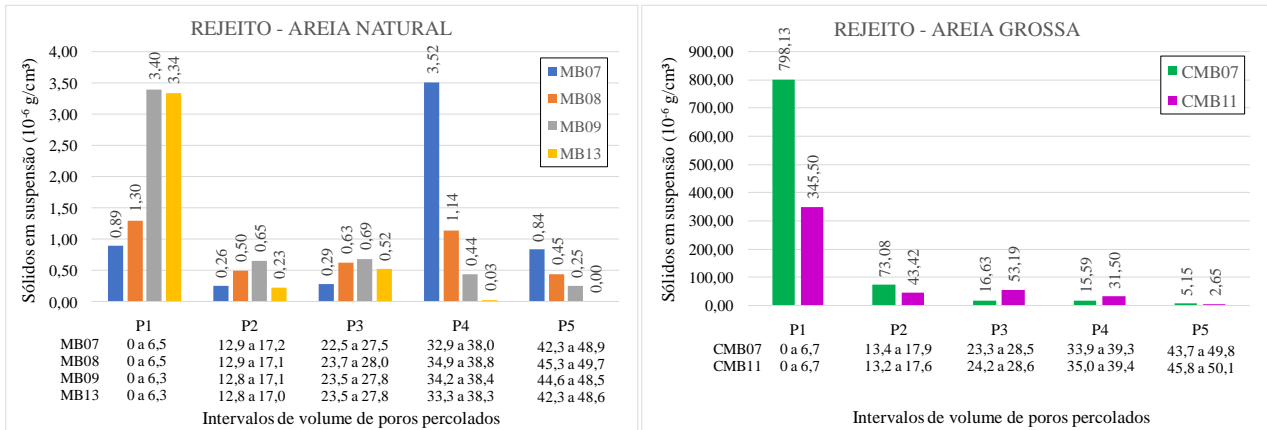


Figura 6. Gráfico dos sólidos em suspensão do fluido dos ensaios rejeito e areia natural, e grossa.

O ensaio de sólidos totais foi realizado com a intenção de medir a quantidade de partículas finas infiltraram para dentro do material filtro. Assim, obteve-se 0,000914 g/cm³ de partículas retirada da lavagem da areia natural em contato direto com rejeito, depois de aplicado o fluxo de água percolado, e 0,013224 g/cm³ de partículas retirada do mesmo contexto só que com areia grossa. Também foi realizado o ensaio com o fluido recolhido da lavagem das areias puras para fins comparativos, resultando em 0,000586 g/cm³ de partículas lavadas da areia natural sem combinação, e 0,00034 g/cm³ de partículas lavadas da areia grossa sem combinação. Esses dados afirmam a interpretação de carregamento de partículas de rejeito para o interior do material filtro, sendo mais significativo no corpos de prova combinado com areia grossa como função de filtro.

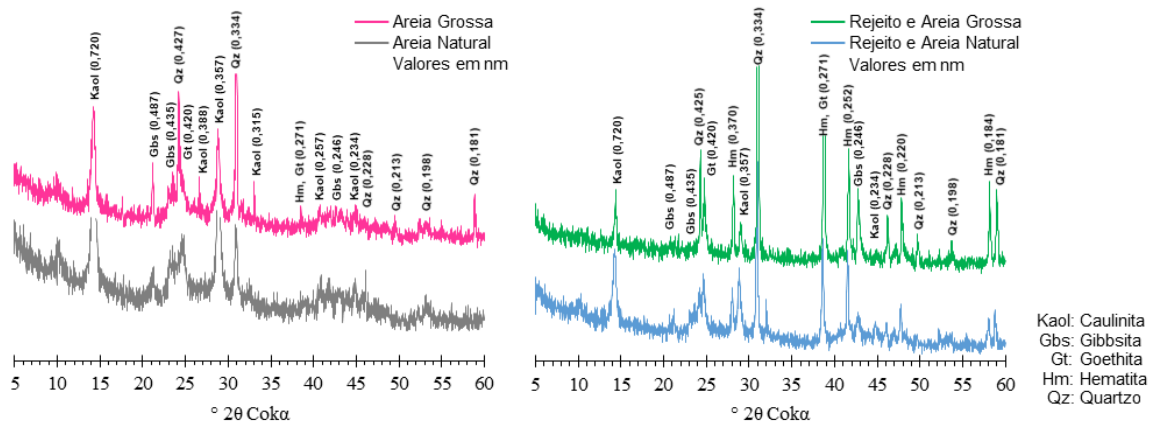


Figura 7. Mineralogia dos sólidos totais presentes no interior dos materiais filtro.

Quantitativamente, o ensaio de sólidos totais confirma maior presença de partículas de rejeito infiltradas no interior no material filtro areia grossa. Em termos de qualitativos, os dados mineralógicos (Figura 7) destacam a presença acentuada de hematita na análises dos materiais provenientes da percolação combinada, tanto com areia natural como com a grossa. O rejeito é um material com maior teor de óxidos de ferro

(hematita, goethita) que os demais materiais, que apresentam composição sobretudo de caulinita e quartzo. Na literatura é discutido que a massa específica dos minerais de hematita ($5,30 \text{ g/cm}^3$) e goethita ($4,37 \text{ g/cm}^3$) é superior a quartzo ($2,7 \text{ g/cm}^3$) e da caulinita ($2,6\text{-}2,7 \text{ g/cm}^3$) (Abulnaga, 2021). Daí, a maior massa específica do rejeito pode ser atribuída a sua composição mineralógica. Por fim, é possível associar o aparecimento da hematita ao carregamento de partículas do rejeito para o interior das areias ao longo da percolação do fluido.

4 CONCLUSÃO

Quanto a permeabilidade do rejeito, que mesmo tendo quase 70% de finos, no caso dessa pesquisa, teve alta condutividade hidráulica. Se comparada as vazões do ensaio de permeabilidade e percolação, os valores foram maiores nas situações em que o material base foi submetido à percolação em conjunto com material filtro. Portanto, o contato do material protegido com um material de granulometria diferente, com maior volume de vazios e sem coesão, facilitou a percolação do fluido. Considerando o material base rejeito, com silte como grande constituinte granulométrico e predomínio de óxidos de ferro na sua mineralogia, houveram carregamento de partículas tanto para o interior do filtro quanto em suspensão no fluido de saída, em ambas utilizações de materiais filtro, entretanto com diferentes intensidades. Logo, pelos critérios clássicos de dimensionamento e pelas análises dos comportamentos, tanto na percolação do fluido quanto na retenção das partículas sólidas, apenas a areia natural seria eficiente como material filtro do rejeito estudado.

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 BIBLIOGRÁFICAS

- Abulnaga, Baha. (2021). *Appendix E: specific gravity and hardness of minerals*. Slurry Systems Handbook, 2nd ed, McGraw Hill, New York, USA.
- American Public Health Association (1998). *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, 874p.
- Caneschi, F. P. (2012). *Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente*. Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 136p.
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Group plc. London, UK, 905p.
- Natural Resources Conservation Services. (1994). *Gradation design of sand and gravel filters*. National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 633p.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. (1985). *Filters and Leakage Control, in Embankment Dams*. Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE Symposium, Denver, CO, USA, 1-30.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. (1989). *Critical Filters for Impervious Soils*. Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol.115(7), 927-947 p.
- Silva, D. E. *Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 162p.
- Terzaghi, K., (1926) *Soil Physical Basis of Mechanics of Earth Structures*. Publisher F. Deuticke, Wien (in German).
- United States Bureau of Reclamation. (1977). *Design of Small Dams*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA, 904p.