

ESTUDO LABORATORIAL PARA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS FILTRANTES DE SEDIMENTOS EM ÁREAS DE LAVRA PARA CERÂMICA



MIGUEL ANGEL ALFARO SOTO

Pesquisador do Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos (RAIH), Departamento de Geologia (DGA), Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail: alfaro@rc.unesp.br

CHANG HUNG KIANG

Professor e coordenador do Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos (RAIH), Departamento de Geologia (DGA), Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail: chang@rc.unesp.br

ELIANA MARTINS PEREIRA

Pesquisadora do Laboratório de Remediação de Áreas Impactadas por Hidrocarbonetos (RAIH), Departamento de Geologia (DGA), Universidade Estadual Paulista (UNESP), e-mail: emartins@rc.unesp.br

RESUMO ABSTRACT

Este trabalho apresenta resultados de testes laboratoriais visando à implementação de filtros para sedimentos que fornecerão subsídios a projetos de barragens, isto como medida mitigadora a fim de reduzir impactos pelo aumento da turbidez em águas superficiais devido a atividades de produção de minérios em áreas de lavras na cidade de Santa Gertrudes-SP. Para este fim, foram projetadas permeâmetros específicos a carga constante e testados diferentes tipos de filtros onde foi percolado água+sedimentos simulando, em escala reduzida, as características geométricas, de pressão e transitoriedade de fluxo em que estarão submetidos em campo. Os resultados esclareceram que, para essas condições específicas os filtros são satisfatórios quando utilizado em conjunto dois tipos de material grosso e um tipo específico de areia da região. Uma proporção adequada dos materiais e em particular, as características da areia permitiram a redução quase instantânea da turbidez desde valores acima da escala de medição do aparelho utilizado até valores entre 14 NTU e 2 NTU. Adicionalmente, apresenta-se uma lei de variação da condutividade hidráulica *versus* tempo, para estimativa da vida útil do filtro.

Palavras chave: Filtros, permeâmetros, sedimentos, turbidez, barragem

This paper presents results of laboratory tests for implementing sediments filters as a draft to dam projects as mitigation measure to reduce impacts by increased turbidity in surface waters due mining activities located in Santa Gertrudes-SP city. Therefore, were designed permeameters to work with the steady state technique and tested different types of filters which was percolated water + sediment simulating, on a reduced scale, the geometrical characteristics, pressure and transitority of flow that will be subjected in the field. The results showed that the specific conditions for the filters are satisfactory when used in conjunction two types of coarse gravel and a specific type of sand. A suitable proportion and in particular, the characteristics of the sand were able to reduce, practically instantaneous, the very high turbidity to values between 14 NTU and 2 NTU. Additionally, it presents a law of variation of hydraulic conductivity versus time to estimate the life of the filter.

Keywords: Filters, permeameters, sediments, turbidity

INTRODUÇÃO

O Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes é o maior na produção de revestimentos cerâmicos da América Latina, contribuindo sobremaneira como desenvolvimento econômico do Estado de São Paulo. No entanto, o aproveitamento dos recursos minerais é realizado, em alguns casos, de forma inadequada, ocorrendo perdas no aproveitamento da produção final e geração de inúmeros impactos ambientais negativos (Christofoletti e Moreno, 2011).

Segundo a Resolução de nº 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), impacto ambiental representa “qualquer alteração nas propriedades físicas, químicas e biológicas no meio ambiente, causado por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: saúde, segurança e o bem estar ao meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais”. Ainda, os impactos ambientais provenientes de uma mineração podem ser classificados em negativos e positivos e divididos em: impacto ao meio biótico, físico e social. De acordo com Christofoletti e Moreno (2011), os impactos ambientais negativos presentes no Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes são ocasionados principalmente nas etapas de extração e pré-beneficiamento e ocorrem devido à falta de medidas mitigadoras que deveriam ser executadas no acompanhamento do plano de lavra.

A extração e pré-beneficiamento são realizados mediante procedimentos mecânicos. O processo de extração, por exemplo, requer a utilização de maquinaria e explosivos; durante o processo de pré-beneficiamento ocorre espalhamento, fragmentação, homogeneização e secagem das argilas em pátios, com passagens sucessivas

de rolos compressores dotados de facas ou tratores (sazonamento). Em ambos os casos, a matéria prima é composta principalmente por uma fração fina, que é exposta ao ar livre para depois ser moída e encaminhada para o processo industrial que compreende as etapas de prensagem, secagem, esmaltação e queima.

Fortes chuvas associadas à geometria do terreno e à disposição desses materiais em minas e pátios de secagem propiciam aumentos da turbidez na água superficial quando estes finos são carregados para as redes de drenagens. Este tipo de impacto já teve ocorrência no município de Santa Gertrudes. Como consequência, a qualidade da água para o abastecimento público ficou comprometida temporariamente (Christofoletti e Moreno, 2011). Por esse motivo, no ano de 2005, o Grupo Técnico da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo - Estudos Hidrogeológicos - Santa Gertrudes (processo de nº 30.167/2005) determinou a paralisação de sete empreendimentos causadores deste fenômeno na região.

Algumas medidas mitigadoras podem ser empregadas para evitar problemas de turbidez na água superficial. Geralmente são utilizados tanques de decantação nos locais de pré-beneficiamento (minas, pátios de secagem e nas pilhas de sazonalamento). No entanto, em alguns casos estes procedimentos não são suficientes e devem ser complementados ou substituídos por procedimentos alternativos. Uma alternativa para decantação é a utilização de valas de infiltração antecedendo a uma barragem de infiltração, esta última contendo um filtro com características geométricas e de materiais específicos para retenção de sólidos em suspensão. A Figura 1 mostra uma configuração de uma barragem filtrante para sedimentos.

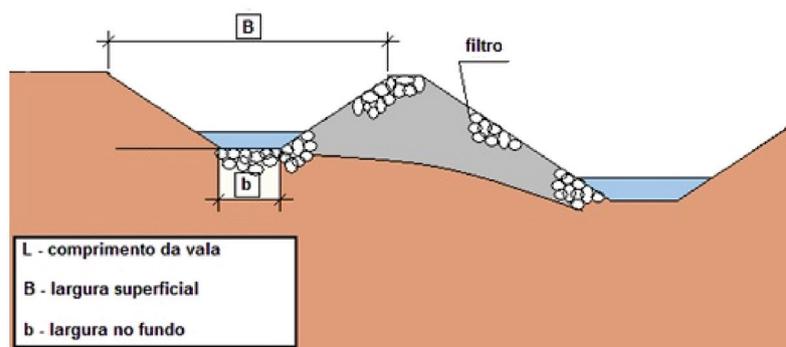


Figura 1 - Barragem filtrante para sedimentos (Ampla, 2011)

Diante dessa problemática, este trabalho apresenta o emprego de um processo alternativo e complementar aos depósitos de decantação. Este processo consiste na caracterização de filtros que podem fornecer subsídio a projetos de barragens filtrantes de sedimentos, com a finalidade de reduzir os impactos ambientais decorrentes do aumento da turbidez em águas superficiais provenientes de atividades inerentes à produção de minérios em áreas de lavra.

A utilização destes resultados servirá como referência para reprodução de uma estrutura similar (barragem) em campo, porém levando em consideração fatores relacionados à escala.

METODOLOGIA

Para a consecução desta pesquisa foram projetados permeâmetros específicos a carga constante, para serem submetidos a fluxo unidimensional de água+sedimentos. O estudo buscou a escolha adequada de materiais que permitissem a retenção de sedimentos na estrutura do corpo de prova, em quantidades que satisfizessem a diminuição da turbidez da água, à jusante, a limites aceitáveis segundo o regulamentado pela CETESB (2011), e o retardamento da redução da condutividade hidráulica devido à colmatação, até limites aceitáveis de permeabilidade para uso como filtro.

Definição das condições de ensaios em laboratório

Após análise das características hidrológicas e físicas do local, foi possível estabelecer os parâmetros condicionantes do estudo. Assim, o filtro testado foi submetido às seguintes condições: condutividade mínima para permitir, em campo, um esvaziamento na vala da barragem em 24 horas; cargas hidráulicas mínimas e máximas de 0,5 m e 2,0 m, respectivamente; água+sedimentos percolante com concentração máxima de 10g/L; turbidez de 50 NTU, valor máximo exigido pela CETESB (2011); fluxo de água intermitente (transitório) para simulação de precipitação.

Ensaio em laboratório

Uma vez definida as condições de fluxo (item 2.1) de possível ocorrência em campo, foi possível

executar os ensaios em laboratório. Logo, procedeu-se à construção dos permeâmetros a carga constante, para utilização nos ensaios de fluxo unidimensional da água+sedimentos.

Permeâmetros a carga constante

O sistema consiste em dois permeâmetros de seção quadrada de 0,20 m de lado e 1,15 m de comprimento (Figura 1).



Figura 2 - Componentes do sistema de permeâmetros para percolação de água + sedimentos. Detalhes no texto.

Os permeâmetros para imposição de cargas de 0,5 m e 2,0 m (2 e 3, Figura 2, respectivamente) são compostos por dois compartimentos metálicos fabricados com chapas de 2 mm de espessura. Um dos compartimentos (preenchido com material de filtro) serve como célula de percolação, tendo no extremo esquerdo uma parede vazada (com malha nº 4), por onde passa a solução/água; possui apenas uma válvula de esfera de 3/8" para medida da vazão longitudinal no extremo direito. O compartimento do extremo esquerdo do permeâmetro (2) é composto por um reservatório aberto, enquanto que, o compartimento esquerdo do permeâmetro (3) possui um reservatório fechado, ambos em contato direto através de mangueiras com o reservatório externo (1, Figura 2).

Os demais componentes do sistema de permeâmetros são abaixo descritos.

- Reservatório elevado (1) dos permeâmetros (2) e (3). Este reservatório serve de alimentação ao permeâmetro (2), com 0,5 m de carga hidráulica, e aplicação de carga de 2,0 m no permeâmetro adjacente (3); foi projetado para manter a altura praticamente constante ($2 \text{ m} \pm 3 \text{ cm}$), por meio de sensores magnéticos de altura desenvolvidos para esta pesquisa; adicionalmente, utiliza agitadores elétricos para manter os sólidos em suspensão.
- Permeâmetro (2) para cargas hidráulicas de 0,5m. Este permeâmetro possui um reservatório aberto cujo controle de carga hidráulica é feito com uma válvula tipo boia, abastecida com água+sedimentos a partir do reservatório elevado (1); é dotado de um agitador elétrico submerso interno.
- Permeâmetro (3) para cargas hidráulicas de 2,0 m. Este permeâmetro possui um reservatório fechado com um agitador elétrico submerso interno, onde a carga hidráulica é aplicada a partir do reservatório elevado (1).
- Reservatório (4, Figura 2) de abastecimento de reservatório (5, Figura 2). O reservatório (4) foi utilizado para preparação da água+sedimentos e abastecimento do reservatório (5). Sua importância reside em evitar preparação da água+sedimentos no reservatório (5), onde a variação do volume do fluido é constante.
- Reservatório (5) para abastecimento do reservatório elevado (1). O reservatório (5) possui duas bombas submersas, sendo que a primeira permite o transporte da água+sedimentos para o reservatório elevado (1), quando o nível deste último ultrapassa a faixa de variação estipulada ($\pm 3,0 \text{ cm}$). A segunda bomba destina-se a agitar periodicamente a água+sedimentos, para evitar que os sedimentos decantem ao longo do tempo.
- Sistema eletrônico de controle de nível da água+sedimentos do reservatório (1) e agitação temporizada de bombas dos reservatórios. O sistema eletrônico permite que o reservatório (1) mantenha um nível praticamente constante de $2,0 \text{ m} \pm 3,0 \text{ cm}$ entre a superfície do reservatório e o centro de massa do permeâmetro. Adicionalmente, controla a agitação periódica dos reservatórios (5) e (1) e do reservatório do permeâmetro (1), para evitar decantação dos sedimentos.

Métodos de ensaio

O material corresponde à Formação Corumbataí e é constituído principalmente por lamitos, que podem se encontrar maciços, laminados ou intercalados, argilitos, folhelhos e arenitos finos a médios, de cores variadas, intercalados com siltitos arenosos ou argilosos. Estes siltitos variam regionalmente e agrupam-se em cinco diferentes minérios: Maciço, Laminado, Intercalado Siltoso, Intercalado Arenoso e Alterado. A composição litológica e granulométrica desses minérios varia verticalmente e lateralmente com o avanço da lavra. (Christofoletti e Moreno, 2011).

A turbidez na água superficial que ocorre principalmente nos períodos chuvosos na área decorre dos finos da mina e do pátio de secagem que são carreados para as redes de drenagens, sendo composto por material transportado, in situ e de alteração inicial da rocha. Dessa forma, para composição da água+sedimento foram coletadas amostras em área de exposição de rochas adjacentes às áreas de mineração.

Inicialmente, a amostra representativa foi secada ao ar, destorroada em almofariz e passada por peneira nº4. Uma porção da amostra foi destinada à caracterização petrofísica. Como mencionado anteriormente, a água+sedimentos foi preparada a concentração de 10 g/L.

Testes de laboratório preliminares para determinação das características de filtro para sedimentos

Os testes preliminares nos permeâmetros (item 2.2.1) seriam de difícil execução, pois incorreriam na utilização de grandes volumes de material filtrante, repetidas montagens dos permeâmetros, grandes volumes de água e sedimentos e, principalmente, prolongado tempo de execução. Por essa razão, foram realizados testes em colunas de pequeno porte. A Figura 3 mostra o arranjo empregado para execução dos testes preliminares. Este equipamento é constituído por um sistema de abastecimento de água (1, Figura 3), um reservatório ou coluna de pequeno porte onde se encontra disposto o material filtrante (2, Figura 3) e um reservatório para coletar o sedimento já filtrado (3, Figura 3).

Quanto ao material filtrante, foram testadas combinações de quatro materiais encontrados

comercialmente na região e denominados como grossos e finos. O material grosso e subdividido em cascalho 1 (tamanho máximo de 1/2") e, cascalho 2 (tamanho máximo de 3/8") e os finos em areias grossa e fina. Cabe ressaltar que, esses materiais serão descritos com mais detalhes nos itens seguintes.

Inicialmente foram realizados testes de caracterização geotécnica dos materiais. Para o material fino foram: análise granulométrica (NBR-7181/84),

massa específica dos sólidos (NBR-6508/84), titulação de azul de metileno (PEJON, 1992) e difração de raios X (MOORE & REYNOLDS, 1989). Para o material grosso foram: análise granulométrica (NBR12141 MB3482), massa específica dos sólidos e massa específica aparente (NBR6458 MB29).

Na montagem dos filtros foram consideradas diversas combinações em volume, que poderiam ser empregadas nos testes preliminares. A Tabela 1 apresenta as combinações utilizadas:

Tabela 1 – Combinações de diferentes materiais para os ensaios de coluna de pequeno porte

Grupo	Combinação N°	Materiais			
		Cascalho 1 (1/2")	Cascalho 2 (3/8")	Areia grossa	Areia fina
		Proporções			
1	1	1	1	-	-
	2	1	2	-	-
	3	1	3	-	-
	4	1	4	-	-
	5	-	1	-	-
2	6	2	2	0,5	-
	7	2	2	1	-
	8	2	2	2	-
	9	2	2	3	-
	10	2	2	4	-
3	11	2	2	-	0,5
	12	2	2	-	1
	13	2	2	-	2
	14	2	2	-	3
	15	2	2	-	4

Os testes de colunas foram conduzidos em dois estágios. O primeiro estágio teve como objetivo eliminar os solutos dos materiais contidos no filtro, que poderiam interferir nos resultados de turbidez após filtragem dos sedimentos.

O abastecimento de água foi efetuado pelo princípio do sifão de Mariotte para permitir uma carga constante no reservatório onde se encontra o material filtrante. Foi necessária a percolação de água destilada para retirada dos solutos, evitando possíveis interferências nos resultados de

turbidez. Isto também permitiu que a coloração fosse visualmente mais perceptível ao aumentar o pH da água com a infiltração.

A eliminação dos sedimentos do material filtrante foi monitorada com leituras da turbidez e condutividade elétrica a cada 360 ml de material percolado. Após estabilização desses parâmetros procedeu-se ao segundo estágio com a percolação da água+sedimentos. A Figura 4 mostra o arranjo empregado no segundo estágio.

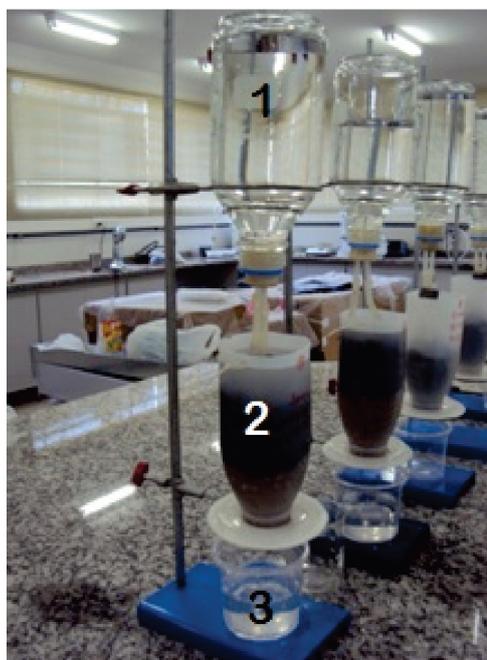


Figura 3 – Arranjo empregado para o primeiro estágio.



Figura 4 – Arranjo empregado para o segundo estágio.

Neste arranjo não foi incluído o sifão de Mariotte, pois não se contava com um sistema de dispersão da água+sedimentos. Sendo assim, a água+sedimentos foi agitada manualmente, antes de sua colocação na coluna. O preenchimento foi efetuado evitando-se turbulência e mantendo-se constante o nível da água+sedimentos (a 1 cm do topo da coluna).

A água+sedimentos filtrada foi coletada a cada 275 ml aproximadamente e, em cada amostra, foi realizada também uma medição de turbidez e condutividade elétrica. O procedimento foi realizado até observar-se variação mínima ou estabilização da turbidez.

Testes de laboratório em permeâmetros

Na montagem do permeâmetro foram introduzidos os materiais de maior para menor tamanho, isto é, com granulometria decrescente na direção do fluxo, de forma similar às colunas de percolação.

Quanto à compactação dos materiais, os materiais (finos e grossos) foram colocados em camadas e por compactação estática, porém a uniformização da densidade do material grosso foi realizada por meio de punção contínua, com auxílio de uma haste metálica.

Após montagem do permeâmetro foram conectados os reservatórios para alimentação dos fluidos percolantes, tal como mostrado na Figura 2. De forma semelhante às colunas de pequeno porte, os testes foram realizados inicialmente com água, com medições periódicas de condutividade hidráulica, elétrica e de turbidez. Isso foi realizado até todos os parâmetros atingirem um valor constante. Atingida a constância dos parâmetros, optou-se pela percolação da água+sedimentos. Para tornar isto possível foi trocada a água pela água+sedimentos no reservatório (5) (Figura 2), sem necessidade de interromper o fluxo contínuo.

Os parâmetros medidos foram os mesmos da etapa anterior, finalizando-o quando a condutividade hidráulica (k) apresentou uma variação mínima com o tempo, devido à colmatção progressiva do material filtrante.

Cabe ressaltar que, tanto na etapa de passagem da água como da água+sedimentos, os ensaios foram realizados com fluxo contínuo entre 09:00 h e 18:00 h. Para a finalização diária, as torneiras de fluido percolado eram fechadas para evitar a entrada de ar no meio poroso. Este procedimento permitiu simular, aproximadamente, a transitoriedade da precipitação.

RESULTADOS

Caracterização geotécnica, mineralógica e físico-química dos materiais

Na Tabela 2 são mostrados os resultados dos ensaios para caracterização dos materiais finos e grossos. Para estes solos, foram determinados os índices físicos, composição granulométrica e massas específicas reais e aparente. Adicionalmente, na Figura 5 são apresentadas as curvas granulométricas provenientes dos materiais. Cabe ressaltar que para o sedimento foram realizados dois ensaios de granulometria, com e sem a utilização de defloculante, com a finalidade de avaliar sua capacidade de estruturação.

Pela Figura 5 e Tabela 1, pode-se observar que o sedimento tem capacidade de aglutinamento

das partículas de menor tamanho, formando partículas maiores que alteram a classificação textural de predominantemente argiloso (ensaio com defloculante) para areia-siltosa (ensaio sem defloculante). Este fato permite que a textura do sedimento também tenha o comportamento de areia no momento da decantação.

Em relação à caracterização mineralógica, os registros dos difratogramas de Raios-X da fração argila indicam a presença de argilominerais do grupo da esmectita, apenas na amostra de areia fina, e do grupo da caulinita e de micas (ilita), em todos os materiais analisados. Além destes argilominerais, observou-se a presença de quartzo, que é comum neste tipo de finos. A heterogeneidade de argilominerais, tanto no sedimento como nas areias (fina e grossa), é frequente.

Tabela 2 – Características geotécnicas dos materiais utilizados para ensaios

Descrição	Und	Material grosso		Material fino			
		Cascalho 1/2"	Cascalho 3/8"	Sedimento c/defloculante	Sedimento s/defloculante	Areia fina	Areia grossa
Cascalho grosso	%	-	-	1,7	11,2	-	-
Cascalho fino	%	-	-	-	-	-	11,1
Areia Grossa	%	-	-	2,8	7,3	2,0	35,8
Areia Média	%	-	-	2,6	8,5	36,0	29,1
Areia Fina	%	-	-	8,0	33,0	59,6	16,3
Silte	%	-	-	28,0	40,0	1,4	4,7
Argila	%	-	-	57,0	-	1,0	3,0
Cu	-	-	-	-	-	2,5	7,8
Cc	-	-	-	-	-	0,7	1,0
ρ_s	g/cm ³	2,903	2,906	2,703	2,703	2,659	2,660
ρ_d	g/cm ³	1,570	1,510	-	-	1,430	1,320
e	-	0,85	0,92	-	-	0,86	1,02
n	-	0,46	0,48	-	-	0,46	0,50
Classificação Granulométrica		Pedrisco (*)	Cascalho grosso	Argila	Areia-siltosa	Areia fina	Areia grossa a média

Cu: Coeficiente de não uniformidade; Cc: coeficiente de curvatura; ρ_s : massa específica seca; ρ_d : massa específica aparente; e: índice de vazios; n: porosidade total. (*) Nomeação não técnica

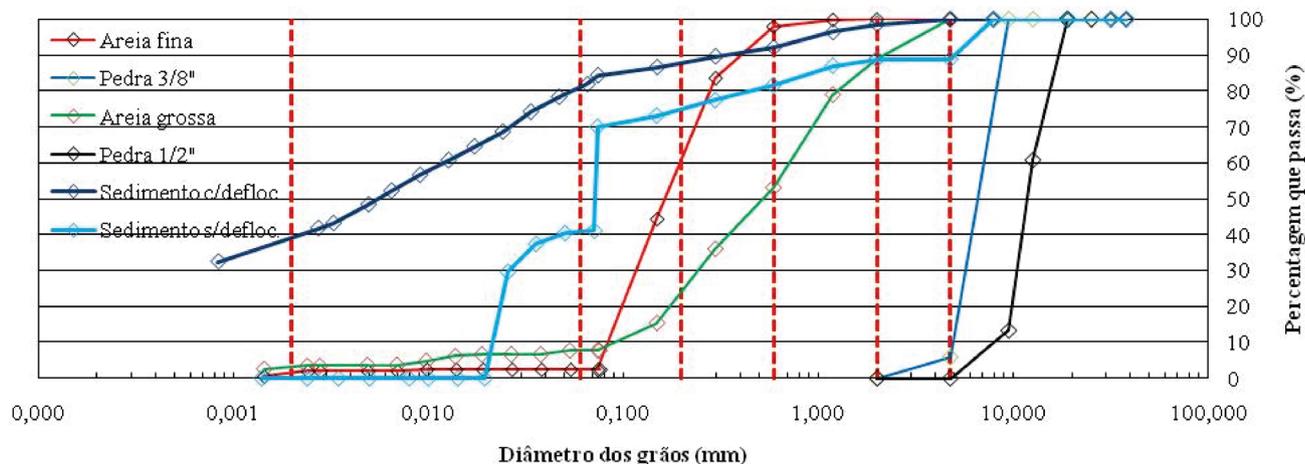


Figura 5 - Granulometria dos materiais utilizados nos ensaios.

Os testes físico-químicos nas areias, feitos com azul de metileno e papel de filtro, permitiram complementar a caracterização da fração argila. Observou-se que o sedimento e as areias (fina e grossa) apresentaram capacidades de troca de cátions da ordem de 10,89 cmol+/kg, 32,01 cmol+/kg e 30,18 cmol+/kg, respectivamente, indicando presença de argilominerais do grupo das micas nas partículas finas dos materiais.

Testes em colunas

Os testes foram conduzidos em três grupos de combinações: o primeiro, grupo 1, com combinações de N° 1 a N° 5, o grupo 2, de N° 6 a N° 10, e o grupo 3 com combinações de N° 11 a N° 15.

Os testes do grupo 1 tiveram por objetivo estabelecer, aproximadamente, qual a proporção que permitiria uma redução da velocidade de fluxo com menor turbidez. Considerou-se o emprego de apenas material graúdo, visto que, em hipótese, o fluxo em sentido horizontal nos permeâmetros (e no campo) facilitaria a decantação dos sedimentos durante seu percurso. Neste grupo de ensaios não foi possível medir a turbidez final, uma vez que esta sempre esteve acima do limite superior da escala de medição do aparelho empregado.

Os resultados dos testes do grupo 2 (combinações N° 6 a N° 10) estão ilustrados na Figura 6. As linhas apresentam as medidas de volume da água+sedimentos percolada versus turbidez para cada combinação de material fino e grosso.

Como se pode verificar na figura, para esta combinação de materiais existe uma tendência de redução de turbidez com o aumento do volume da água+sedimentos percolada. A turbidez inicial aumenta com a diminuição de volume de areia fina e finalmente, houve resultados anômalos quando realizados os ensaios da combinação N° 7 (C7 (Areia fina: pedra 3/8": pedra 1/2" = 1:2:2)), pois não guardou relação na diminuição da turbidez versus quantidade de areia quando comparado com as outras combinações.

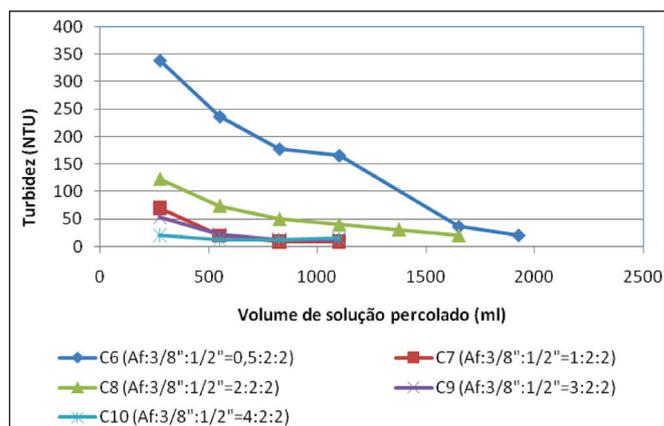


Figura 6 - Volume da água+sedimentos percolada versus turbidez (grupo 2).

Os resultados permitem orientar qual das proporções poderá ser empregada para os testes nas colunas de percolação. Sendo assim, optou-se pelo emprego da proporção 8 (Areia fina, pedra 3/8" e pedra 1/2", com proporção 2:2:2, respectivamente), uma vez que esta apresentou valor intermediário entre as opções analisadas, e poderia

fornecer valores aceitáveis de turbidez e condutividade hidráulica.

Os resultados dos testes do grupo 3 (combinações N° 11 a N° 15) estão ilustrados na Figura 7, onde se pode observar que a combinação de materiais utilizada geralmente apresenta tendência de redução de turbidez com o aumento do volume da água+sedimentos percolada; apenas na combinação N° 12 (C12 - Areia grossa: pedra 3/8": pedra 1/2" = 1:2:2) houve acréscimo da turbidez até um valor máximo de 48 NTU e, posteriormente, aparente estabilização; a turbidez inicial aumenta com o acréscimo de volume de areia grossa; existência de resultados anômalos quando realizados os ensaios da combinação N° 12 (C12 - Areia grossa: pedra 3/8": pedra 1/2" = 1:2:2).

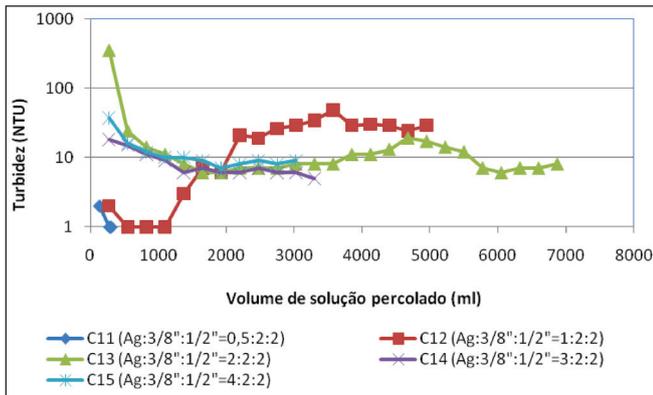


Figura 7 - Volume da água+sedimentos percolada *versus* turbidez (grupo 2).

Os resultados permitem observar que existe influência da granulometria e, principalmente, da porcentagem da fração argila da areia grossa. Comparando os resultados das figuras 6 e 7 verifica-se uma turbidez final mais elevada para todas as combinações em que foi utilizada a areia grossa, porém ainda inferiores ao valor máximo sugerido pela CETESB (2011).

Visando obter uma referência para comparação, utilizou-se a combinação N° 13 (C13 - Areia grossa: pedra 3/8": pedra 1/2" = 2:2:2), cujas proporções em volume são iguais às da combinação N° 8 (C8 - Areia fina: pedra 3/8": pedra 1/2" = 2:2:2). Ambas foram utilizadas nos testes com os permeômetros, cujos resultados são descritos no item a seguir.

Testes em permeômetros

Para o primeiro teste os permeômetros foram montados conforme combinação N° 1 (C1 - pedra 1/2": pedra 3/8" = 1:1) do grupo 1. Para esta combinação foram realizados dois ensaios com cargas hidráulicas de 0,5 m e 2,0 m. Como mencionado anteriormente, em primeiro lugar foi percolada apenas água, até obter-se redução e estabilização da turbidez e condutividade hidráulica. Em seguida, procedeu-se à percolação da água+sedimentos.

Ambos os ensaios mostraram que o material filtrante, embora disposto desta vez em posição horizontal, permitia a passagem da água sem diminuição considerável da velocidade de fluxo, apresentando condutividade hidráulica da ordem de 10^{-2} cm/s. O mesmo ocorreu com a passagem da água+sedimentos, não ocorrendo diminuição da turbidez e ficando fora da escala de medição.

Para o segundo teste, foram realizados ensaios com a combinação N° 8 do grupo 2. A Figura 8 mostra os resultados da condutividade hidráulica *versus* turbidez realizados em três dias, sendo este o tempo despendido na primeira etapa do ensaio para a passagem de água até a estabilização da condutividade hidráulica, elétrica e turbidez.

Cabe lembrar que a descontinuidade deve-se à execução interrompida do ensaio (entre 18:00h e 8:00h do dia seguinte). Do gráfico pode-se observar que ocorre redução da turbidez ao longo do tempo, devido à eliminação gradual dos sedimentos existentes nos materiais empregados como filtro. Complementarmente, o gráfico da Figura 9 mostra a variação da condutividade hidráulica com o tempo acumulado.

O gráfico mostra acréscimo da condutividade hidráulica até sua estabilização, quando se atingiu o regime permanente, com condutividade hidráulica de $3,5 \times 10^{-3}$ cm/s.

Na Figura 10, são mostrados os resultados de tempo acumulado *versus* turbidez e condutividade elétrica.

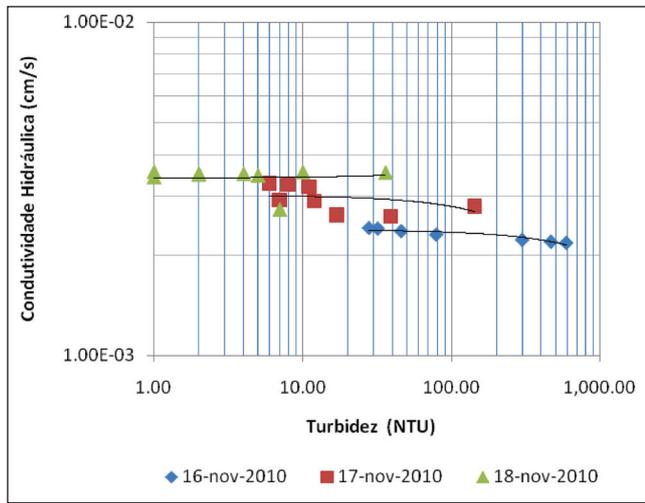


Figura 8 – Resultados de condutividade hidráulica *versus* turbidez quando o fluido empregado foi apenas água.

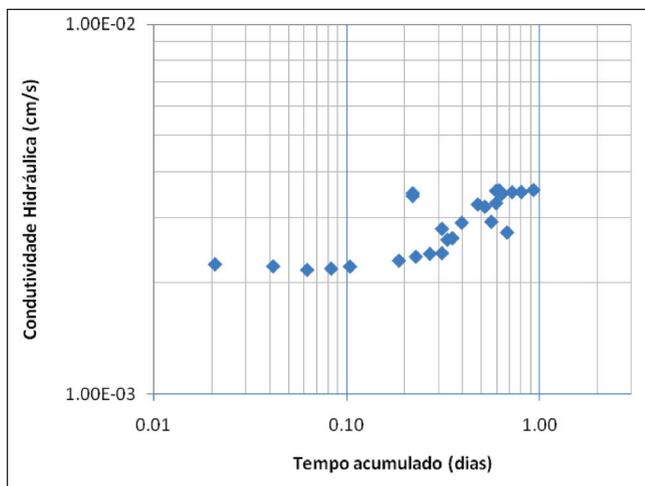


Figura 9 – Resultados de condutividade hidráulica *versus* tempo acumulado quando o fluido foi apenas água.

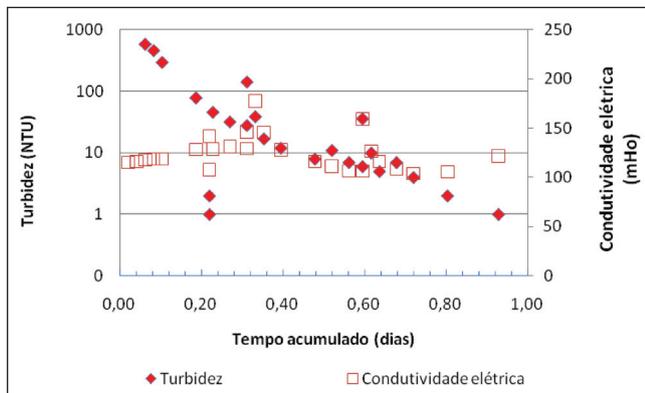


Figura 10 – Resultados de tempo acumulado *versus* turbidez e condutividade elétrica.

A Figura 10 mostra que, apesar de se tratar de areia com quantidade muito reduzida de finos, é possível a obtenção de elevados valores de

turbidez no início do ensaio. Porém, o período de um dia (tempo acumulado) é suficiente para reduzir a turbidez a valores mínimos (1 NTU). Isto se deve, provavelmente, ao fato de tratar-se de areia com tamanhos semelhantes de partículas (coeficiente de não uniformidade baixo e igual a 2,5), descontínua (coeficiente de curvatura menor que a unidade) e com pequena quantidade de argila (1%).

Na mesma figura se observa que a condutividade elétrica em geral ficou estável (valor médio de 10 mHo), apresentando apenas alguns picos que mostram alguma relação com a turbidez. Provavelmente, tais picos guardam relação com momentos de tamponamento e liberação de finos nos poros do material arenoso durante o fluxo.

Após atingir o regime permanente com água, procedeu-se à passagem da água+sedimentos pelo permeâmetro. A Figura 11 mostra os resultados da condutividade hidráulica no período do ensaio após passagem da água+sedimentos.

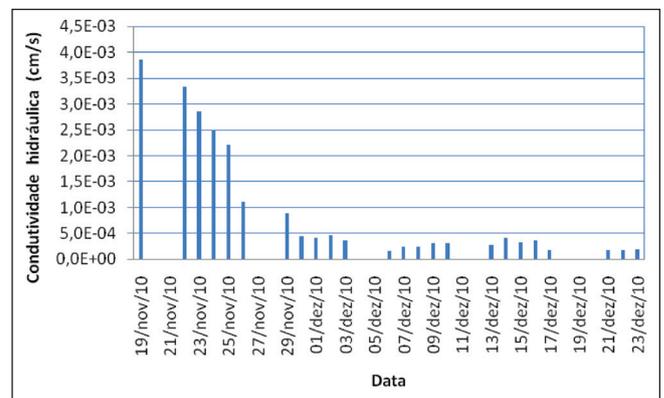


Figura 11 – Resultados de condutividade hidráulica, no período de ensaio, com o fluido água+sedimentos.

A Figura 11 mostra que houve redução da condutividade hidráulica (k) de forma gradual, seguindo uma lei de variação em função do tempo. Observa-se que no estágio final o comportamento tende a ser assintótico, com k atingindo aproximadamente $1,9 \times 10^{-4} \text{cm/s}$. No entanto, é previsível que o acúmulo de sedimentos no filtro provoque ainda uma redução gradual deste parâmetro ao longo do tempo.

A tendência dos dados experimentais pode ser ajustada por regressão para algum modelo existente na literatura especializada. Este ajuste pode ser realizado para os dados colhidos entre o primeiro e o décimo dia do tempo acumulado, visto que é a faixa em que ocorre a maior redução

de k . A título de exemplo foi realizado um ajuste com o modelo da equação (1), que permitiu um coeficiente de determinação (r^2) de 0,966.

$$k \text{ (cm/s)} = a + b \cdot (t_a)^{0,5} + c \cdot \ln(t_a) / t_a \quad (1)$$

Onde t_a representa o tempo acumulado em dias. Adicionalmente, os parâmetros de ajuste foram: $a = 3,257 \times 10^{-03}$, $b = -5,848 \times 10^{-04}$, $c = -5,349 \times 10^{-03}$.

O gráfico da Figura 12 mostra os dados experimentais e o ajuste de curva para a previsão da condutividade hidráulica (quando percolada a água+sedimentos) em função do tempo. Esta função pode estimar a redução que a condutividade hidráulica teria pela passagem da água+sedimentos ao longo de tempo. No entanto, cabe ressaltar que este tempo é acumulado por eventos que possam ser aproximados ao fluxo em regime permanente.

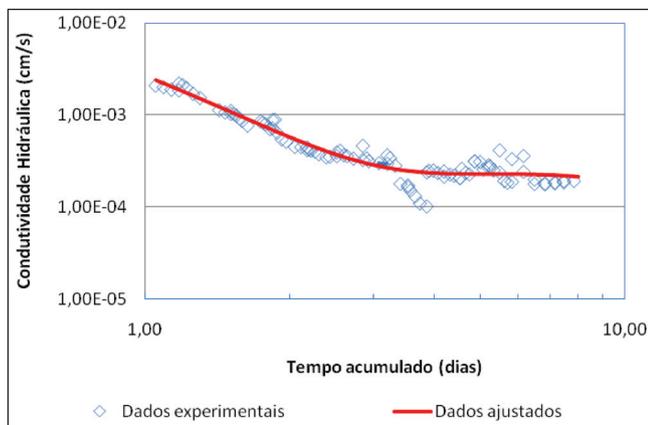


Figura 12 - Dados experimentais do tempo acumulado *versus* condutividade hidráulica (água+sedimentos) e ajuste de curva por regressão.

A Figura 13 mostra os resultados do tempo *versus* turbidez durante a percolação da água+sedimentos. Esses resultados indicam acréscimo da turbidez até a segunda semana de ensaio (tempo acumulado), atingindo valores máximos de 14 NTU; posteriormente ocorre redução significativa da turbidez, atingindo valores finais da ordem dos 2 NTU. Em todas as medições, a turbidez foi inferior ao máximo permitido pela CETESB (2011).

Adicionalmente, a Figura 14 mostra os resultados da condutividade elétrica para o período ensaiado. Pela figura observa-se que em geral ocorre

pequeno acréscimo da condutividade hidráulica ao longo do tempo, ao final variando entre 120 mHo e 140 mHo. O acréscimo da condutividade elétrica pode ser interpretado como o avanço da frente de infiltração da água contendo os sedimentos até atingir um valor máximo e tornando-se estável. Comparando-se os gráficos das Figuras 10 e 14 (passagem da água e água+sedimentos, respectivamente) verifica-se que as variações da condutividade elétrica não foram muito significativas, mostrando que os sedimentos não possuem um extrato de características elétricas diferentes daqueles do material de filtro.

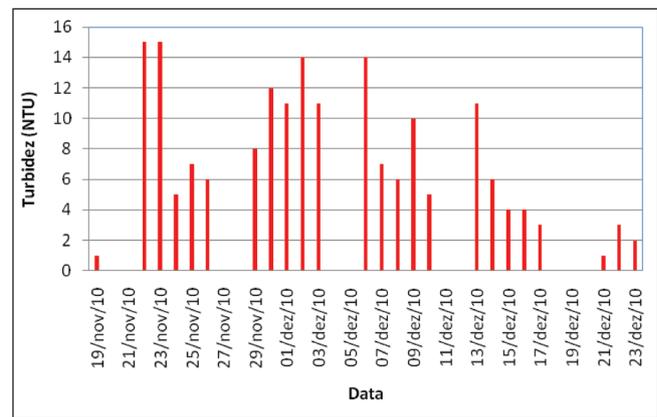


Figura 13 - Resultados de turbidez, no período de ensaio, com o fluido água+sedimentos.

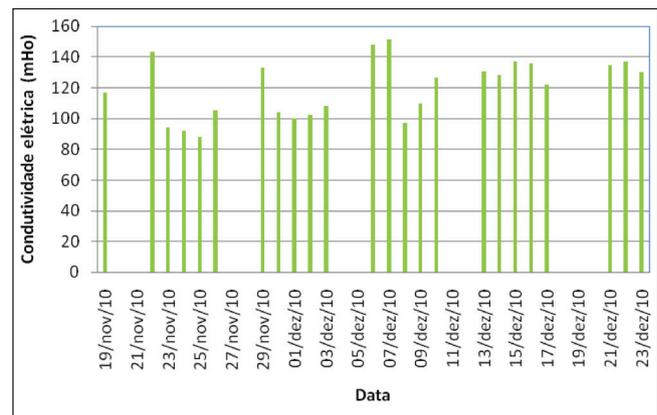


Figura 14 - Resultados de condutividade elétrica, no período de ensaio, com o fluido água+sedimentos.

Finalizados os ensaios procedeu-se à desmontagem dos permeâmetros e retirada do material de filtro. Após a desmontagem, o material contido no permeâmetro foi deixado secar ao ar para sua posterior pesagem. Os cálculos mostraram que os sedimentos retidos somaram 1,24 kg em peso seco.

Este resultado foi menor que o esperado e, apesar de se contar com bombas dispersoras, o material de maior diâmetro e densidade foi em parte retido nos reservatórios, percolando apenas pelo filtro o material de menor diâmetro e em suspensão.

Finalmente, para o terceiro teste foram realizados ensaios com a combinação N° 13 do grupo 3. Nesses ensaios foram aplicadas, em semelhança aos outros testes, cargas hidráulicas de 0,5 m e 2,0 m. A Figura 15 mostra os resultados do tempo acumulado *versus* a condutividade hidráulica, quando inicialmente foi percolado apenas água. Como pode ser observado, a condutividade hidráulica da água mostra um comportamento fora do padrão, com redução ao longo do tempo. Este comportamento ocorre indiferentemente da carga hidráulica aplicada, chegando a reduzir duas ordens de grandeza (de 10^{-3} para 10^{-5} cm/s) em quase 10 dias (tempo acumulado) de ensaio.

Outra particularidade foi a diferença de resultados de k para cargas hidráulicas diferentes inicialmente, resultando ao final valores de k similares (Figura 15). Este fenômeno provavelmente ocorre devido à carga hidráulica de 2,0 m, que submete os poros do filtro a uma maior pressão em relação à carga de 0,5 m, permitindo assim a liberação mais rápida de ar ocluso e, conseqüentemente, uma maior velocidade de fluxo no início do teste.

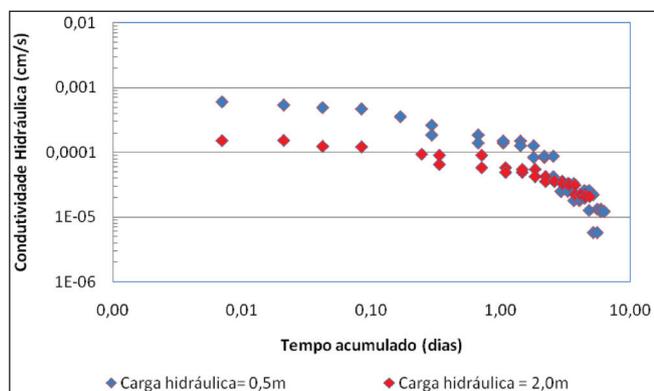


Figura 15 - Resultados de condutividade hidráulica *versus* tempo acumulado, quando o fluido foi apenas água.

A redução da condutividade no final do teste atingiu o valor de $1,2 \times 10^{-5}$ cm/s. Acredita-se que, este valor poderia ainda ser reduzido devido ao tamponamento gradual dos poros da areia

decorrente da mobilização dos finos, tanto do material graúdo como da areia.

Segundo as análises de granulometria e mineralogia, a areia grossa possui uma maior porcentagem de silte e argila e uma granulometria menos uniforme ($Cu=7,8$) ou bem graduada ($Cc=1,0$), o que permitiria uma acomodação das partículas propiciando que os poros maiores sejam ocupados pelas partículas menores; com isso ocorreria uma redução mais efetiva dos poros. Este comportamento não era desejável, pois a granulometria da areia propiciou a colmatação com a passagem da água, comprometendo o emprego do filtro para a etapa seguinte, que consistiria em percolar a água+sedimentos.

Na Figura 16 também são mostrados os resultados de tempo acumulado *versus* turbidez e condutividade elétrica, quando o filtro foi submetido a uma carga hidráulica de 0,5 m. Nesta figura observa-se comportamento contrário da areia fina em relação à turbidez, pois esta aumenta com o tempo.

A turbidez pode alcançar valores próximos aos 300 NTU. Embora não se tenha evidências, acredita-se que a infiltração da água poderia propiciar uma redução da turbidez com o tempo. Como já comentado anteriormente, este comportamento pode estar associado à menor uniformidade e boa graduação das partículas, fazendo com que o sedimento seja retido ao longo do seu percurso.

Por outro lado, a condutividade elétrica experimentou uma redução durante a infiltração e ao longo do tempo. É possível que este fato esteja relacionado com a dissolução dos solutos na água, sendo cada vez menor com o aumento do volume de água percolada.

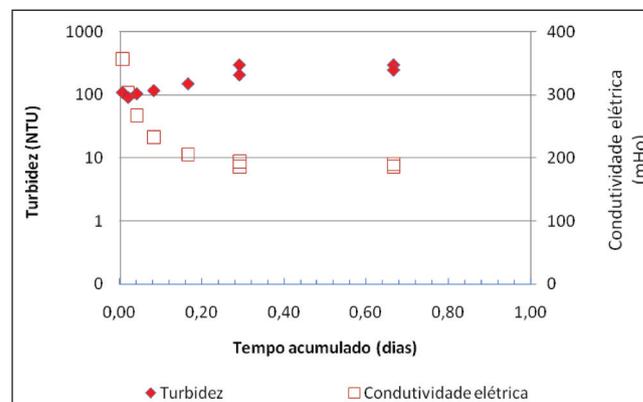


Figura 16 - Resultados de tempo acumulado *versus* turbidez e condutividade elétrica para ensaio com carga hidráulica de 0,5 m.

Na Figura 17 são mostrados os resultados de tempo acumulado *versus* turbidez e condutividade elétrica, quando o filtro foi submetido a uma carga hidráulica de 2,0 m. Nesta figura observa-se que o comportamento é similar ao da areia fina em relação à turbidez, pois esta diminui com o tempo. Apesar de se tratar de um material bem graduado e de uniformidade média, o filtro se encontra submetido a uma carga hidráulica maior (maior potencial gravitacional), permitindo, assim, um aumento da vazão e, conseqüentemente, do transporte de solutos em solução. No entanto, os valores mínimos de turbidez foram superiores aos permitidos pela CETESB (2011).

Por outro lado, a condutividade elétrica, de maneira semelhante ao que ocorreu no teste com carga hidráulica de 0,5 m, sofreu uma redução durante a infiltração e ao longo do tempo.

Por não apresentar comportamentos adequados de permeabilidade e de turbidez, estes ensaios não foram continuados com a percolação da água+sedimentos.

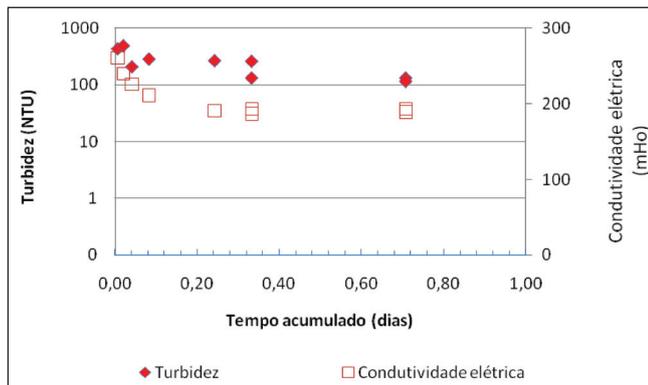


Figura 17 - Resultados de tempo acumulado *versus* turbidez e condutividade elétrica, para ensaio com carga hidráulica de 2,0 m.

CONCLUSÕES

Este estudo forneceu os dados necessários para orientar o dimensionamento e a composição de um filtro em barragem de enrocamento a ser instalada em uma área de lavra de mineração. Os resultados obtidos conduzem às conclusões a seguir apresentadas.

- O emprego de filtros para sedimentos com fluxo horizontal foi satisfatório. A inclusão de areia fina permitiu resultados satisfatórios de turbidez e condutividade hidráulica após

percolação da água+sedimentos, devido a suas características, tais como: uniformidade de suas partículas, escassa porcentagem de finos e mineralogia. Este fato foi possível também devido ao sedimento permitir uma decantação relativamente rápida devido a sua estruturação.

- No presente estudo, apenas a composição 1:1:1 (pedra 1/2": pedra 3/8": areia fina) foi satisfatória para utilização como filtro, pois permitiu resultados de turbidez menores que 14 NTU e condutividade hidráulica de até $1,9 \times 10^{-4}$ cm/s ao longo do período ensaiado (aproximadamente 1 mês). Uma lei de variação foi obtida, mostrando elevada aderência aos dados experimentais. Isto resulta em um expediente útil para cálculos da redução da condutividade hidráulica com o tempo devido à colmatação e, conseqüentemente, para estimativa da vida útil do filtro. Contudo, deve-se considerar que extrapolações deverão ser analisadas com cautela.

REFERÊNCIAS

ABNT (1984). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Designação NBR 7181/84. Solo: Análise Granulométrica.

ABNT (1984). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Designação NBR 6508/84. Solo: Massa Específica Real dos Grãos.

ABNT (1991). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Designação NBR 12141/82. Material filtrante - Pedregulho - Determinação da composição granulométrica.

ABNT (1988). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Designação NBR 6458/88. Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.

AMPLA (2011). Projetos e Serviços em Meio Ambiente. Anteprojeto de construção de barragem filtrante de sedimentos. Comunicação pessoal.

CETESB (2011). Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Comunicação pessoal em reunião do mês 12/2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (1986). Resolução n. 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental RIMA. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 fev. 1986.

MOORE, D. M. & REYNOLDS JR., R. C. (1989). X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, 332p.

PEJON, O. J. (1992). "Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba (SP): Estudos de Aspectos Metodológicos de Caracterização e Apresentação de Atributos. Tese de Doutorado. EESC - USP. São Carlos, 224p.

MORENO, M. M. T. (2011). Sustentabilidade da Mineração no Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes, São Paulo-Brasil. Cerâmica Industrial (Impresso), v. 16(3), p. 35-42.