

CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE BARREIRAS DE PROTEÇÃO PRODUZIDAS COM SOLO ARENOSO ESTABILIZADO QUIMICAMENTE

RETENTION CAPABILITY IN LINERS PRODUCED WITH SANDY SOIL CHEMICALLY STABILIZED

RODRIGO PELHO RIZZO

Mestre em Engenharia Civil – FEIS / UNESP

JOSÉ AUGUSTO DE LOLLO

Professor Adjunto – FEIS / UNESP

Recebido: 10/11/05 Recebido: 26/07/06

RESUMO

O artigo avalia a capacidade de retenção de barreiras de proteção ambiental de misturas de solo-cimento (7% em massa) e solo cal (8% em massa) para substâncias de origem orgânica (chorume e água residuária) e inorgânica (soluções ricas em K⁺, Na⁺ e Cl⁻ - com concentrações de 100ppm). Os ensaios foram conduzidos com dois tipos de corpos de prova: 5cm de altura por 5cm de diâmetro (miniatura) e 25cm de altura por 7cm de diâmetro (coluna). Os resultados mostram valores de retenção muito bons para as substâncias de origem orgânica e valores promissores para as soluções inorgânicas.

PALAVRAS-CHAVE: Barreiras de proteção, capacidade de retenção, solo-cal, solo-cimento, estabilização de solos.

ABSTRACT

In this article we describe retention capability of barriers produced with soil-cement (7% in weight) and soil-lime (8% in weight) subjected to organic (leachate and wastewater) and inorganic solutions (K⁺, Na⁺ e Cl⁻ solutions with 100ppm concentrations) leaching. Laboratory tests were conducted with two specimen types: miniature specimens with 5cm high and diameter, and column (25cm high and 7cm diameter). Obtained results show good retention for organic solutions and promising retention for inorganic solutions.

KEYWORDS: Protection barriers, retention capability, soil-whitewash, soil-cement, stabilization.

INTRODUÇÃO

O termo barreira de proteção é utilizado para designar camadas de baixa permeabilidade, constituídas de materiais naturais, artificiais ou da combinação de ambos, e que têm como objetivo proteger o meio vizinho da percolação de fluidos, sendo utilizados em diversos tipos de obras como canais, reservatórios, diques, lagoas de rejeito, lagoas de tratamento de resíduos e aterros sanitários (Leite, 1997).

Segundo Leite (2000), a escolha do tipo da barreira a ser utilizada depende: do uso a que se destina; do ambiente físico no qual o sistema será inserido; do material a ser utilizado como matéria-prima para sua construção; e das características do projeto (taxa de infiltração de fluidos e vida útil da obra).

Boff (1998) afirma que diversos autores indicam que para atender ao uso como barreira de proteção o material deve apresentar como propriedades básicas valores de condutividade hidráulica inferiores a 10⁻⁹m/s e eficiência

na retenção das substâncias potencialmente contaminantes de interesse.

A presença de substâncias nocivas no solo é uma consequência dos processos físico-químicos de interação solo-contaminante originados do transporte destes compostos através dos vazios dos solos, em função de gradientes hidráulicos no solo, podendo atingir a zona saturada do solo e comprometer a qualidade dos mananciais subterrâneos.

Os processos físicos são aqueles responsáveis pela movimentação dos compostos pelos poros do solo, especialmente a advecção e a dispersão. A advecção pode ser descrita como o movimento de translação na direção do fluxo da água subterrânea, no qual o soluto se move por estar ligado à água circulante no meio (Leite, 1996).

Na dispersão considera-se que a substância toma direções diferentes daquela do fluxo principal, espalhando-se, misturando-se e ocupando um volume de solução maior que aquele que ocuparia caso ocorresse apenas o processo de advecção (Delgado, 2002). Tais processos são ilustrados na Figura 1.

Os processos químicos envolvidos na migração de substância no solo descrevem a interação existente entre o contaminante e o solo, englobando a sorção, a complexação e a precipitação (Young et al, 1992).

Sorção é o termo que descreve os processos nos quais os solutos (íons, moléculas e compostos) são repartidos entre a fase líquida e a interface da partícula do solo. A complexação ocorre quando um cátion metálico reage com um ânion que funciona como ligante inorgânico. Os íons metálicos que podem ser complexados por ligantes inorgânicos incluem metais de transição e metais alcalinos terrosos.

A precipitação ocorre quando a transferência de soluto da fase aquosa para a interface resulta na acumulação de uma nova substância, na forma de uma nova fase sólida solúvel, e ocorre em dois estágios: nucleação e crescimento de partícula.

Independentemente dos processos envolvidos, o mecanismo de retenção de substâncias no solo dependerá muito

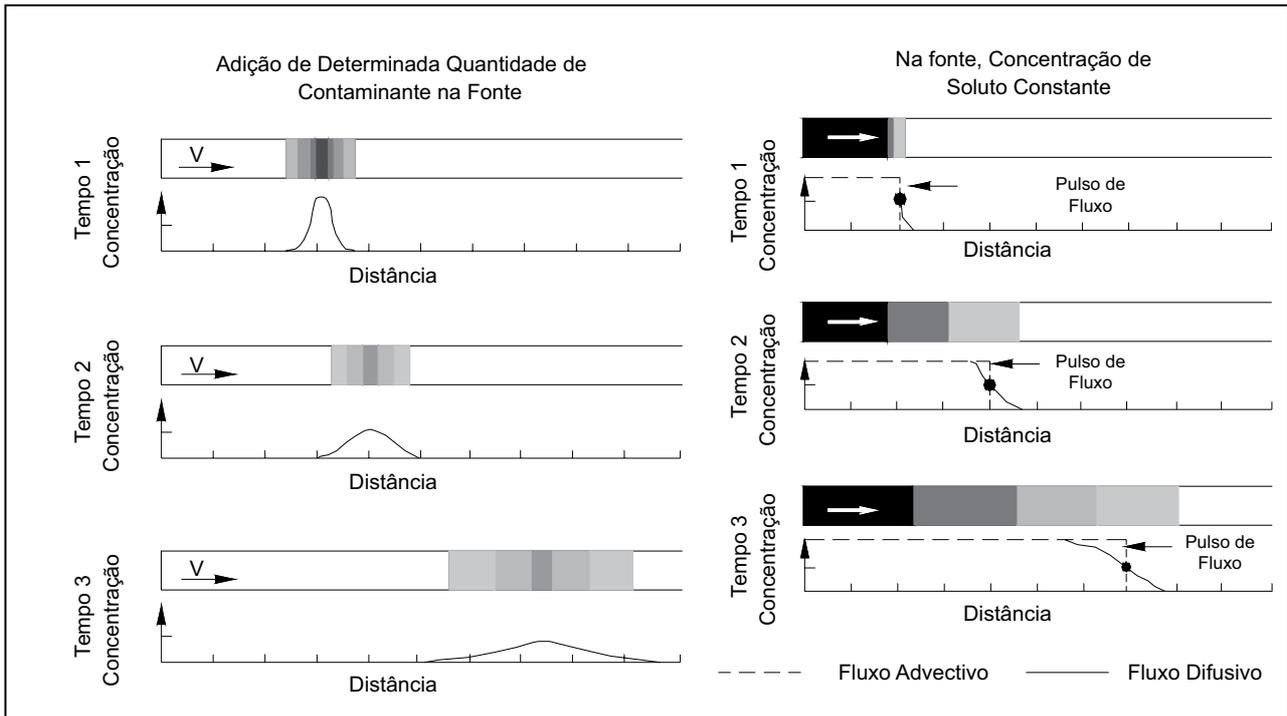


Figura 1 - Representação do transporte de contaminante por dispersão (Delgado, 2002)

das condições físico-químicas do mesmo. A condutividade hidráulica tem um papel fundamental no processo, pois quanto mais veloz o fluxo, menor a possibilidade de retenção de materiais no solo.

As características químicas do solo (especialmente de sua fração fina) também têm grande influência no processo, uma vez que as partículas presentes na fração argila do solo podem exercer atração em íons circulantes nos poros e promover sua fixação.

A maioria dos solos desenvolvidos em ambiente tropical, dada sua intensa lixiviação, apresenta uma composição química pobre em argilominerais capazes de promover a fixação de íons. Nessas condições, uma das alternativas possíveis de aproveitamento dos solos mais maduros e com textura mais grossa (arenosa) é a adição de compostos que proporcionem condições mais apropriadas de retenção.

Os processos de estabilização de solos são adotados como forma de melhorar as propriedades de um solo ou para lhe conferir um conjunto de propriedades de interesse para certa finalidade. Normalmente, os processos de estabilização visam melhorar a resistência mecânica do solo e reduzir sua permeabilidade.

Os tipos de estabilização mais comuns são a mecânica (na qual a

mistura de um ou mais materiais, antes da compactação, tem por objetivo aumentar a resistência mecânica) e a estabilização química (na qual se adiciona ao solo uma substância que aumenta a sua coesão ou que reduza sua permeabilidade).

Dentre os tipos de estabilização com aglomerantes (ou química) as mais comuns são a estabilização com cal e com cimento (objetos de estudo do presente trabalho) e o principal benefício esperado de tal processo é a redução da condutividade hidráulica, com o menor consumo possível de estabilizante.

Considerando o quadro acima descrito, foi proposto o presente trabalho, o que tinha por objetivos avaliar o potencial de uso de barreiras selantes produzidas com solo arenoso estabilizado, considerando sua eficácia, em termos de condutividade hidráulica e de capacidade de retenção de íons apropriadas a seu uso.

METODOLOGIA

Caracterização do solo utilizado

Para conhecer e descrever as propriedades físicas e químicas básicas do solo estudado, foram realizados ensaios de caracterização com amostras indeformadas e amolgadas com vistas a

definir sua composição, textura, índices físicos e condições de compactação. Os valores dos índices físicos e dos limites de consistência obtidos nos ensaios de caracterização do solo são apresentados no Tabela 1.

A distribuição granulométrica obtida para o solo em estudo mostrou uma granulometria composta por 72% de areia, 10% de silte e 8% de argila.

Segundo Alcântara & Lollo (1999), a composição mineralógica principal do solo usado pode ser assim descrita: cerca de 70% de quartzo, representando predominantemente a fração areia, e 14% de hematita, 10% de gibbsita, e 5% de caulinita, na fração argila.

Os resultados obtidos indicam um solo poroso, com textura arenosa, baixa plasticidade e baixa atividades da fração argila (composição química estável e madura).

Para determinação dos teores de estabilizante (cal e cimento) mais apropriados testados, Ribeiro (2002) e Rizzo (2004) consideraram primeiramente os benefícios advindos da compactação, considerando o efeito da energia de compactação aplicada. Para tanto foram testadas as energias proctor normal (mais comum em trabalhos de campo) e proctor modificada (maior energia de compactação) com o solo usado (Tabela 2).

Os resultados mostraram que o benefício de ganho de ρ_{dmax} não é significativo a ponto de compensar os aspectos negativos envolvidos na adoção da energia modificada que são o maior custo e a dificuldade de controle da compactação no campo. Além disso, observações feitas nos corpos de prova depois de moldados mostraram o surgimento de fissuras nos corpos de prova o que compromete um dos principais objetivos da compactação de barreiras, que é a redução da condutividade hidráulica.

Para a análise do teor mais apropriado a ser aplicado para os dois estabilizantes considerados, Ribeiro (2002) testou diferentes teores (3, 7 e 10% de cimento e 4, 8 e 12% de cal em massa) para avaliar o efeito do teor nos parâmetros de compactação. Os resultados de tais ensaios são apresentados na Tabela 3.

Os resultados obtidos mostraram uma tendência de elevação da massa específica aparente seca com o aumento do teor de cimento para as misturas solo-cimento sem alterações significativas na umidade ótima, enquanto para as misturas solo-cal o aumento do teor de cal na mistura reduz a massa específica aparente seca e aumenta a umidade ótima.

Ensaio de permeabilidade

Para testar a condutividade hidráulica das misturas a fim de se obter o teor ótimo de estabilizante, foram realizados ensaios de permeabilidade à carga variável. Os corpos de prova utilizados nestes ensaios foram compactados na energia proctor normal, no cilindro padronizado de ensaio, proporcionando corpos com 10cm de diâmetro e 12,5cm de altura, com 3%, 7% e 10% em massa de cimento e de 4%, 8% e 12% de cal em massa.

Visando reproduzir condições de ensaio próximas das de campo, ao mesmo tempo em que se tentava uma redução eficiente de índice de vazios, optou-se por garantir um grau de compactação mínimo de 95% nas amostras compactadas.

Com o objetivo de avaliar a possibilidade de destruição dos vínculos de estabilização com o contato das misturas com os fluidos com o passar do tempo, os corpos de prova foram ensaiados após diferentes tempos de exposição (após 120, 180, 240, 360, 540 e 720 dias). Os resultados obtidos são ilustrados na Tabela 4.

Tais ensaios mostraram que a adição de estabilizantes reduz a condutividade hidráulica do solo compactado

de modo a atender valores compatíveis de uso do material como barreira de proteção ambiental e que os teores na faixa de 7% de cimento e 8% de cal em massa são os mais apropriados, pois resultam na redução necessária na condutividade hidráulica (valores da ordem de 10^{-9} m/s ou menores) com menor consumo de material.

A fim de se avaliar o efeito do fluido de percolação sobre a estabilidade das misturas compactadas, foram conduzidos os ensaios de permeabilidade com área plena, considerando três diferentes situações: corpos de prova sujeitos à percolação de água destilada, esgoto afluyente de lagoa (para avaliar as condições de percolação no trecho inicial da lagoa) e esgoto efluente da lagoa (condições de percolação no trecho final).

Para estes ensaios foram adotados os teores de 7% de cimento e 8% de cal em massa, já que os resultados anteriores mostravam que com esses teores se obtinha boa redução da condutividade hidráulica com o menor consumo possível de estabilizante. Também nesse caso, o grau de compactação mínimo dos corpos de prova foi de 95%.

Estes ensaios apresentaram valores de condutividade hidráulica da mesma ordem que aqueles obtidos nos ensaios

Tabela 1 - Índices físicos e limites de consistência do solo utilizado

ρ (g/cm ³)	W (%)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	e	Sr (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1,69	12,98	1,50	2,72	0,81	43,58	26	17	9

ρ : massa específica do solo w: teor de umidade ρ_d : massa específica aparente seca
 ρ_s : massa específica dos sólidos e: índice de vazios LP: limite de plasticidade
 LL: limite de liquidez Sr: grau de saturação IP: índice de plasticidade

Tabela 2- Parâmetros de compactação do solo utilizado

Ensaio Proctor Normal		Ensaio Proctor Modificado	
W _{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	W _{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
12,5	1,89	10,5	2,07

Tabela 3- Resultados dos ensaios de compactação para os teores de cal e cimento testados

Solo-cimento			Solo-cal		
Teor	W _{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	Teor	W _{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
3%	12,7	1,91	4%	14,1	1,85
7%	12,5	1,92	8%	13,9	1,83
10%	12,6	1,93	12%	14,5	1,82

Fonte: Ribeiro (2002).

Tabela 4- Resultados dos ensaios de permeabilidade a carga variável

Tempo (dias)	% Cimento	k(m/s)	% Cal	k(m/s)
120	3% cimento	$3,94 \cdot 10^{-9}$	4% cal	$4,25 \cdot 10^{-9}$
120	7% cimento	$4,22 \cdot 10^{-10}$	8% cal	$7,77 \cdot 10^{-9}$
120	10% cimento	$2,35 \cdot 10^{-9}$	12% cal	$1,16 \cdot 10^{-9}$
180	3% cimento	$2,00 \cdot 10^{-9}$	4% cal	$2,92 \cdot 10^{-9}$
180	7% cimento	$2,97 \cdot 10^{-10}$	8% cal	$3,78 \cdot 10^{-10}$
180	10% cimento	$8,63 \cdot 10^{-10}$	12% cal	$3,67 \cdot 10^{-10}$
240	3% cimento	$7,42 \cdot 10^{-10}$	4% cal	$3,12 \cdot 10^{-9}$
240	7% cimento	$4,37 \cdot 10^{-10}$	8% cal	$4,15 \cdot 10^{-10}$
240	10% cimento	$2,18 \cdot 10^{-10}$	12% cal	$3,39 \cdot 10^{-10}$
360	3% cimento	$2,62 \cdot 10^{-9}$	4% cal	$5,25 \cdot 10^{-9}$
360	7% cimento	$2,80 \cdot 10^{-10}$	8% cal	$2,79 \cdot 10^{-10}$
360	10% cimento	$2,22 \cdot 10^{-10}$	12% cal	$5,96 \cdot 10^{-10}$
540	3% cimento	$1,34 \cdot 10^{-9}$	4% cal	$4,54 \cdot 10^{-9}$
540	7% cimento	$2,93 \cdot 10^{-10}$	8% cal	$3,51 \cdot 10^{-10}$
540	10% cimento	$2,30 \cdot 10^{-10}$	12% cal	$5,89 \cdot 10^{-10}$
720	3% cimento	$1,99 \cdot 10^{-9}$	4% cal	$4,20 \cdot 10^{-9}$
720	7% cimento	$3,54 \cdot 10^{-10}$	8% cal	$2,55 \cdot 10^{-9}$
720	10% cimento	$4,72 \cdot 10^{-10}$	12% cal	$1,29 \cdot 10^{-9}$

à carga variável (na ordem de 10^{-10} m/s) quando submetidos à percolação de água destilada.

Nos corpos de prova submetidos à percolação de esgoto (afluente e efluente da lagoa) os resultados mostraram uma redução nos valores de condutividade (atingindo valores da ordem de 10^{-12} m/s) provavelmente devido a colmatação de vazios do material.

Ensaio de retenção em área plana

O uso de corpos de prova miniatura representa uma nova possibilidade de avaliação do comportamento destas misturas, possibilitando maior agilidade e menores custos no processo. A compactação dos corpos de prova miniatura foi feita com a energia do ensaio proctor normal, em 2 (duas) camadas de 2,5cm cada, com 7% de cimento para os corpos de prova solo-cimento e 8% de cal em massa para os corpos de prova solo-cal, considerando os resultados dos ensaios à carga variável que indicaram serem estes os teores mais apropriados, garantindo um grau de compactação mínimo de 95%. A Figura 2 mostra o ensaio em área plana montado.

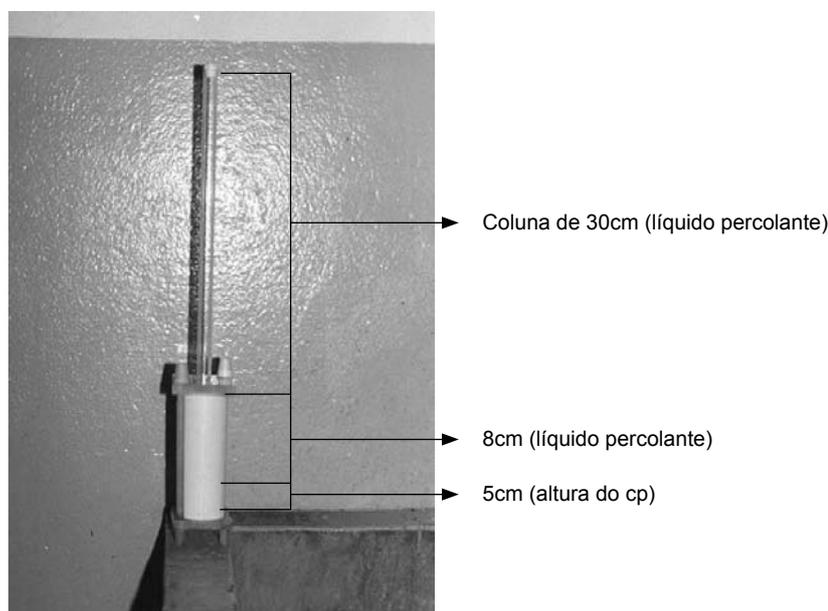


Figura 2 - Ensaio de retenção em área plana

Ensaio de retenção em colunas

O ensaio em coluna é um método tradicional utilizado para se avaliar a capacidade de retenção de substâncias. Por este motivo, o mesmo serviu como indicativo da eficiência ou não dos

corpos de prova miniatura na avaliação da capacidade de retenção das misturas utilizadas.

Os corpos de prova para os ensaios em colunas foram obtidos por compactação estática, compactados no interior de tubos de PVC de 34,5cm de altura por 7,0cm de diâmetro, em 10 (dez)

camadas de 2,5cm cada, apresentando, portanto, as seguintes dimensões: 25,0cm de altura e 7,0cm de diâmetro. Os corpos de prova moldados em formato miniatura apresentavam 5,0cm de altura e 5,0cm de diâmetro

O controle de compactação dos corpos de prova foi o grau de compactação, o qual se situou acima dos 95%, atendendo, portanto, o mínimo exigido para o fim a que se pretende, tendo-se como base a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação proctor normal para as misturas em uso. A Figura 3 mostra o ensaio em coluna montado.

Simulação das condições de uso das barreiras

Essa etapa compreendeu a percolação dos corpos de prova pelos fluidos, visando caracterizar a capacidade de retenção, por períodos de tempo de 60, 120 e 240 dias, de forma a avaliar a influência da passagem do fluido no comportamento hidráulico dos compostos nas colunas de percolação e nas amostras miniatura.

Os fluidos utilizados para tal finalidade foram chorume, água residuária, solução de KCl (100mg/l) e solução de NaCl (100mg/l). O uso do chorume e da água residuária se justifica já que a finalidade pretendida para estas bar-

reiras de proteção é o revestimento de fundo de lagoas de estabilização e base de aterros sanitários.

A avaliação da capacidade de retenção para o chorume e a água residuária se deu por meio da determinação da carga orgânica em termos de DQO, em mg/l. A capacidade de retenção dos íons foi medida em ensaios químicos realizados visando avaliar a concentração dos compostos de interesse.

Ensaio químicos

Em função da baixa condutividade hidráulica apresentada pelos corpos prova não se estabeleceu um fluxo constante no período dos ensaios, não havendo solução percolante para determinação das concentrações de soluções passantes pelos mesmos. Isso provavelmente se deveu aos baixos gradientes hidráulicos aplicados, uma vez que se tentou trabalhar com gradientes hidráulicos coerentes com as condições de utilização prática das barreiras (no máximo cinco vezes a altura da barreira) e tais gradientes não foram suficientes para promover a percolação das soluções.

Na tentativa de se avaliar o efeito da retenção de íons pelos corpos de prova, foram realizados ensaios químicos com os corpos de prova submetidos à percolação de NaCl e KCl. Para isso,

estes corpos de prova miniatura, após cumprirem os tempos de exposição previstos de 60, 120 e 240 dias, foram desmontados e divididos em três partes (topo, meio e base).

Nas colunas, depois desmontadas observou-se que a percolação pelas mesmas tinha se dado até ao nível de mais ou menos 0,5 cm abaixo do topo, o que pode ser explicado pela baixa condutividade hidráulica apresentada pelas misturas e pelo baixo gradiente hidráulico aplicado.

Por este motivo separou-se apenas uma amostra do topo (3cm de espessura) e uma outra da base (3cm de espessura) das colunas sujeitas à percolação de NaCl e KCl, para que fossem submetidas a ensaios químicos. A desmontagem das colunas se deu depois de decorridos 285 dias de exposição.

Com o objetivo de se conseguir fazer passar as soluções pelos corpos de prova miniatura, resolveu-se, então, acrescentar novos ensaios ao esquema experimental já utilizado. Para tanto foram moldados novos corpos de prova, os quais foram submetidos a gradientes bastante elevados (até cem vezes sua altura) resultando pressões de percolação da ordem de 70 a 80kPa, como é comum na literatura do assunto. O novo esquema utilizado é apresentado na Figura 4.

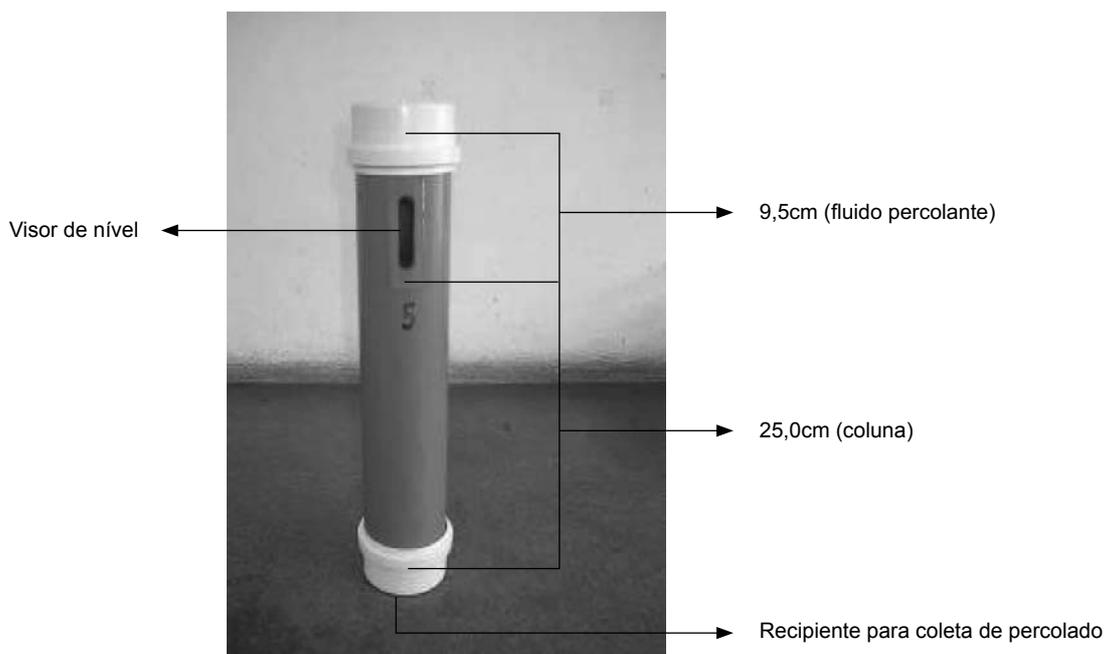


Figura 3 - Ensaio de retenção em coluna

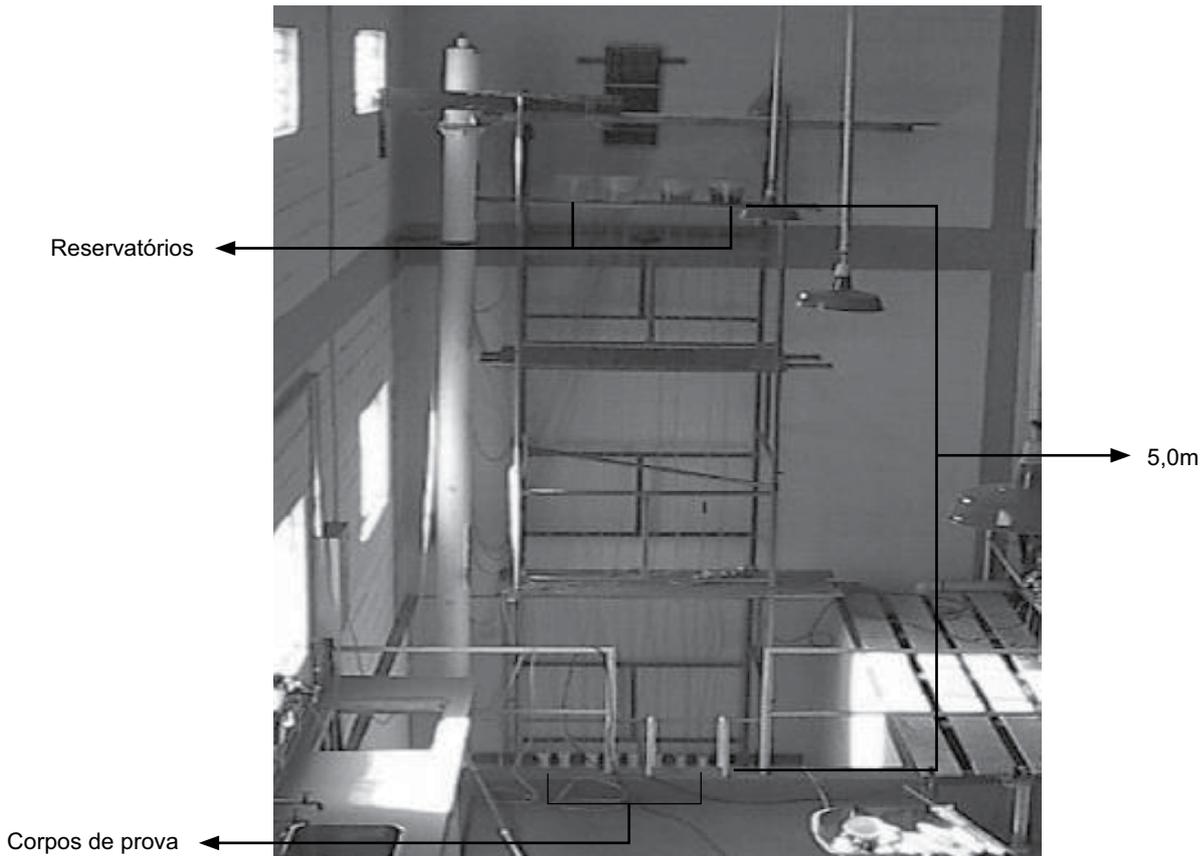


Figura 4 - Novo esquema experimental utilizado

RESULTADOS

Ensaio químicos com os corpos de prova miniatura e colunas

As Tabelas 5 (mistura solo-cimento) e 6 (mistura solo-cal) mostram os resultados obtidos nos ensaios químicos realizados nos corpos de prova miniatura submetidos à percolação de KCl e NaCl. Foram também realizados ensaios químicos com o cimento e com a cal utilizados. Tais ensaios mostraram os seguintes resultados: mistura solo-cimento - 123,24ppm de K^+ , 0,00ppm de Na^+ e 46,15ppm de Cl^- ; mistura solo-cal - 14,82 ppm de K^+ , 0,00 ppm de Na^+ e 88,75 ppm de Cl^- .

Os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6 mostram que há uma tendência de aumento de concentração de K^+ do topo para a base, sendo que nas misturas solo-cal, independentemente do tempo, há uma redução de concentração no meio dos corpos de prova, indicando processo de lixiviação. Para as misturas solo-cimento há uma tendência, no tempo entre 60 e 120

dias, de aumento de concentrações no meio e na base e uma redução destas concentrações para o tempo de 240 dias. Para a mistura solo-cal as variações de concentração no topo e no meio são pouco significativas, havendo uma tendência de aumento destas na base dos corpos de prova com o passar do tempo.

Para o íon Na^+ se observa valores próximos de concentração entre as misturas solo-cimento e solo-cal, indicando similaridade entre mecanismo e taxa de retenção. Há uma tendência de redução de concentração do topo para a base, chegando a valores próximos ou iguais à zero na base, indicando efeito de retenção.

As menores variações de concentração do íon Cl^- , do topo para a base dos corpos de prova, podem ser explicadas por se tratar de um íon com menor coeficiente de difusão. Tal efeito de retenção se manifesta de forma mais pronunciada com o passar do tempo, o que indica processo de retenção mais importante em soluções mais saturadas.

A Tabela 7 mostra os resultados dos ensaios químicos realizados nas

colunas. Neste caso, o tempo de percolação é o mesmo (duzentos e oitenta e cinco dias) para todas as colunas.

Os resultados mostram aumento nas concentrações de K^+ topo para a base na mistura solo-cimento e redução na mistura solo-cal, sugerindo efeito de lixiviação na mistura solo-cimento e de retenção na mistura solo-cal.

Para o íon Na^+ se verifica redução de concentração do topo para a base, chegando a valores próximos ou iguais à zero na base, com clara tendência de retenção.

Para o Cl^- , se observa uma tendência de redução do topo para a base na mistura solo-cal, evidenciando capacidade de retenção, o que não acontece na mistura solo-cimento, onde a concentração na base é maior que no topo, indicando um efeito de lixiviação.

Ensaio químicos – novo esquema experimental

Decorridos cerca de quinze dias da montagem dos ensaios referentes ao novo esquema experimental, foi possível recolher amostras de NaCl

Tabela 5 - Ensaio químicos das misturas solo-cimento submetidas à percolação em área plena

Estabilizante	Fluido	Extremidade	Período (dias)	Concentração de Íons (ppm)		
				K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻
Cimento	KCl	Topo	60	34,24	1,13	35,50
Cimento	KCl	Meio	60	46,73	0,21	35,50
Cimento	KCl	Base	60	135,16	0,39	35,50
Cimento	KCl	Topo	120	37,10	0,03	14,20
Cimento	KCl	Meio	120	85,31	0,39	10,65
Cimento	KCl	Base	120	188,95	0,21	28,40
Cimento	KCl	Topo	240	39,00	0,00	67,45
Cimento	KCl	Meio	240	28,47	0,00	42,60
Cimento	KCl	Base	240	77,22	0,00	39,05
Cimento	NaCl	Topo	60	33,12	1,32	26,63
Cimento	NaCl	Meio	60	82,22	0,57	35,50
Cimento	NaCl	Base	60	150,57	0,21	8,88
Cimento	NaCl	Topo	120	27,66	2,28	21,30
Cimento	NaCl	Meio	120	43,65	0,21	21,30
Cimento	NaCl	Base	120	166,69	0,03	14,20
Cimento	NaCl	Topo	240	20,28	3,91	28,40
Cimento	NaCl	Meio	240	35,49	0,46	35,50
Cimento	NaCl	Base	240	103,35	0,00	28,40

Tabela 6 - químicos das misturas solo-cal submetidas à percolação em área plena

Estabilizante	Fluido	Extremidade	Período (dias)	Concentração de Íons (ppm)		
				K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻
Cal	KCl	Topo	60	12,51	0,76	35,50
Cal	KCl	Meio	60	10,32	0,21	35,50
Cal	KCl	Base	60	13,41	0,39	35,50
Cal	KCl	Topo	120	12,96	0,21	7,10
Cal	KCl	Meio	120	8,62	0,03	17,75
Cal	KCl	Base	120	16,16	0,03	17,75
Cal	KCl	Topo	240	16,38	0,00	49,70
Cal	KCl	Meio	240	10,92	0,00	49,70
Cal	KCl	Base	240	22,23	0,00	42,00
Cal	NaCl	Topo	60	4,96	0,70	35,50
Cal	NaCl	Meio	60	6,56	0,94	44,37
Cal	NaCl	Base	60	10,76	0,39	35,50
Cal	NaCl	Topo	120	4,56	4,31	7,10
Cal	NaCl	Meio	120	4,96	1,89	35,50
Cal	NaCl	Base	120	10,76	0,03	17,75
Cal	NaCl	Topo	240	2,34	4,37	71,00
Cal	NaCl	Meio	240	3,51	0,92	60,00
Cal	NaCl	Base	240	14,82	0,00	46,00

Tabela 7 - Ensaios químicos das colunas sujeitas à percolação de KCl e NaCl

Estabilizante	Fluido	Extremidade	Período (dias)	Concentração (ppm)	
				K ⁺	Cl ⁻
Cimento	KCl	Topo	285	67,86	17,75
Cimento	KCl	Base	285	92,43	17,75
Cimento	NaCl	Topo	285	3,45	17,75
Cimento	NaCl	Base	285	0,69	24,85
Cal	KCl	Topo	285	20,67	35,50
Cal	KCl	Base	285	15,21	42,60
Cal	NaCl	Topo	285	4,83	31,95
Cal	NaCl	Base	285	0,00	24,85

percolado pelos corpos de prova solo-cal e submetê-las a ensaios para determinação das concentrações dos íons de interesse. Passados outros vinte dias, novas determinações de concentração dos íons foram realizadas. Após essas duas determinações, as demais foram feitas em intervalos de tempo de trinta dias.

Para os corpos de prova solo-cal submetidos à percolação de KCl, o início das determinações só possível depois de trinta e cinco dias da data da montagem dos ensaios. As determinações seguintes foram feitas em períodos de tempo variando de vinte e cinco a trinta e cinco dias uma da outra.

A Tabela 8 apresenta os resultados das determinações de concentrações realizadas nos corpos de prova solo-cal submetidos à percolação de NaCl e KCl.

Nesse caso, no início (até o tempo de 55 dias) os valores de concentrações do íon K⁺ estão maiores do que o valor

da concentração do íon na solução de entrada, indicando um efeito de lixiviação. Depois, as concentrações caem a valores menores do que a de entrada, indicando o fim do efeito de lixiviação e início do processo de retenção.

Para o Na⁺ os valores de concentrações são menores que o valor da concentração do íon na solução de entrada, o que pode estar indicando um processo de retenção.

No caso do Cl⁻, os valores de concentrações no percolado são menores do que a concentração do íon na solução de entrada, o que pode estar indicando um processo de retenção.

Nos corpos de prova solo-cal submetidos à percolação de água residuária e de chorume só foi possível realizar ensaios de determinação da DQO depois de cinquenta e cinco dias da montagem. As demais determinações foram feitas em intervalos de tempo, variando de vinte e cinco a trinta e cinco dias uma

da outra. A Tabela 9 apresenta os resultados destas determinações.

Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram valores da DQO das amostras percoladas bem menores que aqueles de entrada, o que indica que mistura é capaz de reduzir as concentrações de substâncias potencialmente contaminantes.

ANÁLISES

A condutividade hidráulica obtida com as misturas nas condições de compactação utilizadas indica valores compatíveis para uso como liners, viabilizando o uso de solos lateríticos arenosos para produção de barreiras de proteção.

Analisando os resultados dos ensaios químicos nos três esquemas experimentais usados, verifica-se uma tendência de aumento da concentração de K⁺ no solo do topo para a base dos

Tabela 8 - Concentrações no fluido percolado pelos corpos de prova solo-cal submetidos à percolação de solução de KCl (novo esquema experimental)

Estabilizante	Amostra	Concentração (ppm)		
		K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻
8% Cal	KCl entrada	17,16	-	63,9
8% Cal	KCl percolado (35 dias)	255,45	-	53,25
8% Cal	KCl percolado (55 dias)	271,83	-	60,35
8% Cal	KCl percolado (90 dias)	8,19	-	56,8
8% Cal	KCl percolado (120 dias)	41,73	-	42,60
8% Cal	NaCl entrada	-	34,50	78,10
8% Cal	NaCl percolado (15 dias)	-	31,05	67,45
8% Cal	NaCl percolado (35 dias)	-	31,51	71,00
8% Cal	NaCl percolado (70 dias)	-	31,97	74,55
8% Cal	NaCl percolado (100 dias)	-	27,60	60,35

Tabela 9 - DQO no fluido percolado pelos corpos de prova submetidos à percolação de água residuária e chorume (novo esquema experimental)

Estabilizante	Amostra	DQO (mg/l)
8% Cal	Água Residuária entrada	449
8% Cal	Água Residuária percolada (55 dias)	399
8% Cal	Água Residuária percolada (90 dias)	41
8% Cal	Chorume entrada	1430
8% Cal	Chorume percolado (55 dias)	472
8% Cal	Chorume percolado (92 dias)	125

corpos de prova, chegando, às vezes, a haver na base das amostras ou no fluido percolado concentrações maiores que a de entrada, como se observa na Figura 5. Tais concentrações indicam uma baixa capacidade de retenção de K^+ pelos materiais e uma tendência de lixiviação do íon com a percolação, evidenciando transporte do potássio existente no solo.

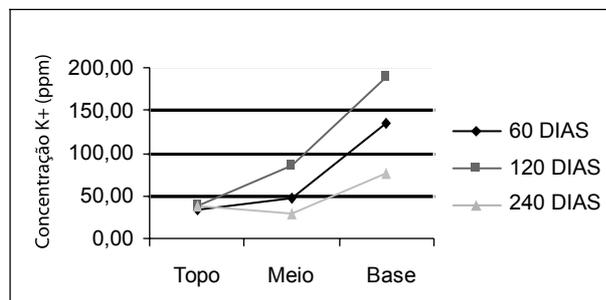
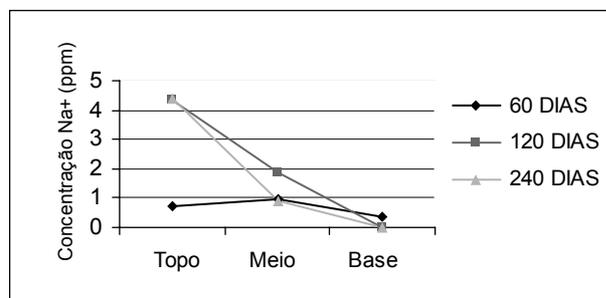
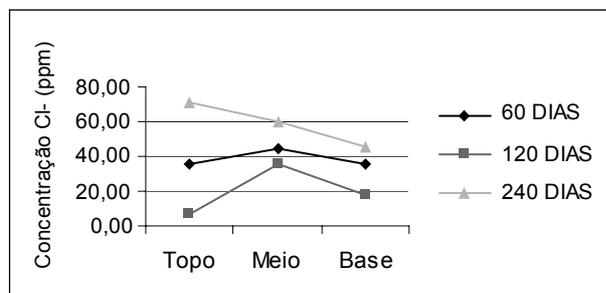
Para o Na^+ , os resultados indicam redução nas concentrações nos corpos de prova do topo para a base, o mesmo acontecendo quando se comparam as concentrações de Na^+ nas soluções de entrada e saída nos corpos de prova do novo esquema experimental, sugerindo retenção dos íons presentes no fluxo advectivo por sorção (Figura 6).

Situação similar ocorre com as concentrações de Cl^- , porém nesse caso os dados mostram que a redução nas concentrações do íon do topo para a base dos corpos de prova se torna mais significativa com o passar do tempo, indicando também condições apropriadas para retenção de Cl^- nas misturas testadas (Figura 7).

Para as soluções de origem orgânica (água residuária e chorume) só foi possível realizar determinações de DQO em amostras percoladas pelos corpos de prova solo-cal no novo esquema experimental. Os resultados indicam que esta mistura apresenta uma alta capacidade de retenção para as substâncias testadas.

CONCLUSÕES

Os valores de condutividade hidráulica apresentados pelas misturas compactadas atendem aos requisitos básicos para uso dos materiais como barreira selante.

Figura 5 - Concentração de K^+ do topo para a base das amostras com o tempoFigura 6 - Concentração de Na^+ do topo para a base das amostras com o tempoFigura 7 - Concentração de Cl^- do topo para a base das amostras com o tempo

Há uma tendência de lixiviação do K^+ nas amostras, evidenciada pelo aumento de concentração no sentido do fluxo nos corpos de prova.

As misturas apresentam retenção de Na^+ e Cl^- por sorção, evidenciada pela redução de concentração deste íon nas misturas e na solução percolante.

As misturas testadas apresentam alta capacidade de retenção para cromo e água residuária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP o apoio para o desenvolvimento das pesquisas, na forma dos Processos 01/11217-3 (bolsa de mestrado) e 02/02455-0 (auxílio à pesquisa).

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA M.A.M. & LOLLO, J.A. *Evaluation of mechanic performance of lime-soil mixtures under distinct exposition condition*. Journal of Nepal Geological Society, Nepal Geological Society, Kathmandu, Nepal, special issue, p. 162-167. 1999.

BOFF, F.E. *Estudo da seletividade iônica na interação solo-contaminante aplicado a liners*. São Carlos: EESC/USP. Seminário (Seminários Gerais em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

DELGADO, C. W. C. *Mecanismos de Transporte de Metais Pesados*. Salvador. Disponível em: <<http://www.geoamb.eng.ufba.br>>. Acesso em 10 dez. 2002.

IAC. *Levantamento pedológico semidetalhado de alguns municípios da região de influência do Conjunto Hidrelétrico de Urubupungá – Estado de São Paulo*. São Paulo, Instituto Agrônomo da Campinas, escala 1:100.000, 1994.

IPT. *Levantamento pedológico da área do Cinturão verde da cidade de Ilha Solteira - SP*. São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológicas, escala 1:6.000, 1988.

LEITE, A.L.L. *A difusão molecular do K^+ e Cl^- em solos naturais compactados: uma perspectiva para uso em liners*. São Carlos: EESC/USP. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

LEITE, J.C. *Avaliação de materiais inconsolidados para o uso em liners*. Revisão Bibliográfica, SGS-EESC-USP, São Carlos, 1996.

LEITE, J.C. *Estudos laboratoriais de percolação em colunas de misturas de solos lateríticos compactados: Equipamentos e ensaios*. São Carlos, 223p. Tese (Doutorado)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

RIBEIRO, R.A.V. *Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado estabilizado quimicamente*. Ilha Solteira: FEIS/UNESP. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 81p. 202.

RIZZO. R.P. *Avaliação da eficácia de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente*. Ilha Solteira: FEIS/UNESP. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2004, 91p.

YONG, R.N.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P. *Principles of Contaminant Transport in Soils*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 327p. 1992.

Endereço para correspondência:

Rodrigo Pelho Rizzo
Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Universidade Estadual Paulista
Alameda Bahia, 55
15385-000 Ilha Solteira - SP - Brasil
Tel.: (18) 3743-1137
Fax: (18) 3743-1160
E-mail: lolloja@dec.feis.unesp.br