

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE MISTURAS SOLO-CIMENTO COMPACTADAS SUBMETIDAS À AÇÃO DE LIXIVIADOS ÁCIDOS

HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF COMPACTED SOIL-CEMENT MIXTURES SUBMITTED TO ACIDIC LEACHATES

**Rafael de Souza Tímbola¹, Dr. Pedro Domingos Marques Prietto², Dra. Rejane Nascentes³,
M.Sc. Eduardo Pavan Korf⁴**

^{1,2}Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo
E-mail: rafaeltimbola@hotmail.com; pdmp@upf.br.

³Universidade Federal de Viçosa. E-mail: rejanenascentes@yahoo.com.br

⁴Curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Passo Fundo. E-mail: eduardokorf@upf.br

RESUMO

O descarte inadequado de resíduos sólidos industriais e de mineração tem causado ao longo dos anos, contaminação do solo e das águas subterrâneas, principalmente pelo vazamento de lixiviados ácidos. Neste contexto, o presente trabalho avaliou o comportamento hidráulico de um solo residual argiloso compactado, com e sem adição de cimento Portland (0% e 2%), para utilização em barreiras impermeáveis (liners) de fundo em aterros de resíduos sólidos industriais e de mineração, quando submetidos à percolação de soluções ácidas. Um equipamento de coluna modificado, de parede rígida, foi utilizado na determinação da condutividade hidráulica. Os corpos de prova, moldados com duas energias de compactação diferentes, Proctor normal e Proctor modificado, foram percolados inicialmente com água destilada, até o regime de fluxo permanente, e posteriormente com uma solução de ácido sulfúrico até um limite de 15 volumes de vazios. A solução ácida utilizada foi preparada com uma concentração volumétrica de 2%, com o intuito de simular uma drenagem ácida de mineração. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que o aumento do peso específico de compactação e uma maior porcentagem de cimento favorecem a redução da condutividade hidráulica, tanto na fase de percolação com água destilada como durante a percolação ácida.

Palavras-Chave: Barreira Impermeável, Percolação ácida, Drenagem ácida de mineração, Ensaios de coluna, Condutividade hidráulica.

ABSTRACT

The inappropriate disposal of industrial and mining solid waste has caused over the years both soil and groundwater contamination, mainly by the leaking of an acidic leachate. In this context, the present study evaluated the hydraulic behavior of a compacted clayey residual soil, with and without the addition of Portland cement (0 % and 2 %), for use in bottom barriers (liners) in industrial solid waste landfills and mining disposal facilities, when subjected to the percolation of acidic solutions. A modified rigid wall column apparatus was used to determine the hydraulic conductivity. The specimens, which were molded with two different compaction energies, standard Proctor and modified Proctor, were initially percolated with distilled water, until the steady flow regime was reached, and later with a solution of sulfuric acid to a limit of 15 volumes of voids. The acid solution used was prepared with a concentration of 2 % by volume, in order to simulate an acidic mining drainage. From the results, it can be seen that increasing the compaction specific unit weight and using a higher percentage of cement promote the reduction of the hydraulic conductivity, both during percolation with distilled water and during the acid leaching.

Keywords: Liners, Acidic percolation, Acidic mining drainage, column tests, hydraulic conductivity.

1 INTRODUÇÃO

Resíduos perigosos tóxicos têm se tornado um dos maiores problemas ambientais em muitos países, principalmente na contaminação de sub-superfície do solo. As fontes de contaminação podem ser de vários tipos, como aterros sanitários, lagoas de decantação, pilhas e barragens de rejeitos, resíduos industriais, dentre outras (NASCENTES, 2006).

Um exemplo clássico desse tipo de contaminação são as águas provenientes da lixiviação das pilhas de rejeitos de mineração, também conhecidas como Drenagem Ácida de Mineração (DAM) e de resíduos industriais, as quais representam uma importante fonte de impacto ambiental, em decorrência da presença de metais tóxicos e de sua constituição ácida (KORF, 2011).

O maior agravante é que essas águas residuárias têm o seu principal destino sobre o solo, o qual não representa o ponto final das substâncias tóxicas presentes. Em muitos casos, essa disposição é realizada de forma inadequada ou acidental e não são implementadas técnicas de engenharia que proporcionem a adequada contenção e/ou tratamento dos poluentes.

Em aterros de disposição de resíduos ou em sítios contaminadas, afim de conter o avanço plumas de contaminantes, são necessários sistemas de impermeabilização de fundo que funcionam como barreiras impermeáveis de contenção da carga de poluentes. As barreiras impermeáveis são tecnologias de retenção de poluentes aplicadas *in-situ* e utilizadas com a finalidade de prevenção da propagação de líquidos contaminantes em sub-superfície (SHARMA e REDDY, 2004).

Os sistemas de barreiras impermeáveis requerem estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries, compatibilidade com os resíduos a serem aterrados e capacidade de estabilização de contaminantes (KORF, 2011). Segundo Knop (2007), no caso da disposição de resíduos sobre camadas compactadas de solo, as mesmas podem sofrer variação em sua compressibilidade, apresentando recalques mediante ao contato de resíduos agressivos quimicamente, como os de pH ácido.

Outra preocupação é com a lixiviação de metais e compostos presentes nos rejeitos de mineração. De forma geral, o extremo ácido de pH, característico da DAM, acarreta maior mobilidade de solutos no solo. Segundo Daniel (1993), valores baixos de pH podem favorecer o fluxo de contaminantes, de forma a promover a dissolução de materiais do solo. Além disso, LaGrega (1994), Elzahabi e Yong (2001), e Costa (2002) afirmam que ocorre aumento da mobilidade dos metais para baixos pH, devido ao aumento da solubilidade e redução da precipitação.

De acordo com Broderick e Daniel (1990), alguns compostos químicos tendem a causar a floculação das partículas de argila, devido ao encolhimento da dupla camada de íons existentes em volta destas, ocorrendo a redução no esqueleto do solo e a surgência de fissuras. Assim, a combinação destas reações, de floculação, fissuração e o encolhimento da dupla camada de íons, acarreta um aumento da condutividade hidráulica.

Segundo Sharma e Reddy (2004) as barreiras solo-cimento são uma alternativa utilizada para contenção de resíduos. Segundo o autor, a adição de cimento ao solo pode variar de 8% a 25%, podendo atingir condutividades hidráulicas de 10^{-9} m/s a 10^{-10} m/s. Por outro lado, Korf (2011) argumenta que a adição de cimento pode promover o aumento da permeabilidade, mas acrescenta um poder reativo à barreira.

De acordo com Korf (2011), uma barreira impermeável ideal seria aquela que proporcionasse uma adequada impermeabilização e um retardamento dos contaminantes que as permeiam, seja por difusão molecular ou por velocidades de percolação reduzidas. A seleção do material adequado e a utilização de tais barreiras dependem das condições do local e da natureza físico-química do contaminante.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi verificar o efeito que a adição de cimento, em amostras de solo moldadas em duas diferentes energias de compactação, sobre o valor da condutividade hidráulica, quando percoladas com água e com solução ácida, simulando uma Drenagem Ácida de Mineração (DAM).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Variáveis de estudo

As variáveis a serem investigadas no programa experimental e suas variações são apresentadas no Quadro 1. A variável de resposta foi à condutividade hidráulica.

Quadro 1: Variáveis de controle e seus níveis.

Variável de controle	Valores/ Faixa de Variação	
pH da solução contaminante	1,32	
Concentração Solução Contaminante – H_2SO_4 (%)	2	
Gradiente Hidráulico (percolação H_2O destilada)	50,00	
Gradiente Hidráulico (percolação ácida)	33,33	
Umidade de compactação (%)	26,00	
Tipo de cimento	CP-V	
Teor de cimento adicionado ao solo (%)	0,00	2,00
Peso específico seco de compactação (kN/m^3)	14,50	15,50

Foram ensaiados quatro corpos de prova, combinando os níveis adotados para as variáveis teor de cimento e peso específico de compactação. A Tabela 1 apresenta a identificação dos CPs e as variáveis.

Tabela 1: Níveis estudados.

Corpo de Prova	Peso específico seco (kN/m^3)	Teor de cimento adicionado (%)
CP1	15,50	0
CP2	15,50	2
CP3	14,50	0
CP4	14,50	2

2.2. Solo de estudo

O solo investigado é proveniente do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo em Passo Fundo – RS, localizado ao lado do Centro Tecnológico de Engenharia e Arquitetura. (CETEC). Trata-se de um solo residual de basalto, que apresenta classificação pedológica, segundo Streck (2008), de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico (unidade Passo Fundo).

As Tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, as características químicas básicas e a caracterização geotécnica do solo de estudo. A utilização deste solo na pesquisa se justifica em razão da sua adequação ao uso como barreira compactada e da sua predominância na região norte do Rio Grande do Sul.

Tabela 2: Resultados da análise química básica.

Parâmetro	Valor
pH H ₂ O	5,5
Índice SMP	5,4
Matéria Orgânica (%)	< 0,8
P (mg.kg ⁻¹)	4,0
K (mg.kg ⁻¹)	334,0
S (mg.kg ⁻¹)	33,0
Al (cmol _c .dm ⁻³)	1,7
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	0,5
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	0,3
H + Al (cmol _c .dm ⁻³)	8,7
CTC (cmol _c .dm ⁻³)	10,3
Saturação por bases (%)	16,0
Saturação por Alumínio (%)	51,0
Saturação por potássio (%)	8,3
B (mg.kg ⁻¹)	0,2
Mn (mg.kg ⁻¹)	9,0
Zn (mg.kg ⁻¹)	1,4
Cu (mg.kg ⁻¹)	2,5
Área Superficial Específica - ASE (m ² /g)	33,86

Tabela 3: Resultados de caracterização geotécnica do solo.

Parâmetro	Valor
Argila (%)	68
Silte (%)	5
Areia (%)	27
Limite de Liquidez (%)	53
Limite de Plasticidade (%)	42
Índice de Plasticidade (%)	11
Peso específico real dos grãos (kN.m ⁻³)	26,7
Umidade Natural (%)	34,0
Peso específico natural (kN.m ⁻³)	13,5

2.3. Equipamento de coluna modificado

O equipamento de coluna utilizado foi desenvolvido por Santos (2013). As Figura 1 e 2 apresentam o esquema de uma câmara de ensaio, de parede rígida, e uma visão geral do equipamento, nas quais se observa a possibilidade de aplicação de cargas estáticas verticais durante o ensaio e a capacidade para a realização simultânea e de forma independente de até seis ensaios.

O monitoramento dos ensaios é realizado de forma automatizada, em tempo real, através de um sistema de aquisição de dados (SAD) composto pela instrumentação, um módulo USB de aquisição de dados e um software que realiza a comunicação com o usuário. Maiores detalhes sobre o equipamento podem ser encontrados em Santos (2013).

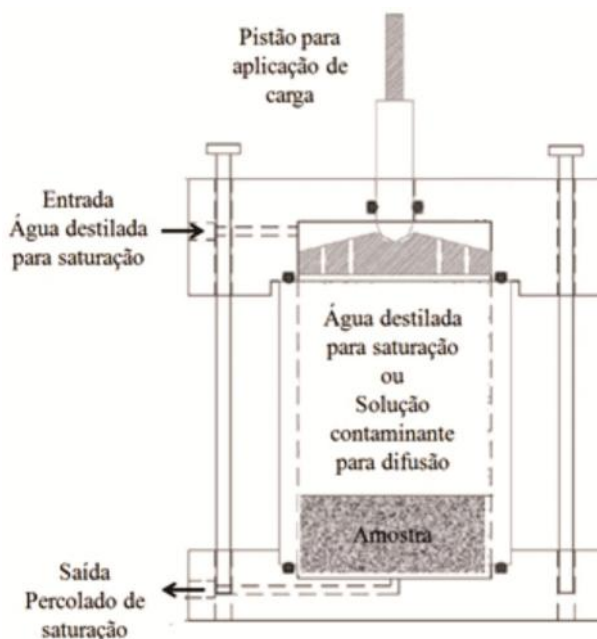


Figura 1: Equipamento de coluna modificado.
Fonte: Adaptado de Knop (2007).



Figura 2: Visão geral do equipamento utilizado.

2.4. Moldagem de corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova, com e sem a adição de cimento Portland do tipo CP-V, não teores de 0% e 2%, foi executada em três camadas diretamente nas câmaras do equipamento de coluna, com as dimensões nominais de 0,06m de altura e 0,07m de diâmetro.

Os parâmetros de compactação foram definidos a partir das curvas de compactação apresentadas na Figura 3, obtidas nas energias Proctor normal e Proctor modificado, para as misturas com e sem adição de cimento. Foram definidos, portanto, um teor de umidade constante de 26%,

próximo à umidade ótima na energia normal e à umidade ótima mais 2 % na energia modificada, e os valores correspondentes de peso específico seco ($15,5 \text{ kN/m}^3$ e $14,5 \text{ kN/m}^3$).

Após a moldagem e montagem da câmara de ensaio, os corpos de prova eram submetidos a um período de 48 horas de repouso (período de cura inicial no caso das misturas com adição de cimento).

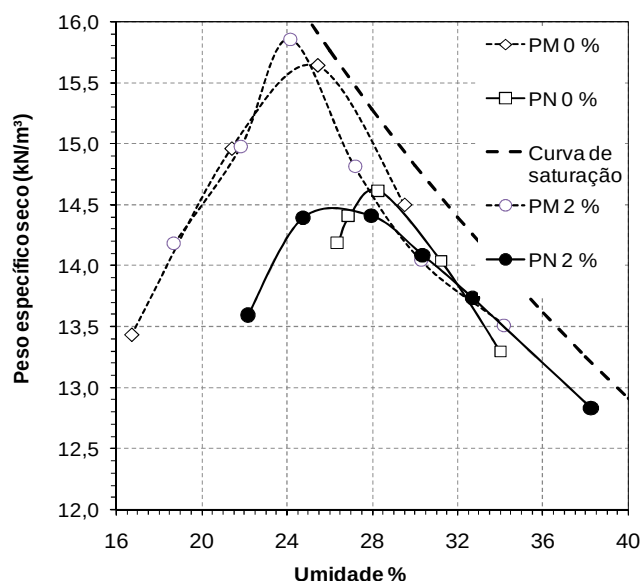


Figura 3: Curvas de compactação: Proctor normal e modificado.

As dimensões finais e os índices físicos para os quatro corpos de prova ensaiados são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Características dos corpos de prova ensaiados.

Variável	CP1	CP2	CP3	CP4
Densidade γ_d (kN/m^3)	15,45	14,46	15,19	14,53
Umidade (%)	25,49	25,89	25,47	25,22
Altura (mm)	60,59	60,32	61,63	60,40
Massa (g)	452,17	422,54	451,97	423,01
Índice de vazios (e)	0,73	0,85	0,76	0,84
Volume total (cm^3)	233,16	232,15	237,16	232,45
Porosidade (n)	0,42	0,46	0,43	0,46
Volume de Vazios ($V_v - \text{cm}^3$)	98,20	106,44	102,25	105,93
Grau de Saturação (%)	93,52	81,64	89,74	80,44

2.5. Preparo da solução contaminante

A solução contaminante utilizada em todos os ensaios foi preparada a partir da diluição em água destilada de ácido sulfúrico (H_2SO_4), da Marca Merck® 95 – 97 %, na concentração de 2% em volume. O pH médio da solução foi de 1,32.

2.6. Realização dos ensaios de coluna

Após a etapa de moldagem e o repouso/cura inicial por 48 horas, era iniciada a fase de saturação dos corpos de prova a partir da percolação de água destilada. Esta etapa teve a duração de 5 dias, tempo suficiente para o estabelecimento do regime de fluxo permanente; o volume percolado

nesta fase foi de aproximadamente 5 volumes de vazios e o gradiente hidráulico utilizado foi de 50, o que corresponde a uma carga hidráulica de 3 mca. Desta forma, o período total de cura para as amostras com adição de cimento foi de 7 dias.

Após a etapa de saturação, os corpos de prova eram submetidos à percolação da solução de ácido sulfúrico, sob um gradiente hidráulico de 33,33. A percolação ácida seguiu até que o volume percolado equivalesse a 15 volumes de vazios. A variação da condutividade hidráulica (k) ao longo do tempo de duração do ensaio foi determinada de acordo com a lei de Darcy (equação 1), a partir da medição dos volumes percolados ao longo do tempo, com o auxílio de uma proveta graduada de 100 mL. A condutividade hidráulica depende de fatores como densidade e viscosidade do líquido percolante, área superficial específica, porosidade, tortuosidade e grau de saturação do solo (SHARMA; REDDY, 2004).

$$Q = kiA \quad (1)$$

em que:

Q = vazão na secção de escoamento (volume/tempo);

k = coeficiente de condutividade hidráulica do solo/material (distância/tempo);

i = gradiente hidráulico (adimensional), e

A = seção transversal à direção do fluxo (área).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta a variação da condutividade hidráulica para os 4 corpos de ensaiados no programa experimental. A fase de percolação com água destilada se deu até 5 volumes de vazios percolados pelo corpo de prova. A fase de percolação ácida compreendeu os 10 volumes de vazios percolados durante o tempo restante dos ensaios.

A Tabela 5 apresenta os valores de condutividade hidráulica obtidos na fase de percolação com água destilada. Comparando-se os valores de condutividade hidráulica obtidos ao final desta fase (5 volumes de vazios percolados), observa-se que para os corpos de prova sem cimento, os valores de k foram sistematicamente menores do que aqueles observados para os corpos de prova com adição de cimento, para ambos os pesos específicos secos investigados. Para o peso específico de 14,50 kN/m³, houve um aumento de 2,06 vezes no valor da condutividade hidráulica com a adição de 2% de cimento. Para o peso específico de 15,50 kN/m³ esta diferença foi menor, com um aumento de 1,72 vezes. Comparando os dois pesos específicos secos investigados, a condutividade hidráulica foi 16,5% maior para o peso específico de 14,50 kN/m³.

Se comparados os valores médios, observa-se que há uma redução na condutividade hidráulica com o aumento do peso específico seco, tanto para os corpos de prova com e sem cimento. Observa-se uma redução de 8,94 vezes no valor de k para os corpos de prova sem cimento e de 10,68 vezes para os corpos de prova com 2% de cimento. Portanto, a adição de cimento resultou em uma redução de 16,29 % no valor da condutividade hidráulica para água, quando comparados corpos de prova com diferentes pesos específicos secos.

A Tabela 6 apresenta os resultados de condutividade hidráulica médios, mínimos, máximos obtidos na fase de percolação ácida.

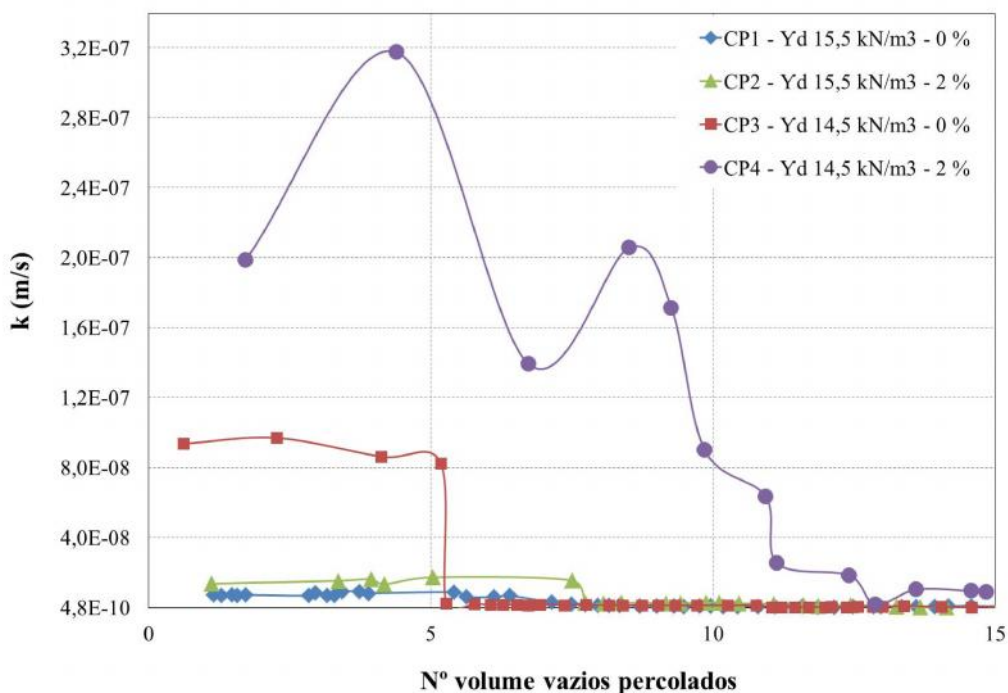


Figura 4: Condutividade hidráulica dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 5: Resultados para o parâmetro condutividade hidráulica da percolação com água.

Corpo de Prova	Peso específico seco (kN/m ³)	Teor de cimento (%)	Média (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	5 Volumes de Vazios (m/s)
CP1	15,50	0	8,20E-09	7,30E-09	9,76E-09	9,26E-09
CP2	15,50	2	1,57E-08	1,38E-08	1,78E-08	1,60E-08
CP3	14,50	0	9,02E-08	8,28E-08	9,74E-08	8,28E-08
CP4	14,50	2	2,07E-07	1,40E-07	3,18E-07	1,71E-07

Tabela 6: Resultados para o parâmetro condutividade hidráulica da percolação com DAM.

Corpo de Prova	Peso específico seco (kN/m ³)	Teor de cimento (%)	Média (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	15 Volumes de Vazios (m/s)
CP1	15,50	0	1,92E-09	8,01E-10	7,31E-09	1,02E-09
CP2	15,50	2	1,95E-09	2,48E-10	3,39E-09	4,81E-10
CP3	14,50	0	1,52E-09	5,82E-10	3,10E-09	7,72E-10
CP4	14,50	2	2,89E-08	2,25E-09	9,06E-08	9,31E-09

Para a percolação ácida, os valores médios de condutividade hidráulica praticamente não variaram com o peso específico seco, porém houve uma diminuição do valor médio de k quando adicionado 2% de cimento ao corpo de prova. Analisando os valores referentes ao término do ensaio, com 15 volumes de vazios percolados, os corpos de prova com peso específico de 14,50 kN/m³ apresentaram um valor de k 12,05 vezes maior com a adição de 2% de cimento. Para o peso específico de 15,50 kN/m³, no entanto, houve uma redução de 2,12 vezes no valor da condutividade hidráulica. Portanto, para a percolação ácida, a adição de cimento aumentou a condutividade hidráulica para o menor peso específico e reduziu a condutividade hidráulica para o maior peso específico.

Se comparados os valores médios, observa-se que há um aumento na condutividade hidráulica com o aumento do peso específico para os corpos de prova sem cimento. Para os corpos de prova com cimento, houve uma redução do coeficiente de condutividade médio com o aumento do peso

específico. Comparando o menor e o maior peso específico, verifica-se um aumento de 1,26 vezes no valor de k para os corpos de prova sem cimento. A mesma comparação para os corpos de prova com a adição de 2% cimento resultou em uma redução de k em 19,35 vezes.

Embora a condutividade hidráulica média tenha diminuído com o aumento do teor de cimento, a grande variabilidade observada nos resultados dos ensaios ainda não permite uma conclusão definitiva. No entanto, o comportamento é consistente com estudos anteriores de Lemos (2006) e Knop (2007), os quais mostraram que a adição de pequenas quantidades de cimento contribui para a redução da condutividade hidráulica em solos compactados, quando submetidos à percolação ácida.

Em relação à magnitude da condutividade hidráulica, é possível afirmar que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza e se enquadraram na faixa proposta por Daniel (1993) para barreiras compactadas ($< 10^{-9}$ m/s), principalmente quando se considera a fase ácida de percolação, na qual ocorreu a redução do índice de vazios do solo e a consequente redução da condutividade hidráulica a longo prazo. Segundo estudos de Bastos *et al.* (2008), que avaliou a permeabilidade de quatro materiais para uso em *liners* de aterros sanitários, os solos argilosos apresentam-se como os mais apropriados para a aplicação. Outros estudos desenvolvidos por Silveira *et al.* (2007) avaliaram a permeabilidade de um Latossolo Amarelo distrófico de Bacarena – PA e obtiveram valores da ordem de 10^{-10} m/s para o material compactado na energia Proctor normal e umidade ótima, o que garante a aplicação do solo como material de impermeabilização.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o efeito da adição de cimento e da variação do peso específico seco no comportamento hidráulico ao longo do tempo de misturas compactadas de um solo residual argiloso, com e sem a adição de cimento, quando submetidas à ação de percolados ácidos.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a condutividade hidráulica decresce de forma significativa com a inserção da solução ácida. O aumento do peso específico de compactação e a adição de cimento também favorece a redução da condutividade hidráulica, tanto na fase de percolação de água destilada, como na fase de percolação ácida.

É preciso salientar, no entanto, que os resultados obtidos são aplicáveis estritamente às condições experimentais definidas para o presente trabalho e que experimentos e análises adicionais devem ser realizados no sentido de corroborar ou generalizar as conclusões estabelecidas.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard Classification of Soils for Engineering Purposes:** D2487. Philadelphia. 1993. 11.p

BASTOS, C. A. B.; SOUZA, E. W.; CAMARGO, K. R. Avaliação da permeabilidade de solos compactados do litoral sul do rio grande do sul e adjacências para o uso como barreiras impermeáveis em obras de aterro de resíduos. In: 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA D ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2008, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco: ABGE, 2008. CD-ROM.

BRODERICK, G. P.; DANIEL, D. Stabilizing compacted clay against chemical attack. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, ASCE, v. 116, n. 10, p. 1549-1567, 1990.

COSTA, P. O. S. **Avaliação em laboratório, do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Sauípe/Ba.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DANIEL, D. E. *Clay liners*. In: **Geotechnical practice for waste disposal**. London: Chapman & Hall, 1993. p. 33-65.

ELZAHABI, M.; YONG, R. N. pH Influence on sorption characteristics of heavy metal in the vadose zone. **Engineering Geology**. v.60, p. 61-68, 2001.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico.** 2007. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KORF, E. P. **Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para aplicação em barreiras impermeáveis de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Meio Ambiente – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LAGREGA, M. D.; BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J. C. *Hazardous Waste Management*. **McGraw-Hill**, Inc. Singapore, p. 1146, 1994.

LEMOS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Viçosa, Viçosa, 2006.

SANTOS, V. C. **Equipamento de coluna para ensaio de condutividade hidráulica de longa duração com aplicação de carga vertical.** 2013. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo – RS, 2013.

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. 2004. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies**. New Jersey: John Wiley & Sons, p. 992.

SILVEIRA, R. N. P. O.; SOUZA, R. F. C.; BRAGA, R. M. Q. L.; BOSCOV, M. E. G.; COSTA, M. L. Estudo da Permeabilidade de uma Camada de Solo Compactado como Impermeabilização de Fundo de Bacias de Disposição da Lama Vermelha em Barcarena-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DO SOLO E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, 6., 2007, Vale do Itajaí. **Anais...** Vale do Itajaí: ABMS, 2008. CD-ROM.

STRECK, E. V. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre - RS: EMATER/RS, 2008. p. 222.

WOWK, G. I. T. H.; MELO, V. de F.; Avaliação do nível de chumbo, em solo de várzea, proveniente da reciclagem de baterias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 613-622, 2005.