

## CAPACIDADE DE ATENUAÇÃO DO CÁDMIO NO SOLO DA ETE ARAUCÁRIAS EM PASSO FUNDO – RS

CADMIUM ATTENUATION CAPACITY IN SOIL OF ARAUCÁRIAS SEWAGE TREATMENT  
STATION IN PASSO FUNDO - RS

Márcio Felipe Floss<sup>1</sup>, Eduardo Korf<sup>2</sup>, Pedro Alexandre Varella Escosteguy<sup>3</sup>, Antônio Thomé<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Geotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. E-mail: mfloss@gmail.com

<sup>2</sup>Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UPF, Passo Fundo – RS. E-mail: eduardokorf@gmail.com

<sup>3</sup>Professor/Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UPF, Passo Fundo – RS.  
E-mail: escosteguy@upf.br

<sup>4</sup>Professor/Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UPF, Passo Fundo – RS. E-mail: thome@upf.br

### RESUMO

O acréscimo significativo da população e do consumo ocasiona o aumento do volume de esgoto gerado, bem como os riscos de contaminação do solo devido à disposição do efluente em contato com o meio. Assim, torna-se necessário conhecer o comportamento da pluma de contaminação no interior do solo. Neste estudo optou-se por avaliar a migração do cádmio no solo de uma ETE, por apresentar uma alta toxicidade para os animais. Para este estudo foram realizados ensaios de batelada e de difusão, os quais resultaram no coeficiente de distribuição  $k_d$  igual a  $4,41 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . Através de análise numérica, os resultados mostraram que, mesmo após 500 anos, a pluma de contaminação estará em níveis superficiais, com a concentração de  $0,005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de cádmio. Dessa forma, conclui-se que a migração do cádmio avança lentamente, caracterizando-se uma ótima atenuação do contaminante no solo.

**Palavras-Chave:** Atenuação natural. Metais tóxicos. ETE. Transporte de contaminantes.

### ABSTRACT

The representative addition of the population and consumption causes an increase in the volume of sewage generated, as well as the risks of soil contamination due to disposal of sewage in contact with the medium. Thus it is necessary to know the behavior of the plume of contamination in the ground. In the case of contaminant migration study in the soil, the most harmful to the environment, are toxic metals present in the sewage. The high level of cadmium toxicity to animals, and the possibility of containing in the sewage, it was decided to study it. To obtain the parameters of contaminant mobility were conducted tests of batch and diffusion. The analyses of the batch test resulted in the distribution coefficient  $k_d$  equal of  $4.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1}$ . The analyses of the diffusion test showed a low diffusion of plume evolution of contamination. Therefore, the analyses show that the migration of the contaminant in the ground moves slowly.

**Keywords:** Natural attenuation, toxic metals, contaminant transport

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação da retenção de metais pelo solo tem sido alvo constante de pesquisas realizadas ao redor do mundo. Esta prática se deve muito ao fato do crescimento populacional mundial acentuado. Da mesma forma, cresce a taxa de consumo *per capita*, ocasionando a geração de elevados volumes

de resíduos, como por exemplo o esgoto. Assim, cresce a necessidade de construção de estações de tratamento de esgoto (ETE), bem como a necessidade de avaliação dos níveis de concentração de contaminantes em contato com o solo das estações.

No ano de 2006 foi inaugurada a Estação de Tratamento de Esgotos Araucárias no município de Passo Fundo, no intuito de coletar o esgoto da região central do município, abrangendo aproximadamente 20% da rede de esgoto. Porém, no projeto executivo da estação de tratamento não foi previsto nenhum sistema de proteção quanto à infiltração do esgoto através do solo de fundo das lagoas da ETE; somente foi utilizado solo de regularização topográfica do fundo das lagoas. Esse fato coloca em risco de contaminação o solo e, conseqüentemente, a água subterrânea. Outro fator é que a ETE se encontra em uma região de banhados e nascentes, o que, em períodos de chuvas, ocasiona o afloramento do lençol freático.

Em casos de estudo de migração dos contaminante em solos em que o alvo está longe das fontes de contaminação, o fator mais nocivo ao meio ambiente são os metais tóxicos presentes no esgoto sanitário. Embora esses metais não sejam característicos do esgoto doméstico, estão presentes no esgoto devido às pequenas indústrias, que acabam lançando seus efluentes na rede coletora de esgoto doméstico.

Conforme Nuvolari (2003), quando os metais são ingeridos por seres vivos, podem ser transportados para outros animais através da cadeia alimentar. No caso de seres humanos, os metais tóxicos podem causar sérios riscos à saúde. Entre os metais mais nocivos aos animais e que podem se encontrar no esgoto se destaca o cádmio. Dentre os problemas que o cádmio pode provocar, Dias et al. (2003) apontam a anemia, hipertensão, enfisema pulmonar, disfunções gástricas e intestinais como as mais preocupantes.

Dessa forma, é importante conhecer as reações do contaminante em contato com o solo e prever o comportamento da pluma de contaminação através dos fenômenos de transporte do contaminante. A análise eficaz deste transporte depende das propriedades do contaminante e do tipo de solo que se pretende estudar. Conhecendo-se as propriedades físicas e químicas de ambos, bem como a interação entre o contaminante e o substrato, é possível prever o comportamento do soluto no interior do solo e, assim, projetar corretamente as barreiras impermeáveis de solo.

Conforme Rowe (1987), os fenômenos básicos que controlam o transporte de contaminantes através de solos com baixa permeabilidade são o fluxo do líquido induzido pela pressão, difusão do contaminante no líquido pela concentração e a interação entre o líquido e o solo através de vários mecanismos, sendo geralmente relacionado à concentração ou a um gradiente.

De acordo com Machado et al. (2003), o transporte de contaminante no interior do solo ocorre através de diversos fenômenos, tornando-se muito complexo o efeito da mobilização e atenuação do contaminante no solo. Essa ação ocorre através de processos físicos e químicos. O primeiro processo caracteriza-se pela movimentação física do contaminante no meio poroso. A interação solo-contaminante é característica do processo químico de transporte do contaminante.

Segundo Boscov (1997), existem seis categorias de reações químicas que podem alterar a concentração do poluente no solo: reações de adsorção-dessorção, reações ácido-base, reações de dissolução-precipitação, reações de oxirredução, pareamento de íons ou complexação e síntese microbiana. Entretanto, as reações químicas que prevalecem nos problemas geotécnicos relativos ao transporte de contaminante são as de adsorção e dessorção de íons e moléculas na superfície das partículas de solo.

O objetivo deste estudo é avaliar a capacidade de atenuação do cádmio presente no esgoto sanitário pelo solo do fundo da lagoa anaeróbia da ETE Araucária por meio de ensaios de batelada e de difusão. Os resultados deste estudo serão utilizados para avaliar a capacidade de retenção do metal cádmio pelo solo e para conhecer o comportamento da migração do contaminante no solo através de simulação numérica.

## 2 MÉTODOS E MATERIAIS

### 2.1 Solo

A ETE Araucárias situa-se nas margens na BR-285, próxima ao bairro José Alexandre Zácchia, no município de Passo Fundo/RS. A estação possui uma rede de quatro lagoas, sendo a primeira anaeróbia, a segunda facultativa e as demais de maturação (Figura 1).



Fonte: Alves (2005)

Figura 1. ETE Araucárias

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o solo da área de aterro da lagoa anaeróbia da ETE Araucária. Foram retiradas amostras deformadas de solo na profundidade de 0,30 m em valas escavadas manualmente. A análise granulométrica foi realizada seguindo a NBR 7180 (ABNT 1984). Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 2.

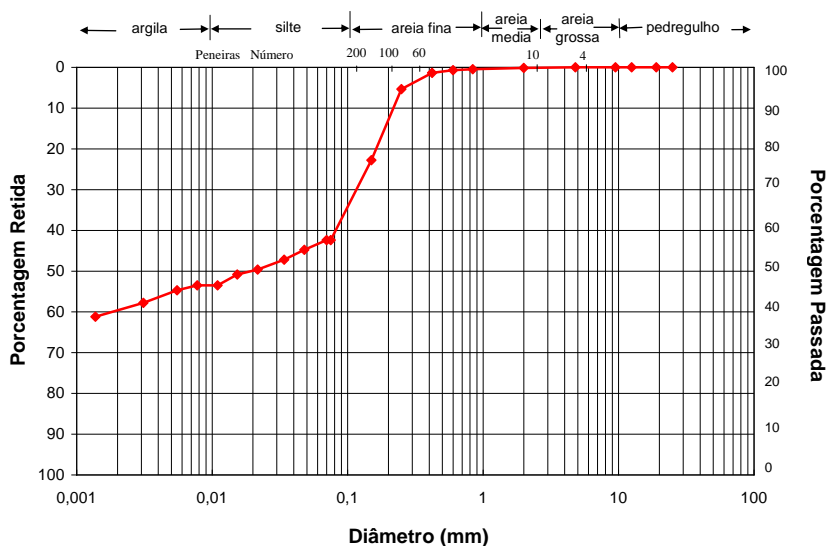


Figura 2. Distribuição granulométrica do solo

Os ensaios de limite de consistência resultaram no limite de plasticidade do solo em 18,4%;

limite de liquidez em 38,4% e índice de plasticidade em 20%. O peso específico real do solo resultou em 27,1 kN/m<sup>3</sup>.

O solo da ETE foi classificado, por meio da classificação unificada (SUCS), como CL, caracterizando-se em uma argila pouco plástica e, pela classificação HRB (Highway Research Board), como A-6, ou solo argiloso.

Os resultados da análise básica e de micronutrientes do solo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise básica e de micronutrientes do solo

Característica	Valor	Ref. Cetesb
pH	4,5	
M.O.	<0,8 %	
Al	3,2 cmol/L	
Ca	0,6 cmol/L	
Mg	0,5 cmol/L	
H+Al	10,9 cmol/L	
CTC	12,1 cmol/L	
Cd	N.D. *	
Mn	17,46 mg/kg	-
Zn	1,35 mg/kg	60 mg/kg
Cu	1,35 mg/kg	35 mg/kg

\*N.D. – Não detectável pelo método  
Ref.: Cetesb (2005)

## 2.2 Esgoto

O esgoto foi coletado na estação de bombeamento de recalque para a ETE. Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise químico-física do esgoto.

Embora não apresente traços de cádmio, preferiu-se estudá-lo em decorrência do grau de periculosidade no metal, no caso de contaminação do meio ambiente e também pelos animais. Para o estudo foi realizado o enriquecimento do esgoto com cádmio na proporção de cem vezes o valor de concentração limite de intervenção em água subterrânea estabelecido pela Cetesb (2005), que é de 0,005 mg.L<sup>-1</sup>. Portanto, a concentração de Cd na solução contaminante foi de 0,5 mg.L<sup>-1</sup>. A proporção de cádmio definida justifica-se pela dificuldade em obter os resultados das análises químicas em água ou esgoto em concentrações baixas, a fim de se verificar a concentração do metal nas soluções.

Tabela 2. Características químicas e físicas do esgoto

Característica	Valor
DQO	410 mg/L O <sup>2</sup>
DBO5	128 mg/L O <sup>2</sup>
Ferro	0,47 mg/L
Zinco	0,02 mg/L
Manganês	0,03 mg/L
Cobre	0,02 mg/L
Cromo	N.D.* mg/L
Chumbo	N.D.* mg/L
Cádmio	N.D.* mg/L
Sólidos Suspensos	172 mg/L
pH	7,84

\*N.D. – Não detectável pelo método

### 2.3 Ensaio de batelada

O ensaio de batelada foi realizado para extrair os valores de kd necessários para realização da análise numérica do transporte do cádmio pelo solo. A opção por esse método justifica-se pela rápida obtenção dos dados. Basicamente, o ensaio é realizado misturando-se a solução contaminada com o solo em estudo e colocados para agitar por um período de 24 horas; após, determina-se a quantidade de poluente que ficou sorvido nas partículas.

Para a realização do ensaio foi colocada uma porção de solo para secar ao ar, após ter sido destorroado e passado na peneira 2 mm ou #10 (ASTM) e então colocado para secar na estufa à temperatura de 45 °C.

Foram preparadas cinco soluções do contaminante, nas concentrações de 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7 mg.L<sup>-1</sup> de cádmio, e ainda o branco, constituído apenas de água destilada. O preparo do contaminante foi realizado a partir de uma solução padrão de 1.000 mg.L<sup>-1</sup> do metal, realizando-se diluição em balões volumétricos de 2.000 mL. A proporção de solo:contaminante foi de 1:5, sendo adicionados 10g de solo para 50 mL da solução em um snap-cap.

Para a execução do ensaio foram preparadas cinco repetições para cada concentração e mais o branco, totalizando trinta amostras. Todas as amostras foram submetidas à agitação durante 24 horas ininterruptas, à rotação de 300 rpm. Após esse período, as amostras ficaram em repouso para a decantação das partículas de solo. De cada amostra foram retirados cerca de 15 mL da fração líquida não turva, submetida à análise de concentração do contaminante que não foi sorvida pelo solo através de absorção atômica.

Após as análises, calcula-se a sorção de contaminante pelo solo e plotam-se os dados relacionando a sorção em função da concentração de equilíbrio, conforme a Equação 1. Dessa forma, calcula-se o valor de kd pelo coeficiente angular da curva.

$$S = \frac{(C_o - C_{eq}) \times V_{cont}(L)}{m_{solo}(kg)} \quad (1)$$

## 2.4 Ensaio de difusão

O ensaio na câmara de difusão foi realizado em três cilindros de paredes rígidas em aço inox, com diâmetro de 10 cm e 30 cm de altura. Em cada cilindro foi moldado um corpo-de-prova de 5 cm de altura e, após, o cilindro foi completado com água destilada para a saturação do corpo-de-prova. Logo após a saturação, a água restante foi retirada e, em seguida, adicionou-se 1 L de solução de cádmio com concentração de 0,5 mg.L<sup>-1</sup>.

Em um dos cilindros foi instalada uma bomba para aeração, com o objetivo de manter a agitação da solução durante 24 horas diárias; em outro, instalou-se a bomba durante 10 minutos antes de cada retirada de amostra da solução e, no terceiro cilindro, deixou-se a solução em total repouso, até o fim do ensaio, o qual durou 15 dias para os três cilindros paralelamente, conforme metodologia proposta por Barone et al. (1988). A diferença para cada cilindro se deve ao fato de verificar a necessidade de agitação da solução.

Ao final do ensaio, cada corpo-de-prova foi desmoldado e cortado a cada 1 cm de altura para análise de absorção por difusão do cádmio pelas partículas de solo. As amostras de solo foram digeridas por meio do método 3050B da USEPA (1996) e, da mesma forma que a solução coletada de solução, foram analisadas por espectrofotômetro de absorção atômica. Após análise, pode-se conhecer o coeficiente de difusão molecular do solo em estudo em caso de contaminação pelo metal cádmio.

## 2.5 Análise numérica de migração do contaminante através do solo

O *software* Ctran/W, da Geo-Slope International, é um programa de elementos finitos utilizado para realizar a modelagem do transporte de contaminante através de meio poroso, como o solo. Com o CTRAN/W podem-se desenvolver análises desde o simples transporte da partícula do contaminante através do solo como envolvendo processos de difusão, dispersão e adsorção. Para realizar as análises com o CTRAN/W é necessário utilizar, em conjunto, o *software* SEEP/W, também da GEO-SLOPE, para esquematizar a geometria do terreno. (KRAHN, 2004).

Para a realização da análise numérica da migração do contaminante através do solo foram esquematizados geometricamente os ensaios de coluna com advecção e a câmara de difusão com o uso do *software* SEEP/W.. Após, com o CTRAN/W foi realizada a análise do transporte de contaminantes no solo por meio da retroanálise dos ensaios. Esses resultados são importantes para a validação do estudo e posterior uso na análise da migração do contaminante *in situ*.

Com o Seep/W foram inseridas as características da geometria do corpo-de-prova e a caracterização do solo, condutividade hidráulica, granulometria e porosidade. Após, com o uso do Ctran/W foram analisados os fatores de dispersão e difusão, necessários para se conhecer o transporte de contaminante.

Primeiramente, foi realizada a análise paramétrica de dispersão, fixando-se os valores de adsorção obtidos por meio do ensaio de batelada e o valor de difusão, fixado com dados da literatura, utilizando-se Do igual a 7.10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup>/s, conforme Shackelford (1989); Shackelford e Daniel (1991), referente ao coeficiente de difusão do íon Cd<sup>2+</sup> diluídos em água em solução livre. A obtenção do parâmetro de dispersão  $\alpha$  foi realizada para um ciclo de 15 dias de interação solo-contaminante, variando o  $\alpha$  de 1.10<sup>-3</sup> a 1.10<sup>+3</sup> cm.

Na etapa seguinte da análise numérica utilizaram-se os resultados do ensaio de difusão para

encontrar o valor de difusão do Cd no solo. Para isso, fixou-se o valor de dispersão encontrado na análise paramétrica de dispersão e foram inseridos os resultados das análises das soluções de cádmio retiradas a cada dois dias de cada cilindro e os valores de concentração de cádmio a cada centímetro de profundidade dos corpos-de-prova.

Por último, a análise da migração da pluma de contaminação foi realizada, utilizando-se os parâmetros de dispersão igual a  $1.10^{-3}$  cm e o coeficiente de difusão igual a  $7.10^{-6}$   $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ . Realizaram-se análises correspondentes a 1, 5, 50 e 500 anos.

### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

#### 3.1 Ensaio de batelada

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de batelada para as cinco amostras contaminadas com cádmio e a amostra sem contaminação (branco).

Tabela 3. Análise de concentração de equilíbrio das amostras de batelada

Amostra	Conc. Inserida (mg.L <sup>-1</sup> )	Concentração de Equilíbrio (mg.L <sup>-1</sup> )		
		Média	D.P.	C.V.
Branco	0	0	0	0 %
Co1	0,35	0,02	0	0 %
Co2	0,46	0,04	0	0 %
Co3	0,57	0,052	0,004	7,69 %
Co4	0,69	0,092	0,0098	10,65 %
Co5	0,84	0,1175	0,0043	3,69 %

D.P. – Desvio padrão

C.V. – Coeficiente de variação

O cálculo de sorção de cádmio pelo solo é apresentado na Figura 3, onde se percebe um comportamento de isoterma linear.

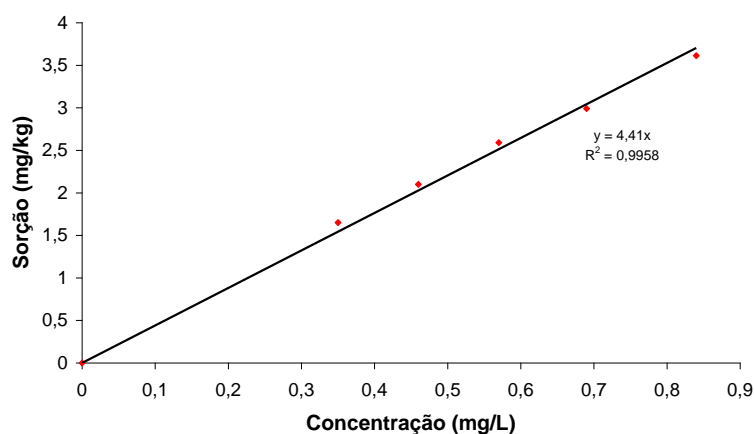


Figura 3. Resultado do Ensaio de Batelada

A equação do gráfico proporciona também encontrar o coeficiente de sorção de cádmio pelo solo,  $k_d = 4,41 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , bem superior ao valor mínimo apresentado pela USEPA (1999), de  $1 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$  para pH entre 3 e 5.

O solo em estudo, por apresentar um teor elevado de argila e ser classificado como um solo argiloso, caracteriza-se, portanto, por apresentar uma área específica maior em torno de suas partículas; assim, apresenta uma capacidade maior de acumular os íons do contaminante, atraídos pela carga oposta do material argiloso.

### 3.2 Ensaio de difusão

As análises das amostras de solução contendo 50mL e coletadas de cada cilindro são apresentadas na Tabela 4 e na Figura 4.

Tabela 4. Concentrações das amostras coletadas das soluções, CP 1, CP 2 e CP 3

Tempo dias	Concentração ( mg/L)		
	CP 1	CP 2	CP 3
1	0,71	0,48	0,68
3	0,64	0,29	0,46
5	0,55	0,24	0,45
7	0,51	0,23	0,36
9	0,54	0,22	0,32
10	0,44	0,21	0,29
12	---	0,18	0,26
14	---	0,17	0,25
15	---	0,16	0,21

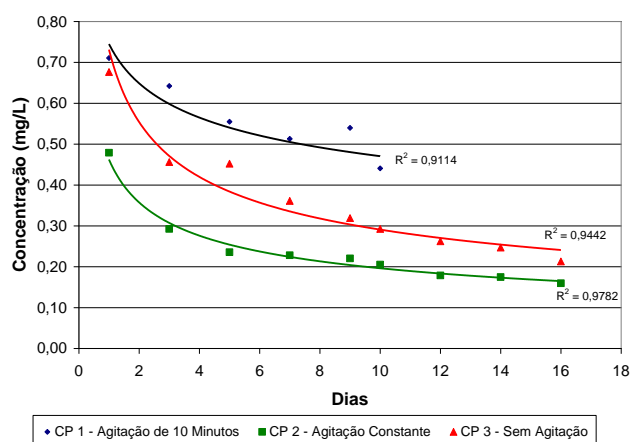


Figura 4. Análise da solução da câmara de difusão para os CP 1, CP2 e CP3



As amostras foram coletadas próximo do corpo-de-prova. Por isso, as concentrações dos CP 1 e 3 foram elevadas, pois a agitação não foi suficientemente capaz de homogeneizar a amostra, ocorrendo a precipitação do cádmio sob o corpo-de-prova. Dessa forma, torna-se necessária a agitação constante da solução.

A análise do corpo-de-prova ao longo da profundidade apresentou concentração apenas na parte superior deste, como pode ser verificado pelos resultados da Figura 5. No corpo-de-prova com agitação de 10 minutos (CP 1) não foi possível analisar o solo, pois, ao ser retirado, o CP se quebrou.

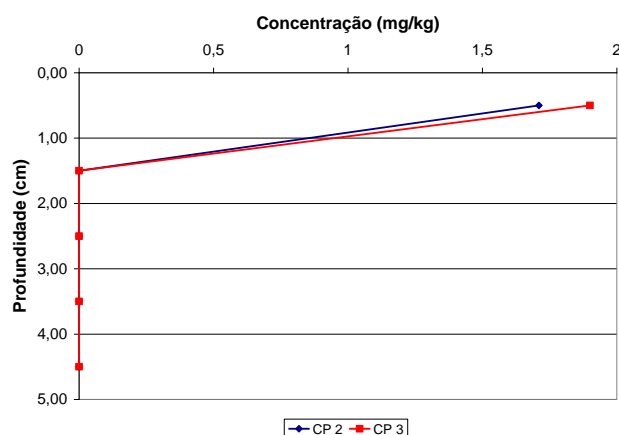


Figura 5. Variação da concentração de cádmio ao longo do corpo-de-prova no ensaio de difusão

Os resultados mostram apenas concentração na primeira camada do corpo-de-prova, apresentando concentração de  $1,71 \text{ mg.kg}^{-1}$  no CP 2 com agitação constante e  $1,90 \text{ mg.kg}^{-1}$  no CP 3 sem agitação. Com base nesses resultados, comprova-se mais uma vez a necessidade de agitação da amostra, pois no corpo-de-prova sem agitação, havendo maior concentração de cádmio na solução, propiciou-se uma maior facilidade da migração do contaminante por diferença de concentração. Este fato se caracteriza pelo processo de difusão molecular, ou seja, como há concentração maior na solução, haverá concentração maior no corpo-de-prova.

### 3.3 Análise numérica

A análise da migração da pluma de contaminação ao longo do tempo por períodos de 1, 5, 50 e 500 anos está apresentada nas Figuras 6 a 9.

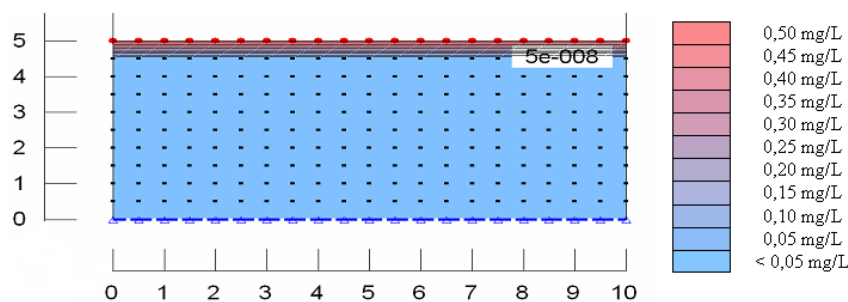


Figura 6. Migração da pluma de contaminação após um ano, em cm

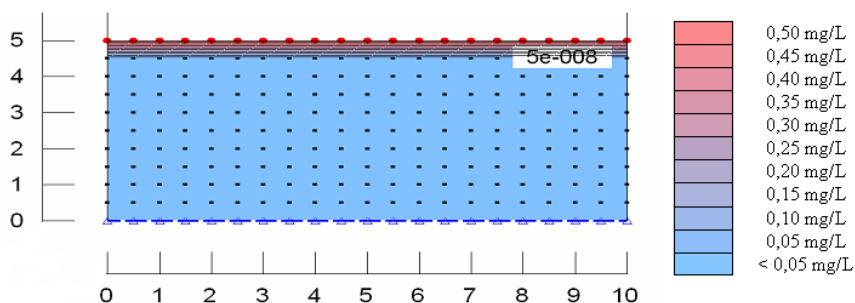


Figura 7. Migração da pluma de contaminação após cinco anos, em cm

No período compreendido de um a cinco anos, a pluma de contaminação manteve-se na camada superior do solo, apresentando concentração de  $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$  de cádmio a, aproximadamente, 0,5 cm da camada superficial do corpo-de-prova.

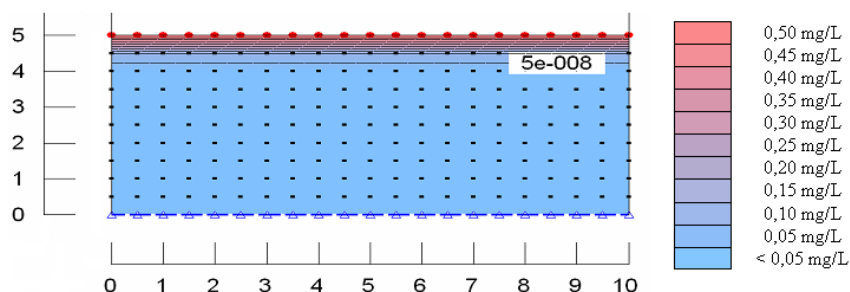


Figura 8. Migração da pluma de contaminação após cinquenta anos, em cm

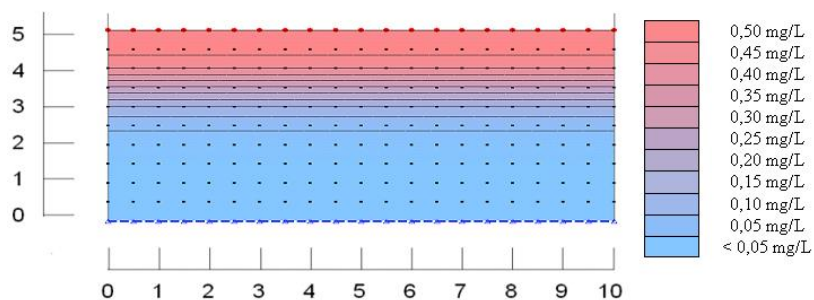


Figura 9. Migração da pluma de contaminação após quinhentos anos, em cm

Na análise de migração após cinquenta anos, a pluma apresentou um avanço da frente de contaminação, porém ainda muito curto, apresentando a concentração de  $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$  na camada superior de 1 cm de profundidade.

Já na análise após quinhentos anos, pode-se perceber um avanço maior da pluma, porém a concentração de  $0,05 \text{ mg/L}$ , representativa a dez vezes superior ao limites impostos pela Cetesb (2005) para águas subterrâneas, encontra-se na camada de 2,5 cm de profundidade do corpo-de-prova. Constata-se que o avanço da pluma de contaminação, mesmo em períodos longos, nos quais os institutos e fundações de proteção ao meio ambiente analisam as condições ambientais, a pluma de contaminação não entraria em contato com o lençol freático, que está em profundidades muito maiores que os 5 cm analisados no corpo-de-prova. Em suma, destaca-se a elevada capacidade de atenuação da concentração de cádmio pelo solo da Estação de Tratamento de Esgoto Araucárias.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados do ensaio de batelada foram considerados como um alto índice de adsorção de cádmio pelo solo.

Os ensaios de difusão apresentaram a necessidade de agitação constante da solução para homogeneizar a concentração dos íons de cádmio e não ocorrer a precipitação deste no fundo do reservatório. Na análise do solo ao longo da profundidade, apresentou-se concentração de cádmio apenas na camada superior do corpo-de-prova.

Com base nesses dados, pode-se prever uma baixa velocidade na migração da pluma de contaminação, devendo ser certificado após a realização de ensaios de coluna e/ou câmara de difusão, para a obtenção do parâmetro de difusão molecular.

## AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, G. P. M. *Capacidade de atenuação do solo do fundo da lagoa anaeróbia da ETE de Passo Fundo / RS*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.
- BARONE, F.S. et. al. Effect of multiple contaminant migration on diffusion and adsorption of some domestic waste contaminants in a natural clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, Canadá, v. 26, p. 189-198, 1988.
- BOSCOV, M. E. G.. *Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos*. 1997.Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Decisão de diretoria N° 195 - Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005*. São Paulo: Cetesb, 2005.
- DIAS, N.M.P. et al. Energia livre da reação de adsorção de cádmio em latossolos acrícos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, n. 5, 829-834, 2003.
- KRAHN, J. *Transport Modeling with CTRAN/W: an engineering methodology*. Calgary, Canadá: GEO-SLOPE International, 2004.
- MACHADO S. L. et al.. Contaminação por metais pesados em Santo Amaro da Purificação – BA – Ensaio de coluna e parâmetros hidráulicos de um solo residual expansivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL. 5. 2003: REGEO. ABMS: Porto Alegre, 2003.

NUVOLARI, A. O lançamento in natura e seus impactos. In: \_\_\_\_\_. (Coord.). *Esgoto sanitário*. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

ROWE, R.K. Pollutant transport through barriers. In: WOODS, R.D. (Ed.) *Geotechnical practice for waste disposal*. ASCE, EUA, 1987.

SHACKELFORD, C.D. *Diffusion of contaminants through waste contaminant barriers*. Transportation Research Record, EUA, n. 1219, 1989.

SHACKELFORD, C.D.; DANIEL, D.E. *Diffusion in saturated soil*. I: Background. *Journal of Geotechnical Engineering*, EUA, v. 117, n. 3, 467-484, 1991.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Method 3050B – Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils*. Estados Unidos: EPA, 1996.

\_\_\_\_\_. *Understanding variation in partition coefficient,  $k_d$ , values*. Estados Unidos: EPA, 1999.