

# AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UMA MISTURA COMPACTADA SOLO-CIMENTO COMO BARREIRA DE CONTENÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO

**Gabriel Crivellaro Gonçalves**

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental na Universidade de Passo Fundo  
[gabrielcrivellaro.g@gmail.com](mailto:gabrielcrivellaro.g@gmail.com)

**Juliana Garcez Grazziotin**

Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental na Universidade de Passo Fundo  
[juju.graz@hotmail.com](mailto:juju.graz@hotmail.com)

**Rafael de Souza Tímbola**

Pesquisador do curso de Mestrado em Engenharia da Universidade de Passo Fundo  
[rafaeltimbola@hotmail.com](mailto:rafaeltimbola@hotmail.com)

**Eduardo Pavan Korf**

Professor/pesquisador da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo  
[eduardokorf@upf.br](mailto:eduardokorf@upf.br)

**Resumo.** *O objetivo do ensaio foi avaliar, por meio de um ensaio piloto, o comportamento hidráulico de uma barreira compactada de solo-cimento ao longo do tempo, quando percolada por água destilada e solução contaminante ácida. Para tanto, foi realizado um ensaio piloto em amostras de solo-cimento compactadas, percoladas por solução contaminante de pH 1, contendo os metais dissolvidos em multiespécie. O ensaio piloto, o qual teve duração de aproximadamente 60 dias, demonstrou que a condutividade hidráulica apresenta decréscimo em consonância com o decréscimo do pH do contaminante e portanto, devido ao impacto do contaminante ácido sobre a barreira, em corpo de prova com 2 % de cimento. Possivelmente esse decréscimo ocorreu devido às reações de hidratação e contato com contaminante ácido agressivo com o produto cimentante, o qual ocasionou uma reestruturação e redução do índice de vazios da barreira.*

**Palavras-chave:** *Liner. Cimento. Águas residuárias.*

## 1. INTRODUÇÃO

Águas residuárias provenientes da lixiviação de resíduos industriais e de mineração são um problema quando têm sua disposição final realizada de forma inadequada, sem que proporcione contenção e tratamento dos poluentes, já que elas possuem em sua composição metais tóxicos e pH ácido.

Neste contexto, o aperfeiçoamento de soluções técnicas capazes de garantir a mitigação dos impactos ambientais assume caráter fundamental. Por exemplo, a execução de barreiras de solo compactado de baixa condutividade hidráulica ( $k$ ), que é uma técnica tradicional utilizada para limitar o transporte dos contaminantes através de impermeabilização lateral e de fundo, em locais de disposição de resíduos industriais e de mineração (SHARMA e REDDY, 2004). Além disso, a adição de cimento Portland a este tipo de barreira pode ser uma opção para a neutralização do pH e adsorção de metais de águas residuárias ácidas, buscando reduzir sua propagação para as águas subterrâneas. Porém, de acordo com diversos autores (BRODERICK e DANIEL, 1990;

HUECKEL et al., 1997; KNOP, 2007) a percolação com agentes químicos agressivos, como ácidos, pode afetar a estrutura dessas barreiras compactadas, proporcionando um resultado indesejado.

Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar, por meio de um ensaio piloto, o comportamento hidráulico de uma barreira compactada de solo-cimento ao longo do tempo, quando percolada por água destilada e solução contaminante ácida.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa faz parte de um programa de experimentos desenvolvidos em teses e dissertações de mestrado/doutorado. Por tanto, este artigo remete-se a um ensaio piloto, para a avaliação inicial de ensaios de condutividade hidráulica de longa duração.

O cimento adotado como agente de cimentação foi o Portland CP-V para melhorar o potencial reativo e mecânico do solo argiloso residual compactado.

### 2.1 Solo de estudo

O solo de estudo é um material residual de basalto característico da cidade de Passo Fundo-RS do horizonte B e possui classificação pedológica, segundo Streck et al., (2008), de um Latossolo Vermelho Distrófico húmico (unidade Passo Fundo). Estes solos são profundos, bem drenados e altamente intemperizados, tendo predomínio de caulinita e óxidos de ferro. A coloração vermelha confere baixa saturação por bases (<50 %) e elevado teor de Ferro (>18 %), o que os caracteriza como distroférico.

A caracterização química e geotécnica quanto aos índices físicos e granulométricos do horizonte B deste solo está apresentada na Tabela 1. Os resultados permitem verificar o baixo teor de matéria orgânica, o alto teor de argila, o pH ácido e baixas CTC e ASE, típico de solos com predominância de argilomineral caolinita.

Tabela 1. Caracterização geotécnica e

química do Solo em estudo.

Parâmetro	Valor
Argila (%)	67
Silte (%)	5
Areia (%)	28
Umidade Natural (%)	34,62
Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	16,30
Índice de Vazios	1,19
Grau de Saturação (%)	75,70
Porosidade (%)	54
pH (H <sub>2</sub> O)	5,00
Matéria Orgânica (%)	>0,80
CTC (cmolc/dm <sup>3</sup> )	12,50
Permeabilidade (m/s)	1,39x10 <sup>-5</sup>
ASE interna+externa (m <sup>2</sup> /g)*	33,86

\*Área Superficial Específica.

As características de compactação do solo utilizado para moldagem do corpo de prova (CP) foram determinadas segundo a energia Proctor Normal: peso específico seco máximo de 14,5 kN/m<sup>3</sup>, umidade ótima de 26 % e grau de saturação de 82,5 %.

### 2.2 Solução contaminante

A solução foi preparada em pH 1, com a adição de solução de ácido nítrico. Esta solução contaminante foi elaborada com o propósito de simular a drenagem ácida de mineração e lixiviado de resíduos industriais.

### 2.3 Equipamento

O equipamento utilizado é composto por uma câmara de ensaio de aço inoxidável, que funciona como um permeâmetro de parede rígida com fluxo descendente, permitindo a determinação da k conforme a lei de Darcy. O equipamento foi construído por Knop (2007) e seguiu os requisitos da norma ASTM D-4874 (ASTM 1995) com modificações, como ilustrado na Fig. 1.



Figura 1. Equipamento utilizado nos ensaios.

## 2.4 Ensaio de coluna

O corpo de prova foi moldado diretamente na câmara do equipamento de coluna, com as dimensões nominais de 0,06 m de altura e 0,07 m de diâmetro.

O teor de cimento CP-V utilizado foi de 2% em massa seca do CP, com a finalidade de verificar os efeitos desta adição nas variações na  $k$  e nas características reativas da barreira ao longo do tempo.

A realização do ensaio piloto foi dividida na etapa de saturação e percolação de contaminante. Na etapa de saturação observou-se os seguintes procedimentos básicos: (1) percolação de água destilada a partir de um reservatório de entrada pressurizado, construído em aço inox e conectado à parte superior da câmara de difusão; (2) aplicação de carga hidráulica equivalente a 20 kPa, (3) medição do volume de percolado em uma proveta graduada acoplada à parte inferior da célula de difusão, até atingir o regime de fluxo permanente. Para todos os testes realizados, o processo de saturação foi concluído em aproximadamente sete dias.

Após a percolação inicial com água destilada, a solução contaminante foi percolada ao longo de um período de aproximadamente 60 dias, com fluxo descendente sob pressão de 5 kPa, resultando em gradiente hidráulico de 8,33.

No líquido percolado foi monitorado o pH desde a etapa de saturação do corpo de prova.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra os resultados de condutividade hidráulica e pH obtidos.

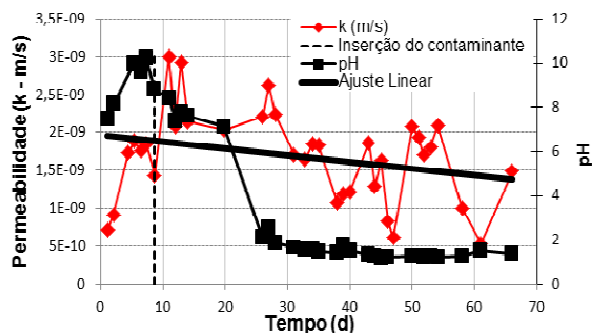


Figura 2. Monitoramento da condutividade hidráulica e pH do ensaio piloto de longa duração.

Analisando a Fig. 2, concluímos que durante a percolação inicial de água para saturação a  $k$  possui um aumento e o pH da solução tende à ter um aumento inicial decorrente do efeito neutralizador e carácter básico do cimento.

Observa-se que após o período de 20 a 30 dias os valores de  $k$  apresentam uma queda, que pode ser relacionada a inserção da solução ácida indicando ataque a estrutura do material. O ataque ácido, possivelmente ocasiona a redução do peso específico e a consequente redução da  $k$ .

Os resultados observados no ensaio piloto são corroborados na literatura em que afirma que a percolação de contaminantes ácidos altera a condutividade hidráulica das barreiras que contenham adição de cimento, podendo ocasionar no aumento dependendo do teor adicionado e redução, em decorrência das reações de hidratação ao longo do tempo. De maneira geral, com a permeação de contaminantes líquidos ácidos pelas amostras, os autores relatam sensíveis reduções na  $k$  para as amostras que continham material cimentante, devido à contínua hidratação do cimento e estabilização ao fim das reações (PEIRCE e WITTER, 1986; ZHANG et al., 2004; LEMOS, 2006; KNOP, 2007; KORF, 2011).

#### 4. CONCLUSÕES

O ensaio piloto realizado demonstrou que a condutividade hidráulica apresenta decréscimo em consonância com o decréscimo do pH do contaminante devido ao impacto do contaminante ácido sobre a barreira. Possivelmente esse decréscimo ocorreu devido às reações de hidratação e contato do contaminante ácido com o produto cimentante, o qual ocasionou uma reestruturação e redução do índice de vazios da barreira.

O tempo de condução deste ensaio piloto possibilitou entender que a permeabilidade pareceu estabilizar após 40 dias de ensaio e provavelmente se utilizará de um período de 40 a 60 dias para condução dos ensaios futuros do programa experimental vinculados à esta pesquisa.

#### *Agradecimentos*

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento ao CNPq e FAPERGS pelo apoio financeiro concedido ao grupo de pesquisa (processos 480565/2009-0, 486340/2011-2 e 11/2041-4).

#### REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM **Standard Test Method for leaching solid material in a Column: D4874**. Apparatus. Philadelphia. 1995. 7 p.

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

HUECKEL, T.; CHAWLA, V.; IMPERIALI, P. Transport Through a Clay Barrier with the Contaminant Concentration Dependent Permeability. **Transport in Porous Media**, v. 29, 1997. p. 159-178.

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 (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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 (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PIERCE, J. J.; WITTER, K. A. Termination criteria for clay permeability testing. **ASCE, Journal of Geotechnical Engineering**, v. 112, n. 9, 1986. p. 841-854.

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.

STRECK, Edmar Valdir et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre - RS: EMATER/RS, 2008. p. 222.

ZHANG, K.; CHEN, Y.; DENG, F.; TIAN, Q. Retention of clay-solidified grouting curtain to Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and Hg<sup>2+</sup> in landfill of municipal solid waste. **Journal Century South University Technology**, v. 11, n. 4, 2004.