ENSAIO DE COLUNA PARA PERCOLAÇÃO DE CONTAMINANTES EM MISTURAS SOLO-BENTONITA VISANDO ALTERNATIVA DE BARREIRA MINERAL EM REGIÃO COSTEIRA

CLÁUDIA DA COSTA MONTEIRO DE BARROS[1], CEZAR AUGUSTO BURKERT BASTOS[2], KARINA RETZLAFF CAMARGO[3], CHRISTOPHER FONSECA DA SILVA[4]

RESUMO

O presente trabalho traz um estudo experimental da condutividade hidráulica e da percolação de íons inorgânicos em colunas de mistura de solo arenoso fino laterítico de origem eólica litorânea (solo ARMAR) e bentonita. Para os ensaios de percolação em colunas foi projetado e construído um equipamento que atendeu satisfatoriamente sua função na avaliação da retenção de contaminantes. O equipamento dispõe de um distribuidor de ar comprimido que impulsiona a solução contaminante, acondicionada em um reservatório, para ser percolada nas células de percolação. Foram produzidas curvas de permeabilidade, pH, condutividade elétrica para a fase de testes de percolação. Encontrou-se uma mistura tecnicamente viável para justificar investimentos na sua aplicação em *liners* e barreiras minerais (solo ARMAR + 4% de bentonita), visto que os resultados de condutividade hidráulica e de sorção de íons são condizentes com a legislação específica da área.

PALAVRAS-CHAVES: Barreiras Minerais. Condutividade Hidráulica. Resíduos Sólidos. Retenção de Contaminantes. Solo-Bentonita.

TEST FOR COLUMN CONTAMINANTS IN MIXTURES PERCOLATION SOLO-SEEKING ALTERNATIVE BENTONITE BARRIER MINERAL IN COASTAL REGION

ABSTRACT

This paper presents an experimental study of hydraulic conductivity and the percolation of inorganic ions on columns of mixed laterite fine sandy soil of coastal eolian origin (soil ARMAR) and bentonite. For the tests in percolation columns was designed and built equipment that had served their function in assessing the retention of contaminants. The unit has a distributor of compressed air that drives the contaminant solution, packaged in a reservoir, to be percolated into cells. Permeability curves were produced, just like pH and electrical conductivity checks. We found a mixture technically feasible to justify investments in its application in mineral liners and barriers (solo ARMAR + 4% bentonite) as the results of hydraulic conductivity and sorption of ions are consistent with the rules of the specific area.

[1]Universidade Federal do Rio Grande (FURG), claudinhaeq@gmail.com

[2]Universidade Federal do Rio Grande (FURG), cezarbastos@furg.br

[3]Universidade Federal do Rio Grande (FURG), karinacamargo@furg.br

[4]Universidade de São Paulo (USP), christopherfonsec@gmail.com

KEYWORDS: Contaminants. Hydraulic Conductivity. Minerals Barriers. Soil-Bentonite. Solid Waste.

1. INTRODUÇÃO

A consciência do grave problema de degradação do meio ambiente tem evoluído significativamente no Brasil nos últimos anos. A região costeira constitui uma das áreas sob maior estresse ambiental em nível mundial, estando submetida à forte pressão por intensas e diversas formas de uso do solo, e em especial pela ocupação antrópica, causada principalmente pela expansão urbana sobre áreas fragilizadas geologicamente [11].

Essa expansão urbana traz consigo a geração de resíduos sólidos urbanos e efluentes industriais que possuem, em sua composição material, elementos capazes de degradar os solos e as águas, sejam elas superficiais ou subsuperficiais. Assim, seus tratamentos e descartes precisam ser seguros e ecologicamente corretos, o que incentiva pesquisas na área de transporte de contaminantes.

Parte das pesquisas tem se voltado para o estudo de barreiras minerais, definidas como camadas de solo argiloso compactado de baixa condutividade hidráulica e com propriedades físico-químicas próprias à retenção de contaminantes. Essa é uma das técnicas empregadas no projeto de aterros sanitários e de bacias de disposição de efluentes, e tem por objetivo principal a redução, para padrões não nocivos à saúde humana, da concentração de poluentes que por ventura atinjam as águas superficiais ou subterrâneas,.

O solo estudado tem jazida e potencial emprego na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, região fisiográfica que tem como uma de suas características a ausência de solos argilosos com boas características de compactação.

Face ao problema exposto, o presente trabalho contribui na busca de uma alternativa para a construção de barreiras minerais em solo compactado, por meio de um estudo experimental da condutividade hidráulica e dos parâmetros de transporte e retenção de íons inorgânicos de misturas de solo arenoso fino laterítico de origem eólica litorânea (chamado de solo ARMAR) e bentonita.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais empregados – características físicas e químicas

O solo sedimentar estudado, pertencente à Barreira Litorânea II [16], foi classificado do ponto de vista pedológico como pertence ao horizonte pedogenético Bde um perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo, formado pela translocação de elementos e a acumulação de argila e óxidos de ferro e alumínio [15].

Esse solo arenoso fino costeiro de comportamento laterítico vem sendo estudado em suas propriedades geotécnicas há quase uma década pelo Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG. Nestas pesquisas, esse solo, assim como sua jazida, é identificado como ARMAR, em associação ao nome comercial da empresa mineradora que explora tal solo para a indústria de fertilizantes do município de Rio Grande.

As propriedades físicas do solo utilizado nesta pesquisa e sua curva granulométrica, obtidos segundo [1-4], encontram-se na TABELA 1 e na FIGURA 1, respectivamente.

Tabela 1: Caracterização geotécnica do solo ARMAR.

Propriedades Físicas	Valores
Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	26,3
Porcentagem de areia média (%)	21
Porcentagem de areia fina (%)	49
Porcentagem de silte (%)	5
Porcentagem de argila (%)	25
Limite de liquidez (%)	32
Limite de plasticidade (%)	16
Teor de umidade higroscópica (%)	3,65

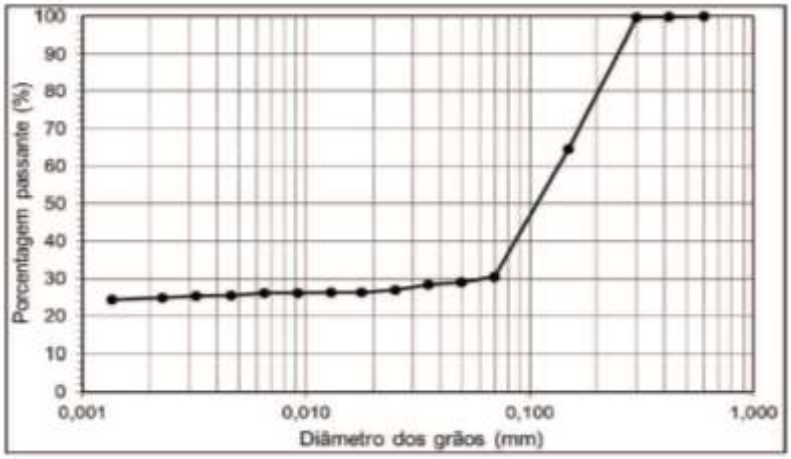


Figura 1: Curva granulométrica do solo ARMAR

A TABELA 2 resume os resultados de difratogrametria de raios X obtidos com o solo ARMAR, em amostras natural, glicolada e calcinada.

Tabela 2: Resultados da análise mineralógica da fração fina do solo ARMAR [6].

Minerais	Análise do pó	Análise da fração coloidal		
		Amostra natural	Amostra glicolada	Amostra calcinada
Quartzo	X	X	x	X
Feldspato alcalino	X			
Caulinita	X	X	x	
Ilita		X	x	X
Vermiculita		X	x	X
Esmectita		X		

A bentonita empregada no estudo é do tipo sódica, comercialmente conhecida como “Permagel”,beneficiada pela Empresa Bentonit União Nordeste S.A. A TABELA 3 apresenta a caracterização química e as propriedades gerais da Bentonita “Permagel” fornecidas pela própria empresa.

Tabela 3: Propriedades gerais da Bentonita “Permagel” [13].

Composição Química		Propriedades Gerais	
Anidrido silícico (SiO_2)	60,2%	Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	2,8 – 3,0
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	18,5%	Limite de liquidez (%)	450 - 490
Óxido férrico (Fe_2O_3)	7,2%	Limite de plasticidade (%)	40 - 65
Óxido de magnésio (MgO)	2,0%	Peso específico aparente seco(kN/m^3)	9,6
Óxido de cálcio (CaO)	2,4%	Teor de umidade ótima (%)	50
Óxido de sódio (Na_2O)	2,5%	Umidade natural (%)	17,0 – 19,0
Óxido de titânio (TiO_2)	0,9%	Condutividade hidráulica (cm/s)	1,0 x 10^{-12}
Óxido de potássio (K_2O)	0,53%	pH (4,5% suspensão) (%)	9,5

Foi empregada na pesquisa uma mistura de solo ARMAR com teor de 4% de bentonita, justificada pela condutividade hidráulica atingida, como será visto adiante. A TABELA 4 mostra os resultados da caracterização geotécnica da mistura solo-bentonita 4% e a FIGURA 2 ilustra sua curva granulométrica.

Observou-se que ocorreu somente um pequeno aumento da fração argilosa do solo, não havendo mudanças relevantes com o acréscimo de 4% de bentonita. Assim, a mistura foi classificada como: areia argilosa segundo a classificação da ABNT; SC (areia argilosa) segundo o Sistema Unificado (USCS); e A-2-6 (1) pela HRB-AASHTO.

.

Tabela 4: Caracterização geotécnica da mistura solo-bentonita 4%.

Propriedades Físicas	Valores
Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	26,4
Porcentagem de areia média (%)	26
Porcentagem de areia fina (%)	42
Porcentagem de silte (%)	5
Porcentagem de argila (%)	27
Limite de liquidez (%)	28
Limite de plasticidade (%)	12
Teor de umidade higroscópica (%)	4,44

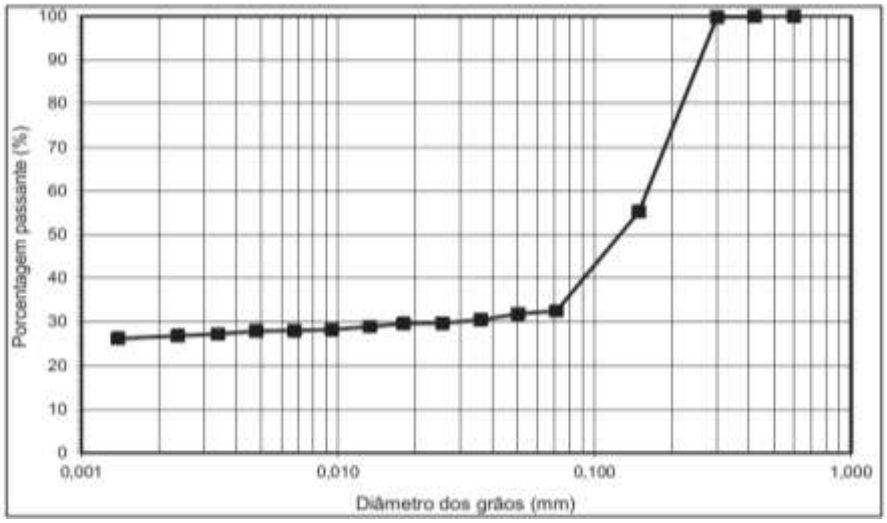


Figura 2: Curva granulométrica da mistura solo-bentonita 4%.

Na TABELA 5 verifica-se a caracterização química do solo, da bentonita e da mistura solo-bentonita (4%). Percebe-se que o solo era inicialmente moderadamente ácido e ao receber 4% de bentonita sódica adquiriu características sódicas do aditivo, constatada pelo aumento no valor do seu pH. Como era esperado, notou-se alto valor de CTC para a bentonita, devido a sua intensa capacidade expansiva.

Tabela 5: Caracterização química do solo, da bentonita e da mistura solo-bentonita 4%.

	Propriedades Químicas ($cmol_c/kg$)						
Materiais	Ca	Mg	K	Na	Al	pH em água	$CTC_{efetiva}$
ARMAR	2,20	2,00	0,20	0,08	0,10	5,40	4,5
Bentonita	5,9	3,3	0,2	77,7	0	10,00	87,1
Mistura	4,00	3,00	0,20	2,37	0,00	7,50	7,2

A TABELA 6 e a FIGURA 3 apresentam, respectivamente, os parâmetros e as curvas de compactação do solo ARMAR e de misturas solo-bentonita obtidas em ensaio mini-Proctor, segundo [9]. Um aumento no teor de bentonita provocou um aumento na umidade ótima da mistura. O acréscimo de aditivo também promoveu uma mudança na estrutura do solo causando a redução da massa específica seca máxima

Tabela 6: Parâmetros de compactação do solo e de misturas estudadas.

Teor de bentonita (%)	w_{ot} (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m^3)
0	11,13	19,73
2	11,37	19,87
4	11,72	19,75
6	12,20	19,53
8	12,60	19,25
10	12,80	19,07
12	13,10	18,87
14	13,47	19,12

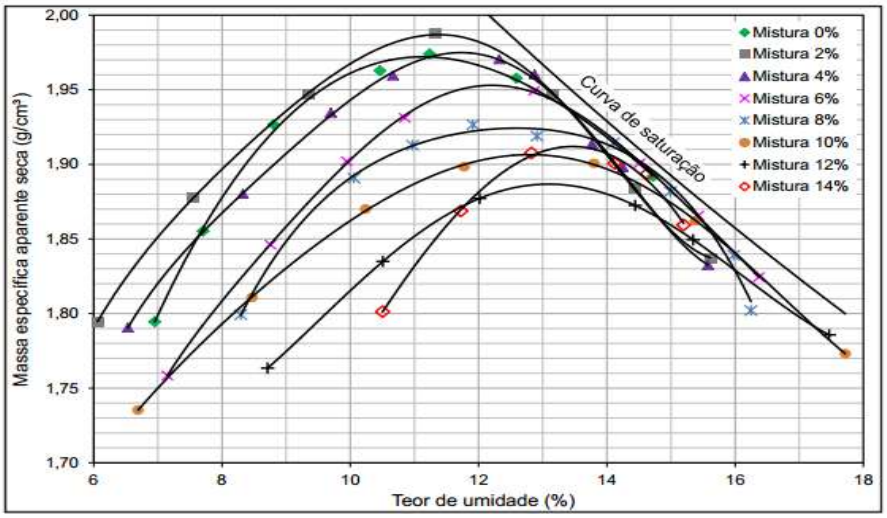


Figura 3: Curvas de compactação do solo e de misturas solo-bentonita obtidas em ensaio mini- Proctor

A TABELA7 apresenta os coeficientes resultantes dos ensaios de caracterização pela Metodologia MCT para o solo ARMAR no estado natural e com mistura de bentonita 4%.

Tabela 7: Coeficientes classificatórios pela Metodologia MCT do solo e mistura solo-bentonita 4% .

Coeficiente classificatório	MATERIAIS	
	ARMAR	MISTURA
c’	1,12	1,59

d’	53,3	52,9
Pi	52	276
e’	0,96	1,46

A FIGURA 4 exibe os materiais no gráfico classificatório da Metodologia MCT, na qual o solo ARMAR corresponde a um solo arenoso de caráter laterítico (LA’), condizente com a maturidade pedogenética deste horizonte. Já a mistura no teor de 4% é classificada como NG’ (solo argiloso de comportamento não laterítico).

A TABELA 8 apresenta os resultados obtidos na avaliação de propriedades tecnológicas pela Metodologia MCT para o solo ARMAR e para a mistura.

Segundo critérios propostos [14], a mistura compactada na energia equivalente do Proctor Intermediário apresenta média (4% ≤ mini-CBR ≤ 12%) a elevada (mini-CBR> 12%) capacidade de suporte, com e sem imersão, respectivamente. Esta mistura possui mediana perda da capacidade de suporte promovida pela imersão (40% ≤ RIS ≤ 70%). A expansão e a contração são consideradas baixas (≤ 0,5%).

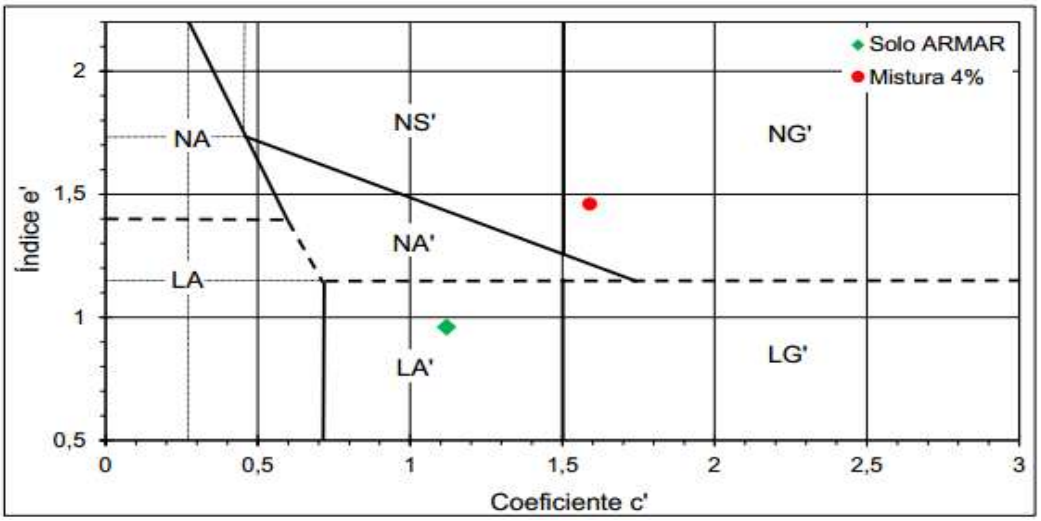


Figura 4: Classificação do solo e da mistura pela Metodologia MCT.

Tabela 8: Propriedades tecnológicas do solo ARMAR e da mistura.

Propriedades tecnológicas		ARMAR	Mistura
Mini-CBR	s/ imersão (%)	51,2	19
	c/ imersão (%)	25,6	9
	Índice RIS (%)	50	49
Expansão (%)		0,50	0,43
Contração (%)		0,21	0,20

Obs: solo ARMAR compactado na energia equivalente do Proctor Intermediário.

Os íons contaminantes, K^+ e Cl^- foram adquiridos em solução 0,23 M de KCl, correspondente a 1713,5 mg/L de solução. Estes íons foram escolhidos por serem comuns em depósitos de rejeitos urbanos.

2.2 Método na avaliação da condutividade hidráulica das misturas

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo e das misturas, utilizou-se o permeâmetro de parede flexível [15]. O equipamento permite determinar a condutividade hidráulica de materiais porosos cujo valor seja inferior ou igual a 10^{-6} m/s [5]. Com este tipo de equipamento, o fluxo preferencial nas paredes do permeâmetro é diminuído [8].

O permeâmetro é composto por uma câmara triaxial, onde é posicionado o corpo de prova entre duas pedras porosas, envolto por uma membrana flexível, conforme ilustra a FIGURA 5.

Os corpos de prova ensaiados foram moldados no mesmo compactador miniatura empregado nos ensaios de compactação, com teor de umidade 1% acima da umidade ótima de compactação. O peso e a altura dos espécimes foram controlados, de forma a atingir os parâmetros de compactação.

Após a moldagem do corpo de prova, providenciou-se instalação do mesmo na câmara triaxial, com as seguintes etapas: eliminação de ar do sistema; posicionamento do corpo de prova no pedestal da câmara, com disposição de pedra porosa e papel filtro na base e no topo do mesmo; colocação da membrana e vedação com anéis *o'rings* no topo e base; e fechamento da câmara e enchimento com água.

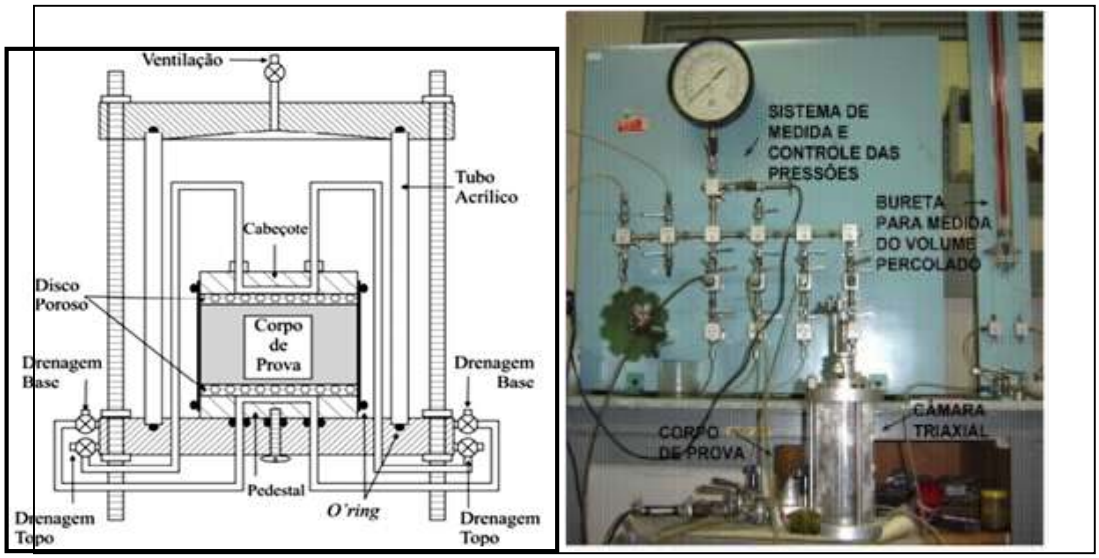


Figura 5: Permeâmetro de parede flexível - Equipamento do Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG [15].

Instalado o corpo de prova, foi então estabelecida a fase de saturação, a qual consiste na aplicação de estágios de iguais incrementos de tensão confinante e contrapressão na base do corpo de prova, mantendo a tensão efetiva constante durante todo o ensaio, dada uma diferença maior para a tensão externa de 10 kPa. A verificação da saturação foi realizada por meio do parâmetro B de *Skempton*.

Com o corpo de prova já saturado, foi iniciada a percolação, dada por um gradiente hidráulico de 20, oferecido pela diferença de 10 kPa nas pressões entre a base (290 kPa) e o topo (280 kPa) ao longo dos 5 cm de altura do corpo de prova. A vazão percolada foi obtida por meio da medição do tempo de percolação (com cronômetro) e do volume de água percolada (por meio de bureta de interface água-querosene), e através da aplicação da Lei de Darcy (Equação 1), calculou-se o coeficiente de condutividade hidráulica.

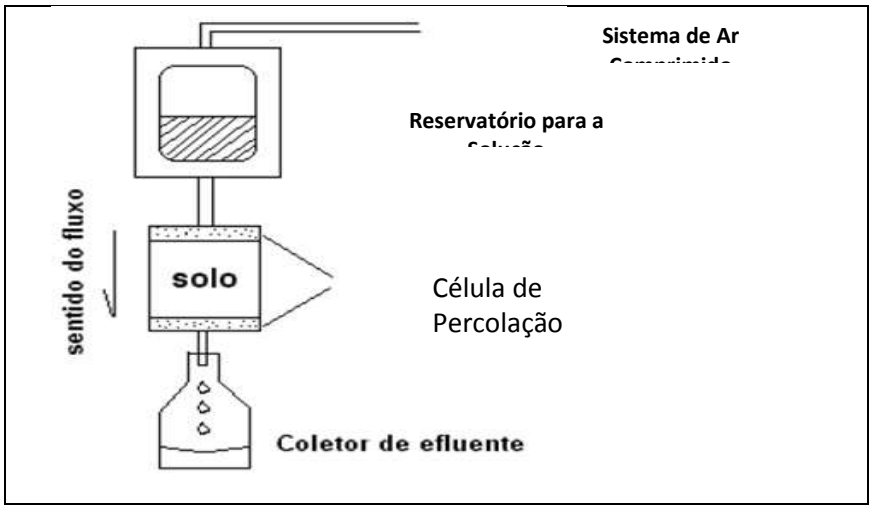
$$k = \frac{Q}{i.A} \tag{1}$$

Na Equação 1, k representa coeficiente de condutividade hidráulica; *Q* a vazão percolada; *i* o gradiente hidráulico; e *A* a área da seção transversal do corpo de prova.

2.3 Aspectos construtivos do sistema de percolação em coluna e detalhes do projeto.

O modelo de equipamento, apresentado na FIGURA 6, compreende três componentes principais: o sistema de ar comprimido, que impulsiona as soluções para o interior das colunas de solo, o reservatório para a solução, construído de modo a não permitir o contato direto do ar comprimido com a solução, evitando contaminações, e a célula de percolação, através da qual é realizada a coleta do efluente para análise. Este equipamento teve projeto inspirado na instalação presente no Laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo [10].

Figura 6: Modelo simplificado de um ensaio de coluna [7].



2.3.1 Sistema de Ar Comprimido

Vários fatores influenciaram no projeto do sistema de ar comprimido. Em relação à implantação de ar comprimido para injeção de soluções a pressões constantes no tipo de equipamento projetado, as seguintes condições foram especialmente importantes: utilizar solos de fluxos lentos; manter pressão constante no reservatório; verificar dimensionamento ótimo da tubulação evitando perda de carga; e ausência de contrapressão na saída do efluente [12].

Essas exigências foram atendidas para que o equipamento pudesse ter um desempenho adequado. A descrição desse aparato tem como base a FIGURA 7 e o esquema apresentado na FIGURA 8.



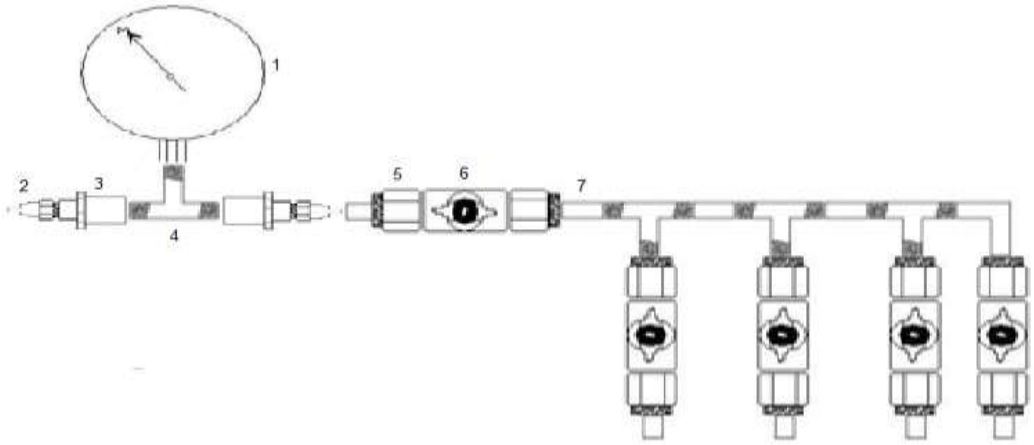






1. Compressor
2. Manômetro
3. Distribuidor de ar comprimido
4. Esquema completo de ensaio

Figura 7: Esquema de distribuição de ar.



1. Manômetro
2. Conector de mangueira em latão de ½”
3. Luva em latão de ½” para ¼”
4. Tê em latão, macho, ¼”
5. Conector ¼”, fêmea
6. Registro de esfera em latão ¼”
7. Mangueira Poly-Flo de 3mm de diâmetro interno

Figura 8: Detalhes construtivos do distribuidor de ar.

Apresentado na FIGURA 8, o traçado da tubulação busca fornecer ar para as três colunas, evitar perdas de carga e diminuir quedas de pressão ao longo da linha. Assim, o ar comprimido parte do compressor com pressão suficiente para garantir a alimentação das três colunas de solo, valor que foi confirmado e, se necessário, ajustado por um regulador de pressão dotado de manômetro inserido na entrada dos terminais. Um registro de esfera permite o controle da passagem do ar para uma tubulação de 3 mm de diâmetro interno.

Foram instalados registros individuais na saída dos tês de latão de ¼” que precedem as mangueiras de *Poly-Flo*, as quais conduzem o ar até os reservatórios de soluções, de modo a isolar cada ensaio. Para aliviar a pressão, antes da recarga do reservatório, adicionou-se um registro no final do terminal.

2.3.2 Reservatório

O reservatório (FIGURA 9) foi construído com tubo de 250 mm de comprimento por 92,8 mm de diâmetro e 3,5 mm de espessura de acrílico transparente, para favorecer a visualização da membrana de PVC flexível interna.

Realizou-se sua vedação superior com uma tampa de PVC marrom de 110 mm, na qual foi conectada uma torneira esférica de ¾” para proceder a recarga do reservatório, e um cabeçote que permitiu a fixação da câmara de ar comprimido.

A câmara possui a função de expandir-se e impulsionar o sistema, fazendo com que a solução contaminante seja injetada dentro da coluna. A parte inferior do reservatório também foi vedada com uma tampa de PVC marrom de 110 mm, fixada a uma torneira esférica de ¾" unida a um adaptador por onde se retira a solução.

2.3.3 Célula de percolação

A célula de percolação consta de um reservatório de acrílico com altura de 30 mm e diâmetro de 94 mm (FIGURAS 10a e 10b), com tampas, superior e inferior, quadradas, de acrílico com 140 mm de lado e 10 mm de altura.

Foram confeccionados nichos homogeneamente distribuídos na mesma direção do diâmetro do cilindro para promover melhor vedação da célula nas tampas(FIGURA 11a). Na parte interna das tampas foram realizados rebaixos, com torno mecânico, para melhor ajustar as pedras porosas inseridas abaixo da tampa superior e sobre a tampa inferior e evitar a formação de fluxos preferenciais(FIGURA 11c).

Também, como medida preventiva de fluxos preferenciais, as laterais das paredes das células foram lixadas em sentido transversal ao fluxo. Para impedir o contato do solo com as pedras, foram colocados discos de malha nylon de 400 *mesh* na base e no topo da coluna de solo.

As abraçadeiras mostradas na FIGURA 11b não permitem a expansão de diâmetro do cilindro durante a compactação do corpo de prova. Na tampa inferior foi colocado um bico central para a coleta do efluente (FIGURA 11c), e na tampa superior com a finalidade de alimentar a célula com a solução influente (FIGURA 11d).

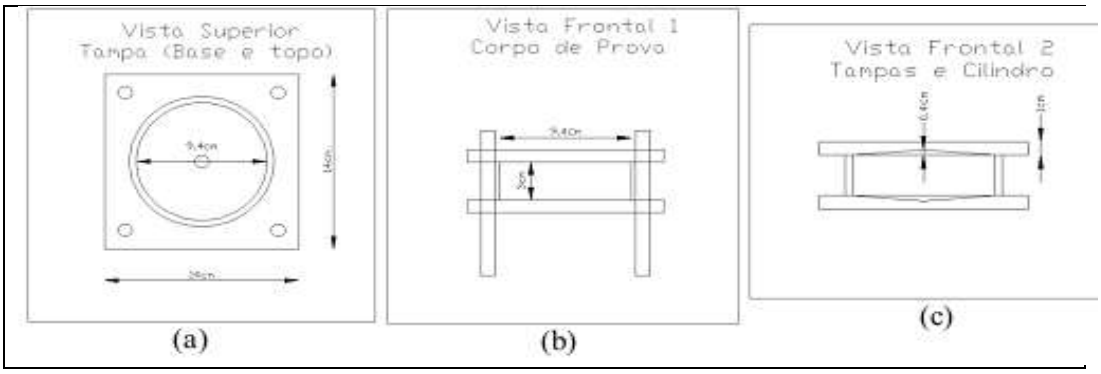


Figura 10: (a) Tampa fixa na base e topo do cilindro; (b) Dimensões do corpo de prova; (c) Concavidade moldada nas tampas [10].

1. Funil em PVC marrom, ½”
2. Torneira de esfera de ½”, em PVC, marrom, de 40mm de comprimento
3. Mangueira Poly-Flo de ¼”
4. Porca de latão e anilha de plástico e conector de latão de roscas ¼”
5. Pino com rosca macho de 1”, com furo longitudinal de 1/8”, e rosca fêmea ¼”
6. Porca confeccionada que permite o uso de chave especial para garantir vedação
7. Cabeçote que permite a fixação da câmara de ar
8. Tampa superior em PVC marrom
9. Membrana elástica de PVC de 1mm de espessura
10. Tampa inferior em PVC marrom
11. Torneira de esfera de ½”, em PVC, marrom, de 40mm de comprimento
12. Adaptador para coleta de solução
13. Mangueira Poly-Flo de ¼”

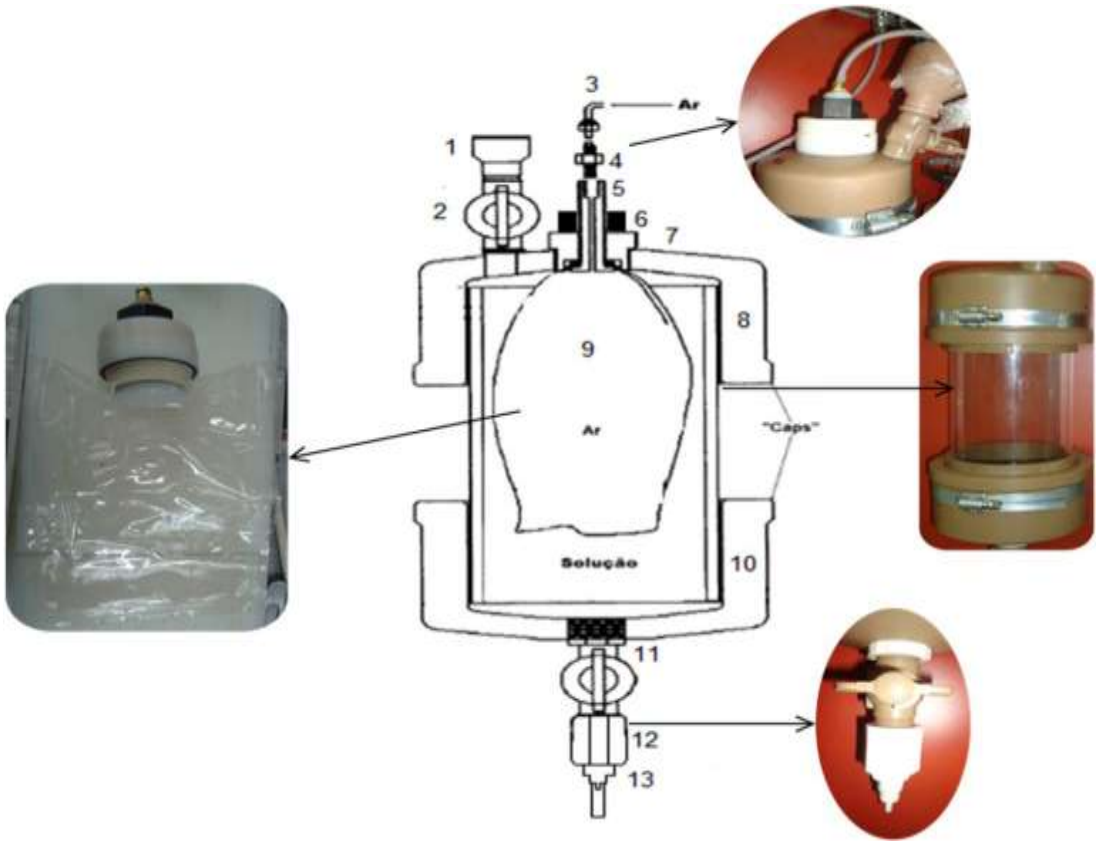


Figura 9: Descrição dos elementos construtivos do reservatório.



Figura 11: (a) Nichos homogeneamente distribuídos na mesma direção do diâmetro do cilindro; (b) Abraçadeiras impedindo a variação de diâmetro do cilindro; (c) Bico central para a coleta do efluente; e (d) Bico de alimentação da célula.

2.3.4 Etapas de execução do ensaio

a) Compactação das colunas

A operação de compactação consiste na redução do índice de vazios, estaticamente, da mistura de solo ARMAR com teor de 4% de bentonita, na umidade ótima, atingindo a massa específica aparente máxima seca.

Na FIGURA 12 encontra-se disposto o aparato empregado para a compactação dos corpos de prova diretamente nos cilindros de percolação.

O processo para se atingir a umidade ótima consistiu em amostrar o solo e, por meio de pesagens, determinou-se a sua umidade, relacionando a massa de água com a massa de sólidos da amostra. Em seguida, adicionou-se o volume de água necessário para atingir a umidade ótima estabelecida. Para maior homogeneidade da umidade da mistura, a mesma foi armazenada em câmara úmida por 24 h. O teor de umidade foi novamente averiguado e como foi próximo ao teor de umidade ótimo o solo foi

considerado pronto para ser compactado. A massa de solo compactada no cilindro foi calculada baseada na massa de solo seco e no volume do cilindro de percolação.



Figura 12: Aparato empregado para compactação dos corpos de prova.

b) Saturação

Para a saturação, deixou-se passar solução contaminante (solução aquosa de cloreto de potássio) nas colunas 1 e 2 e água destilada/deionizada através da coluna de solo 3, a uma pressão de 20 kPa que se manteve constante durante todo o ensaio. Atingido o fluxo constante, que foi verificado pela manutenção de volume percolado constante no tempo, iniciou-se a coleta dos volumes da solução que atravessaram a coluna de solo e a cronometragem da etapa de percolação.

Foram realizadas análises químicas quantitativas para verificar a quantidade de íons K^+ e Na^+ que estavam sendo lixiviados.

c) Percolação

Para se promoverem as três lixiviações, embora a capacidade de retenção de cada coluna fosse distinta, aplicou-se a solução aquosa de cloreto de potássio nas colunas 1 e 2 e água desmineralizada/deionizada na coluna 3, por meio dos reservatórios de solução do equipamento. Dessa forma foi possível a coleta de lixiviado suficiente para as determinações da condutividade hidráulica, análise quantitativa dos íons K^+, Na^+ e Cl^- e caracterização físico-química.

A frequência dos intervalos de leitura de volume percolado foi diária, porém a coleta de efluentes para análise foi realizada em intervalos de 15 em 15 dias para as colunas 1 e 2 e mensal para a coluna 3. A análise química do efluente foi realizada pela empresa Saybolt Concremat.

d) Recarga da solução contaminante

O processo de recarga do reservatório com solução iniciava-se com a interrupção do ensaio, fechando-se a válvula de passagem do efluente para a mangueira de coleta da célula de percolação (FIGURA 13a).

A próxima etapa era a suspensão da distribuição de ar comprimido, fechando-se a válvula de alimentação de ar para o reservatório (FIGURA 13b). Aliviava-se a pressão do sistema abrindo-se a válvula de alívio (FIGURA 13c) e esgotando-se o ar presente nas câmaras elásticas dos reservatórios. Promovia-se a abertura das torneiras de PVC marrom dos três reservatórios e se efetuava a recarga (FIGURA 13d).

O ensaio era retomado fechando-se as torneiras e a válvula de alívio e liberando a passagem do ar comprimido pela válvula de alimentação.

e) Análises químicas

Os ensaios para determinação de sódio e potássio foram realizados durante a fase de saturação e de percolação da solução contaminante. O método de ensaio de fotometria de chama utilizado para a determinação dos íons Na^+ e K^+ consistiu na atomização da amostra, produzindo átomos em estado excitado capazes de emitir luz em comprimento de onda específico.

Com a inserção do cloreto de potássio como solução contaminante, na etapa de percolação das colunas, tornou-se necessário o controle da concentração do Cl^-. A frequência de coleta do efluente para análise (15 em 15 dias) foi a mesma utilizada para a determinação de sódio e potássio, visto que, as análises foram realizadas utilizando-se as mesmas amostras e no mesmo laboratório. O método de espectrofotometria foi empregado, baseado na capacidade da solução efluente analisada absorver ou transmitir um feixe de energia nela emitido.

O pH foi medido em peagâmetro, constituído basicamente por um eletrodo e um circuito potenciômetro. A frequência de coleta do efluente para análise (15 em 15 dias) foi a mesma utilizada para a determinação de sódio, potássio e cloreto, e, como relatado, as análises foram realizadas utilizando as mesmas amostras e no mesmo laboratório.

A determinação do Eh foi realizada em peagâmetro, juntamente com as outras análises citadas anteriormente.

As medidas de condutividade elétrica foram realizadas utilizando-se condutivímetro e a partir das mesmas alíquotas de efluentes que serviram como base para as outras medidas no laboratório Saybolt Concremat.

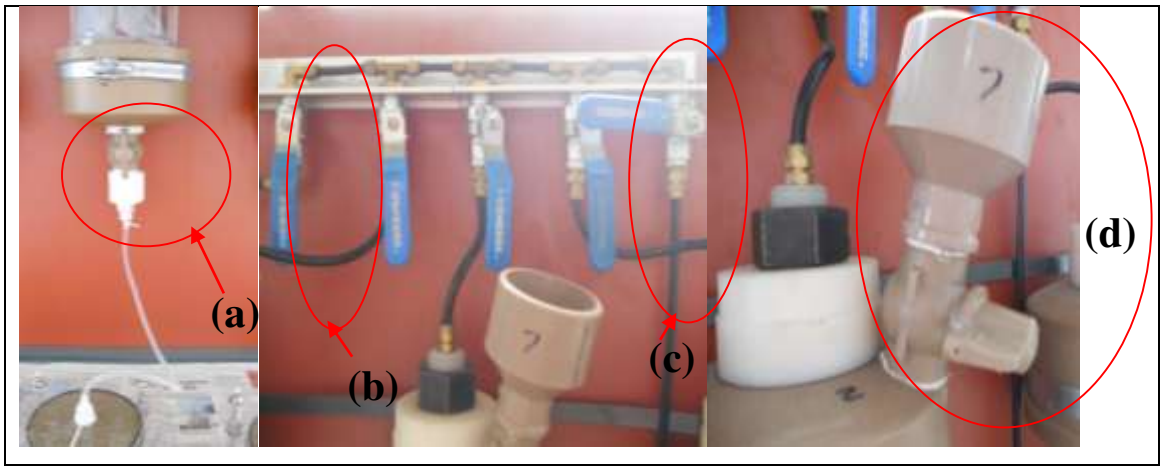


Figura 13: (a) Válvula de passagem do efluente para a mangueira de coleta da célula de percolação; (b) Válvula de alimentação de ar para o reservatório; (c) Válvula de alívio; e (d) Torneira de PVC marrom.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1.Condutividade hidráulica do solo e da mistura

O solo ARMAR, ensaiado em permeâmetro de parede flexível, apresentou condutividade hidráulica de $3{,}39\times10^{-9}$ m/s. Com vista a obter um material com permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s, foram conduzidos os estudos avaliando a adição de bentonita para redução da condutividade hidráulica dos solos, cujos resultados são apresentados na TABELA 9 e FIGURA 14.

Observou-se que um teor mínimo de apenas 4% de aditivo tornou a mistura solo ARMAR e bentonita viável, quanto à condutividade hidráulica, para uso em construção de barreiras impermeabilizantes.

Tabela 9: Valores do coeficiente de condutividade hidráulica do solo, e das misturas estudadas.

Teor de bentonita (%)	k_{20} (m/s)
0	$3{,}39.\ 10^{-9}$
2	$1{,}37.\ 10^{-9}$

4	$2{,}75.\ 10^{-10}$
6	$2{,}84.\ 10^{-10}$
8	$3{,}36.\ 10^{-10}$
10	$2{,}87.\ 10^{-10}$
12	$1{,}69.\ 10^{-10}$
14	$3{,}53.\ 10^{-10}$

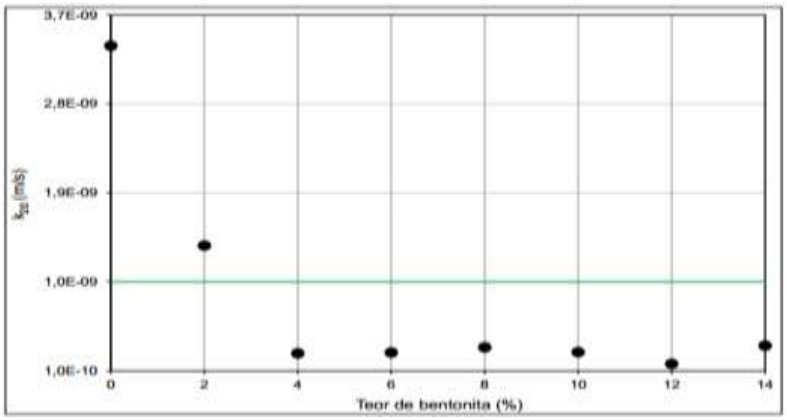


Figura 14: Variação da condutividade hidráulica das misturas solo-bentonita

3.2 Resultados do ensaio piloto em coluna

Uma análise preliminar do comportamento do equipamento de coluna construído foi realizada no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Executaram-se três ensaios simultaneamente, sendo que em dois deles a coluna foi percolada com KCl e em um terceiro houve percolação de água deionizada/destilada.

Os parâmetros avaliados foram a concentração do Na^+, K^+, Cl^-, pH, Eh e condutividade elétrica (CE) durante as etapas de saturação e percolação das colunas 1 e 2 com KCl e durante as etapas de saturação e percolação da coluna 3 com água deionizada/destilada.

Para as medidas físicas e hidráulicas, os dados dos ensaios em coluna são mostrados na TABELA 10.Em relação às medidas químicas, importante são os dados de concentração de Na^+, K^+ e Cl^- e de determinação de pH, Eh e CE da solução efluente.

As TABELAS 11 a 13 apresentam o monitoramento das concentrações de Na^+, K^+ e Cl^- em função do volume de poros percolados nos ensaios.

Na fase de saturação das colunas percebeu-se um aumento, na fase inicial, da concentração de Na^+ para as três colunas, que pode ser explicado, pelo fato da bentonita utilizada na mistura e lixiviada ser sódica.

Os íons K^+ da solução contaminante foram retidos e/ou trocados na superfície do solo e os íons Na^+ da bentonita foram liberados na solução efluente. Com o passar do tempo a lixiviação provocou uma redução na concentração de Na^+, para valores muito próximos de zero em ambas as configurações analisadas, como pode ser visto nas tabelas apresentadas.

Tabela 10: Dados dos ensaios em colunas.

DADOS	COLUNA 1	COLUNA 2	COLUNA 3
Área (cm^2)	70,88	70,88	70,88
Diâmetro (cm)	9,40	9,40	9,40
Altura na coluna (cm)	1,80	1,80	1,80
ρ_d (g/cm^3)	01,95	01,95	01,95
N	0,330	0,330	0,330
$w_{ót}$(%)	11,72	11,72	11,72
w_{hig}(%)	4,440	04,44	04,44
Volume de vazios (cm^3)	31,77	31,77	31,77
Tempo de ensaio (dias)	60,00	60,00	60,00
k_{final} (m/s)	$5,40 \times 10^{-9}$	$4,54 \times 10^{-9}$	$5,21 \times 10^{-10}$
Carga hidráulica (kPa)	20,00	20,00	20,00
Gradiente hidráulico	111,11	111,11	111,11
Molaridade de KCL (M)	0,023	0,023	-
Concentração de KCl (mg/L)	1713,5	1713,5	-

onde: ρ_d: massa específica aparente seca; n: porosidade; $w_{ót}$: teor de umidade ótima de compactação; w_{hig}: teor de umidade higroscópica; k_{final}: coeficiente de condutividade hidráulica medido no ensaio de coluna

Tabela 11: Variação de Na^+, K^+ e Cl^- *versus* volume de poros percolados para a coluna 1.

	Coluna 1 (KCl) Volume de poros percolados				
Análise	191	488	677	754	828
Na^+(mg/L)	16,2	0,043	0,681	0,549	0,64
K^+ (mg/L)	3819	1572	1047	1025	980
Cl^-(mg/L)	765,7	804	867,8	918,9	855,1

Tabela 12: Variação de Na^+, K^+ e Cl^- *versus* volume de poros percolados para a coluna 2.

	Coluna 2 (KCl) Volume de poros percolados				
Análise	150	383	537	601	664
Na^+(mg/L)	75,5	1	0,885	0,502	0,36
K^+ (mg/L)	6,57	310	694	86,7	1000
Cl^- (mg/L)	778,5	804	829,5	931,6	855,1

Tabela 13: Variação de Na^+, K^+ e Cl^- *versus* do volume de poros percolados para a coluna 3.

	Coluna 3 (H_2O) Volume de poros percolados	
Análise	26	56
Na^+(mg/L)	63	17,4
K^+ (mg/L)	6,27	17,3
Cl^- (mg/L)	35,2	16,8

Embora se tenha utilizado vários artifícios para promover condições uniformes de análise, constatou-se que eles não foram suficientes para promover a precisão necessária, fomentando dissonâncias nos valores de concentração, como pode visto nos valores de K^+ da primeira coluna. Em vista disso, os dados do K^+ desta coluna tiveram que ser descartados da análise.

Considerou-se como o principal fator de imprecisão das análises, as diluições impostas às amostras recolhidas no ensaio. Destaca-se que essas diluições foram realizadas com o intuito de gerar volumes suficientes de amostra para as análises químicas.

Os valores do Cl^-, para as duas colunas percoladas com KCl, tiveram comportamento semelhante. Pode ser observada pequena retenção deste íon nos dois ensaios, chegando à estabilização já na fase de saturação das colunas.

As TABELAS 14 a 16 apresentam a variação do pH, Eh e da CE em função do volume de poros percolados para os ensaios.

Tabela 14: Variação do pH, Eh e da CE em função do volume de poros percolados para a coluna 1.

	Coluna 1 (KCl) Volume de poros percolados				
Análise	191	488	677	754	828
pH	7,39	7,41	4,85	6,96	7,1
Eh	20,79	20,86	20,89	20,78	21,03
CE (µS/cm)	2291,1	2684,6	2677,7	2670,6	2484,4

Tabela 15: Variação do pH, Eh e da CE em função do volume de poros percolados para a coluna 2.

	Coluna 2 (KCl) Volume de poros percolados				
Análise	150	383	537	601	664
pH	7,56	7,48	4,98	7,14	7,09
Eh	20,85	20,83	20,89	20,87	20,99
CE (µS/cm)	2347,2	2684,1	2681,2	2747,3	2615,4

Tabela 16: Variação do pH, Eh e da CE em função do volume de poros percolados para a coluna 3.

	Coluna 3 (H_2O) Volume de poros percolados	
Análise	26	56
pH	7,98	6,42
Eh	20,86	20,83
CE (µS/cm)	392,7	136,3

O pH do efluente das colunas que receberam a solução contaminante foi inferior em relação a coluna que recebeu água deionizada/destilada. Porém não houve diferença significativa entre as colunas que receberam a solução contaminante.

Há uma tendência geral de redução do pH durante a percolação com solução de KCl. Essa diminuição pode estar associada às reações de intercâmbio de íons entre a solução contaminante e o solo. O K^+ compete com o H^+ pelos sítios de troca na superfície dos minerais, refletindo nos valores de pH em solução. Estas trocas se processaram até que fosse atingido o equilíbrio entre a superfície do solo e a solução.

Nas colunas percoladas com KCl o pH do efluente (médio de 7,2) foi muito próximo dos valores de pH da coluna percolada com água destilada/deionizada, indicando uma condição levemente neutra à básica ao longo do ensaio.

As TABELAS 14 a 16, que apresentam o Eh para as três colunas, mostram um comportamento equânime ao longo do ensaio. Concluiu-se que as imprecisões notadas para os dados do K^+ aconteceram, prejudicando a análise do Eh.

De modo geral, o comportamento da CE das colunas foi bastante homogêneo, e os valores raramente ultrapassaram (ou o fizeram muito sutilmente) o valor da CE da solução influente (2535,6 µS/cm na solução de KCl e 2,2 µS/cm para H_2O).

4. CONCLUSÕES

O artigo reúne resultados da avaliação da condutividade hidráulica de mistura solo-bentonita e da construção de um equipamento para ensaio de coluna e dos testes de seu funcionamento. Foi empregado solo arenoso fino litorâneo laterítico, conhecido como ARMAR, misturado à bentonita sódica comercial.

O solo ARMAR apresenta-se como arenoso fino com fração argilosa, conferindo-lhe certa plasticidade e cuja classificação pelo Sistema Unificado é SC, pela HRB-AASHTO é A-2-6(1) e pela Metodologia MCT é LA'. Os argilominerais presentes mostram-se inativos, indicando predomínio de caulinita. A caracterização química realizada para a bentonita confirmou seu caráter sódico. A condutividade hidráulica encontrada para o solo compactado, em estado natural (sem aditivo),foi de $3{,}39\times10^{-9}$ m/s. A adição de bentonita no teor de 4% reduziu a condutividade hidráulica para $2{,}75\times10^{-10}$m/s, valor aceitável no emprego como barreira mineral.

Quanto ao equipamento, pode-se apreciar seu adequado funcionamento, avaliado por meio do seu desempenho hidráulico e das análises dos efluentes gerados. Permitiu avaliar a retenção de íons inorgânicos na barreira mineral proposta e demais alterações físico-químicas dos efluentes.

Assim, o Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG agora conta com uma ferramenta para apoiar projetos de pesquisa e trabalhos acadêmicos de seus estudantes e pesquisadores na área de transporte de contaminantes no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo- análise granulométrica**, (MB 32) NBR 7181, Rio de Janeiro, Brasil, 1984, 13 p.

[2] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo- determinação do limite de liquidez,** (MB 30) NBR 6459, Rio de Janeiro, Brasil, 1984, 6 p.

[3] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas **Solo- determinação do limite de plasticidade,** (MB 31) NBR 7180, Rio de Janeiro, Brasil, 1984, 3 p.

[4] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo- grãos de solos que passam pela peneira de 4,8 mm- determinação da massa específica**, NBR 6508, Rio de Janeiro, Brasil, 1984, 3 p.

[5] ASTM. **Standard test methods for measurement of hydraulicconductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter**. D5084-03, 2003, 23 p.

[6] BASTOS, C. A. B.; SCHMITT, L. A.; VASCONCELLOS, S. M.; RABASSA, C .M.; PINTO, P. B. Estudo das propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico encontrado em barreira litorânea no sul do Rio Grande do Sul. In: **12º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**. Anais... ABGE/Porto de Galinhas (PE). 2008

[7] DANIEL, D. E. Case histories of compacted clay liners and covers for waste disposal facilities. In: 3rd **INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING**. Proceedings. 1993, St. Louis, MO., S. Prakash (ed.), p.1407-1425.

[8] DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. Water content density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1811-1830, 1990.

[9] DNER. Departamento Nacional de Estradas de RODAGEM. **Solos – Compactação em equipamento miniatura**, DNER-ME 228/94, 1994, 14p.

[10] FACÍOLA, R. C. **Migração de poluentes inorgânicos em linerscompostos**. (Dissertação de Mestrado), Departamento de Geotécnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos, 2009.

[11] GRUBER, N. L. S.; BARBOZA, E. G.; NICOLODI, J. L. Geografia dos sistemas costeiros e oceanográficos: subsídiospara gestão integrada da zona costeira. **Gravel**, Porto Alegre, n. 1, p. 81-89, 2003

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

[13] LUKIANTCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulicae na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. (Dissertação de Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos, 2007

[14] NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, Brasil, Ed. Villibor, 1995.

[15] SILVA, C. F. **Estudo sobre a influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e nas propriedades índices e mecânicas de solo litorâneo arenoso finolaterítico para emprego em barreiras minerais**. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande/RS, 2011

[16] TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, Porto Alegre, n. 3, p. 109-115, 2005