



Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal

of Applied Science

ISSN: 1980-993X

ambi-agua@agro.unitau.br

Universidade de Taubaté

Brasil

Astoni Moreira, Débora; Aparecido Martinez, Mauro; Rodrigues de Souza, José Antonio; Teixeira de Matos, Antonio; Reis, César; Barros, Flávia Mariani

Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de metais pesados em resíduos da construção civil e demolição

Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 5, núm. 2, 2010, pp. 77-86  
Universidade de Taubaté  
Taubaté, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92815026009>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de metais pesados em resíduos da construção civil e demolição (doi:10.4136/ambi-agua.138)**

**Débora Astoni Moreira<sup>1</sup>; Mauro Aparecido Martinez<sup>2</sup>; José Antonio Rodrigues de Souza<sup>2</sup>; Antonio Teixeira de Matos<sup>2</sup>; César Reis<sup>2</sup>; Flávia Mariani Barros<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG

E-mail: deboraastoni@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa - UFV

E-mail: mmauro@ufv.br; jarstec@yahoo.com.br; atmatos@ufv.br; cesar@ufv.br

<sup>3</sup>Universidade do Sudoeste da Bahia - UESB

E-mail: mariamariani@yahoo.com.br

### **RESUMO**

Considerando-se a possibilidade da utilização de resíduos da construção civil, (RCC) como “barreira química” para poluentes em aterros sanitários, objetivou-se estudar a influência do RCC nos parâmetros de transporte dos metais pesados contidos no percolado (chorume + águas pluviais infiltradas) produzido por RSU\_Fresco. Para isso, foram utilizados RCC em três frações granulométricas (0,5 a 1; 2 a 4 e 4 a 7,5 mm) e percolado nas concentrações média de 0,146 mg L<sup>-1</sup> de Cu, 0,046 mg L<sup>-1</sup> de Cd, 17,2 mg L<sup>-1</sup> de Zn e 0,135 mg L<sup>-1</sup> de Pb. Os resultados mostraram que os fatores de retardamento dos metais pesados no RCC seguiram a seguinte sequência de magnitude Pb>Cu>Zn>Cd; o aumento na fração granulométrica do RCC resultou em menores valores do fator de retardamento.

**Palavras-chave:** chorume; metais pesados; mobilidade de miscíveis.

### **Retardation factors and dispersion-diffusion coefficients of heavy metals in construction and demolition waste**

### **ABSTRACT**

Considering the possibility of using the construction and demolition waste (CD) as “chemical barrier” to pollutants in landfill, the influence of the CD in the parameters of the transport of heavy metals in the leachate (leached + rainwater infiltrated) produced by urban solid waste newly collected was investigated. For this, three size fractions of CD (0.5 to 1; 2 to 4 and 4 to 7.5 mm) were used and leachate in the average concentrations of 0.146 mg L<sup>-1</sup> for Cu, 0.046 mg L<sup>-1</sup> of Cd, 17.2 mg L<sup>-1</sup> Zn and 0.135 mg L<sup>-1</sup> Pb. The results enabled to conclude that the magnitude of the retardation factors for the metals followed the sequence: Pb>Cu>Zn>Cd; the increase in granulation fractions in BD resulted in smaller retention factor.

**Keywords:** landfill leachate; heavy metals; miscible displacement.

### **1. INTRODUÇÃO**

A presença de camada de resíduo da construção civil (RCC) na base das pilhas de resíduos sólidos urbanos (RSU), em aterros sanitários, pode funcionar como barreira química para metais pesados presentes no percolado (Sousa et al., 2002; Carvalho et al., 2006). Por essa razão, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de conhecer a capacidade do RSU estabilizado e RCC em remover metais pesados do percolado de aterro sanitário (Carvalho,

Os resíduos da construção civil são constituídos, segundo Angulo et al. (2003), em cerca de 90% (massa/massa) por frações de natureza mineral (concreto, argamassa, rocha, solo e cerâmicas). Lima (1999), ao analisar a constituição química do RCC, concluiu que os compostos de maior abundância são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{CaCO}_3$ . Sabe-se que o produto que contém como “princípio ativo” óxido, hidróxido, carbonato ou silicato de cálcio e/ou magnésio pode ser utilizado na correção de acidez (Amaral e Anghinoni, 2001), sendo, portanto, útil na neutralização da acidez de solo ou de líquidos.

Em amostras de solo coletadas abaixo das células-base do Aterro Sanitário de Belo Horizonte, onde o RSU foi depositado sobre uma camada de RCC, Sousa (1998) encontrou menores concentrações de metais pesados do que nas amostras de solo coletadas em áreas que não receberam esse resíduo. Esse fato foi atribuído ao alto pH (9,0) ocorrente no RCC, o que torna esse resíduo capaz de reter grande quantidade de metais, por precipitação ou adsorção. O autor recomendou, então, o uso do RCC como material a constituir a base de pilhas de RSU, podendo, inclusive, substituir a calagem, prática recomendável na criação de barreira química para contaminantes em aterro sanitário.

A mobilidade dos íons no meio poroso pode ser avaliada por meio de técnicas baseadas em deslocamento de fluidos miscíveis e recursos computacionais. A determinação do fator de retardamento ( $R$ ) pode ser feita, indiretamente, por meio de realização de ensaios de adsorção “em lote”, obtendo-se as isotermas de adsorção, ou, diretamente, a partir de análise da curva de efluente, obtidas em colunas de lixiviação (Matos, 1995). Para Valocchi (1984), o fator de retardamento representa a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante, sendo, por essa razão, uma variável de grande importância na estimativa do deslocamento de íons no solo.

Como existe pouca informação a respeito do comportamento de metais pesados ao percolarem em camada de RCC, objetivou-se, com a realização deste trabalho, determinar os fatores de retardamento e o coeficiente dispersivo-difusivo dos metais Cu, Cd, Pb e Zn em resíduos da construção civil.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Solo e Resíduos Sólidos, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. O resíduo da construção civil (RCC) foi coletado em área de disposição de entulhos, da obra de construção do Departamento de Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

A composição do RCC utilizado era uma mistura de brita, areia, concreto, argamassa, tijolos cerâmicos e blocos de concreto, restos de madeira, caixas de papelão, ferro e plástico. O material foi triturado, peneirado e separado em três frações granulométricas (0,5 a 1 mm, 2 a 4 mm e 4 a 7,5 mm).

A caracterização física e química do RCC foi constituída das seguintes análises: massa específica do resíduo e da partícula (EMBRAPA, 1997), pH em água (1:2,5), concentração dos metais (Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, Mg, Mn, Fe e Cr) e determinação do poder de neutralização.

O percolado de resíduo sólido urbano recém-coletado (RSU-Fresco) foi produzido, utilizando-se uma caixa de fibra de vidro, com capacidade de 10.000 L, a qual foi preenchida com RSU, coletado na cidade de Viçosa, MG. Os resíduos foram despejados no interior do reservatório e compactados, manualmente, com a ajuda de soquete de madeira. No fundo do reservatório foram instalados tubos de drenagem, cobertos por telas plásticas de 1,0  $\text{cm}^2$  de malha, os quais eram conectados a tubulações de PVC, que conduziam o percolado para um reservatório de 1.000 L. Para garantir disponibilidade de percolado em períodos não chuvosos, periodicamente era aplicado água na parte superior da caixa.

Para avaliação da capacidade do resíduo da construção civil em reter os metais contidos no percolado gerado por RSU\_Fresco, foi adotada a metodologia de ensaios de mobilidade em colunas de lixiviação, apresentada por Matos (1995).

Na confecção das colunas de lixiviação foram utilizados tubos de PVC com 4,7 cm de diâmetro e 20,0 cm de comprimento, cujas paredes internas foram cobertas com uma mistura de cola e areia, a fim de impedir o escoamento preferencial, nesse local. Na extremidade inferior das colunas, foram dispostos um disco de lã de vidro e uma tela plástica, para impedir a perda de material sólido.

Cada coluna foi preenchida com um único tipo de resíduo avaliado. Esse preenchimento foi realizado, com auxílio de um funil de haste longa, formando-se camadas de dois centímetros de espessura, que foram compactadas, utilizando-se um êmbolo de menor diâmetro, e colocadas de forma sucessiva até a coluna de material atingir 15 cm de altura. Dessa forma, procurou-se proporcionar a mesma massa específica quantificada, utilizando-se o método da proveta (EMBRAPA, 1997), obtendo-se uma coluna homogênea e evitando a ocorrência de fluxo preferencial dentro da coluna de resíduo. Sobre a coluna de resíduos, foi disposto um disco de lã de vidro, de modo a evitar turbilhonamento do percolado e formação de selamento da superfície deste.

As colunas de resíduos foram saturadas com água deionizada, promovendo-se, assim, a expulsão de bolhas de ar que pudesse obstruir o fluxo da solução nos poros. Essa saturação foi feita por capilaridade, colocando-se as colunas dentro de um recipiente contendo água, cujo nível era de, no mínimo, dois terços da altura da coluna de resíduos, por um período de 72 horas.

Após a saturação, as colunas foram acondicionadas em estruturas de madeira, para sua sustentação, iniciando-se, então, a aplicação de água deionizada, com o auxílio de frascos de Mariotte. Após a infiltração de toda a água deionizada, que se encontrava sobre a coluna de resíduos, iniciou-se a aplicação de percolado.

O sistema foi montado de modo a aplicar, simultaneamente em todas colunas preenchidas como a mesma granulometria do resíduo, a água deionizada (testemunha) e as diferentes soluções percolantes. O percolado foi aplicado em sua condição normal, ou seja, nas concentrações de 0,146 mg L<sup>-1</sup> de Cu, 0,046 mg L<sup>-1</sup> de Cd, 17,2 mg L<sup>-1</sup> de Zn e 0,135 mg L<sup>-1</sup> de Pb e em concentrações de 5 e 25 vezes à da concentração normal. Os percolados “sintéticos” foram aplicados para que se pudesse avaliar o comportamento dos metais no RCC quando presente em diferentes concentrações no percolado.

Para obtenção das curvas de eluição, os efluentes foram coletados em frascos de numeração sequenciada e volumes conhecidos, para que se pudesse acompanhar a variação na concentração dos metais e do volume do efluente, até a obtenção de, no mínimo, 15 volumes de poros (VP) (Matos et al., 1999).

O volume de poros foi calculado empregando a Equação 1.

$$V_p = \alpha V = \pi r^2 h \left( 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \quad [1]$$

em que,

V<sub>p</sub> - volume de poros, cm<sup>3</sup>;

V - volume da coluna de resíduo, cm<sup>3</sup>;

α - porosidade, cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>;

r - raio interno da coluna, cm;

h - espessura da coluna de resíduo, cm;

ρ<sub>s</sub> - massa específica do resíduo, g.cm<sup>-3</sup>; e

ρ<sub>p</sub> - massa específica das partículas do resíduo, g.cm<sup>-3</sup>.

Nos efluentes, foram determinadas as concentrações de Cu, Cd, Zn e Pb, por espectrofotometria de absorção atômica, e os valores das concentrações médias foram relacionados ao do volume total de efluente drenado. De posse da correlação entre os dados de concentração relativa C/C<sub>0</sub> (relação entre a concentração do metal no efluente e a concentração no percolado aplicado) e o volume de poros, além do fluxo, massa específica do resíduo, teor de água e comprimento da coluna, foram obtidos os fatores de retardamento (R) e o coeficiente dispersivo-difusivo (D), utilizando-se o programa computacional DISP 1.1 (Borges Júnior e Ferreira, 2006).

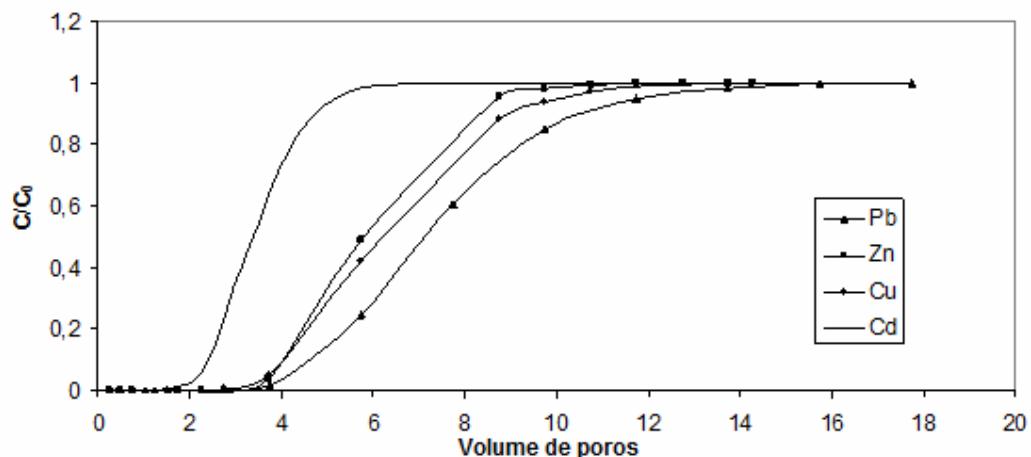
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físicas e químicas do RCC estão apresentadas na Tabela 1. O RCC apresentou o valor de pH alto, devido aos compostos químicos presentes na amostra, principalmente Ca(OH)<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub>. O poder de neutralização (PN) foi 28,5 dag kg<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>. Dessa forma, 100 kg do RCC apresenta o mesmo potencial reativo que 28,5 kg de CaCO<sub>3</sub>. Na amostra de RCC estão presentes elementos não essenciais, essenciais e alguns metais pesados.

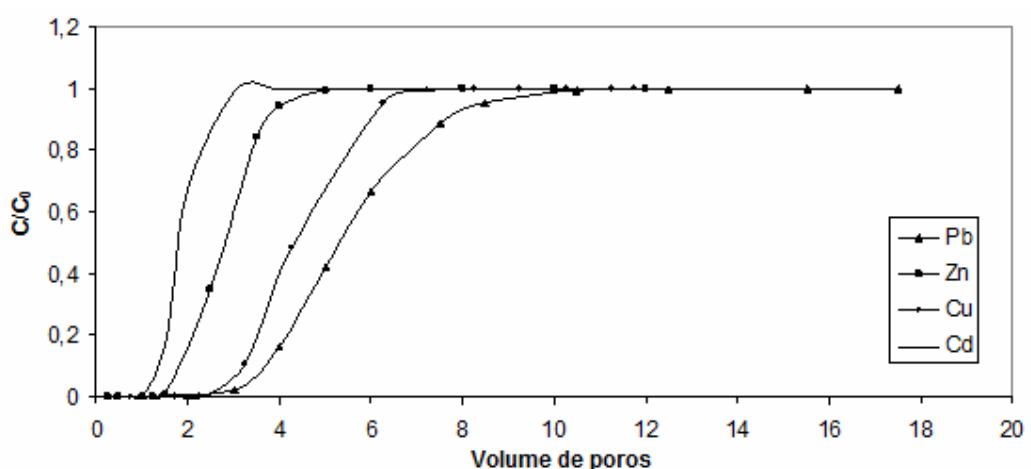
**Tabela 1.** Características físicas e químicas do RCC.

Características	Valores
Massa específica (g cm <sup>-3</sup> )	1,17
Massa específica da partícula (g cm <sup>-3</sup> )	2,60
pH	9,1
Poder de neutralização (dag kg <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	28,5
Massa específica (g cm <sup>-3</sup> )	1,17
Massa específica da partícula (g cm <sup>-3</sup> )	2,60
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	2,68
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	14,80
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	41,80
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	10.053,11
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	18,37
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	392,63
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	18,30
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	12,62
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,00

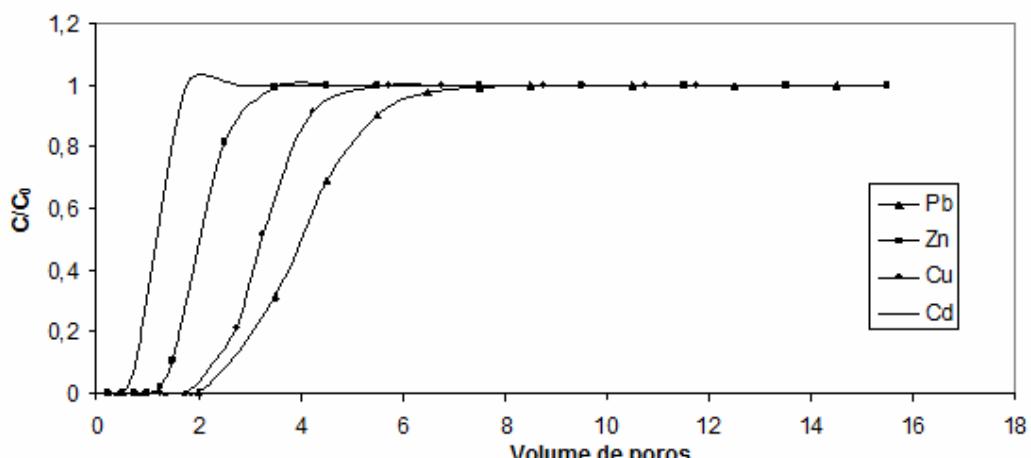
As curvas de efluente do cádmio, chumbo, cobre e zinco, nas três frações granulométricas do RCC (0,5 a 1 mm, 1 a 2 mm e 4 a 7,5 mm), quando o material foi submetido à aplicação de percolado na sua concentração normal (valores médios) desses metais no percolado de aterro sanitário, é 5 e 25 vezes mais concentrados. Aos resultados obtidos foram ajustados modelos teóricos, utilizando-se, para isso, o programa computacional DISP 1.1 (2006) e estão apresentadas nas Figuras 1 a 9.



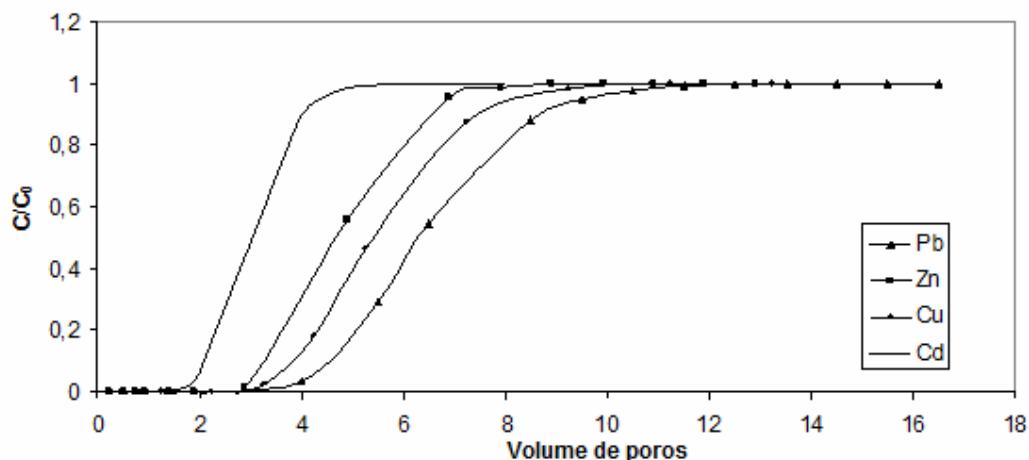
**Figura 1.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado na sua concentração normal em RCC na fração granulométrica de 0,5 a 1 mm.



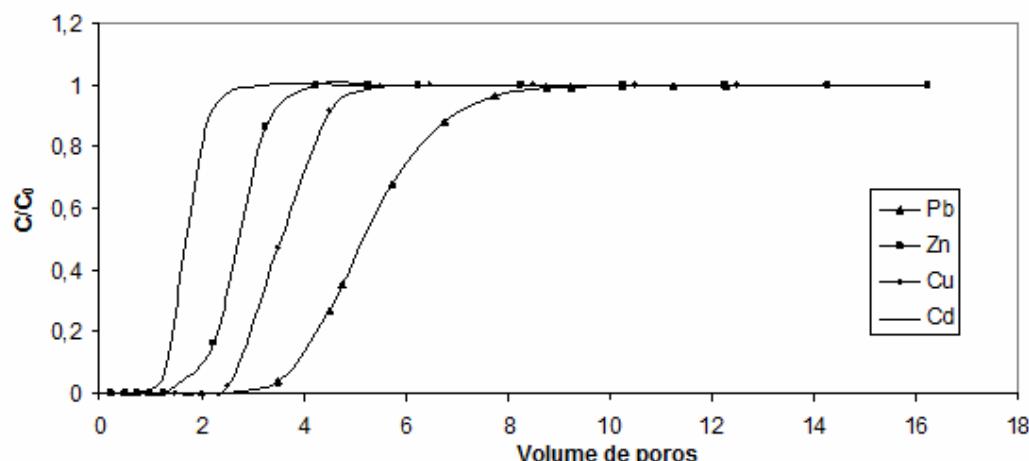
**Figura 2.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado sintético, 5 vezes mais concentrado, em RCC na fração granulométrica de 0,5 a 1 mm.



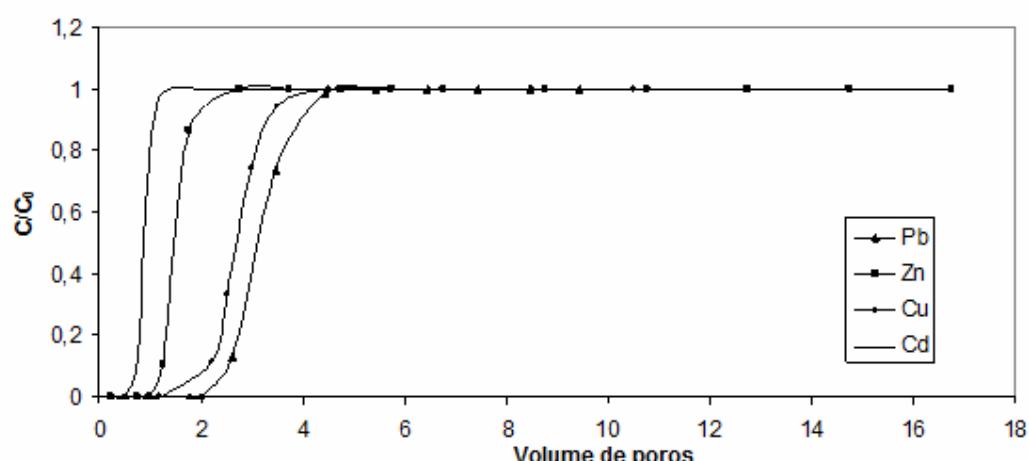
**Figura 3.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado sintético, 25 vezes mais concentrado, em RCC na fração granulométrica de 0,5 a 1 mm.



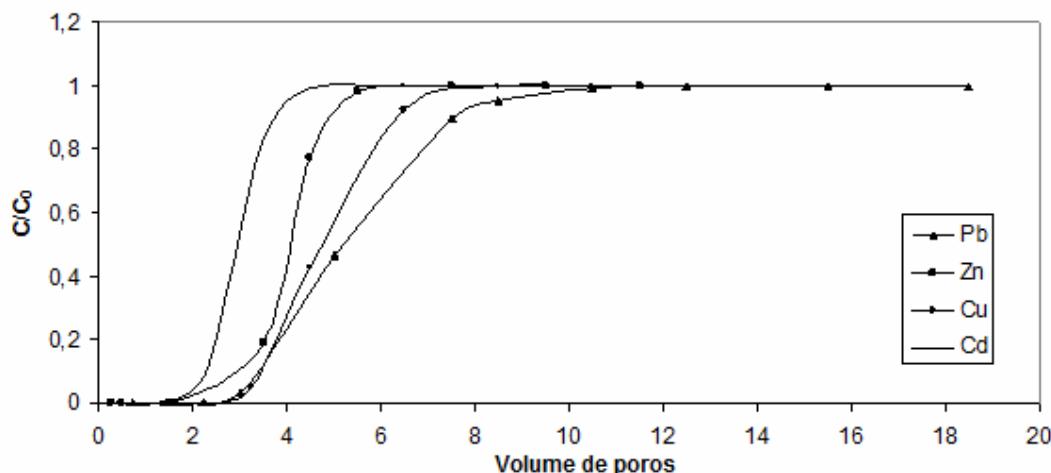
**Figura 4.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado na sua concentração normal em RCC na fração granulométrica de 2 a 4 mm.



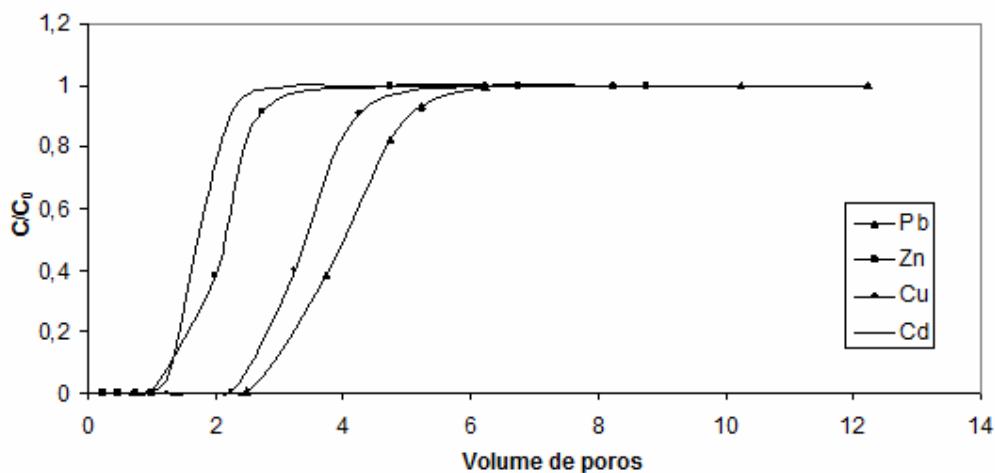
**Figura 5.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado sintético, 5 vezes mais concentrado, em RCC na fração granulométrica de 2 a 4 mm.



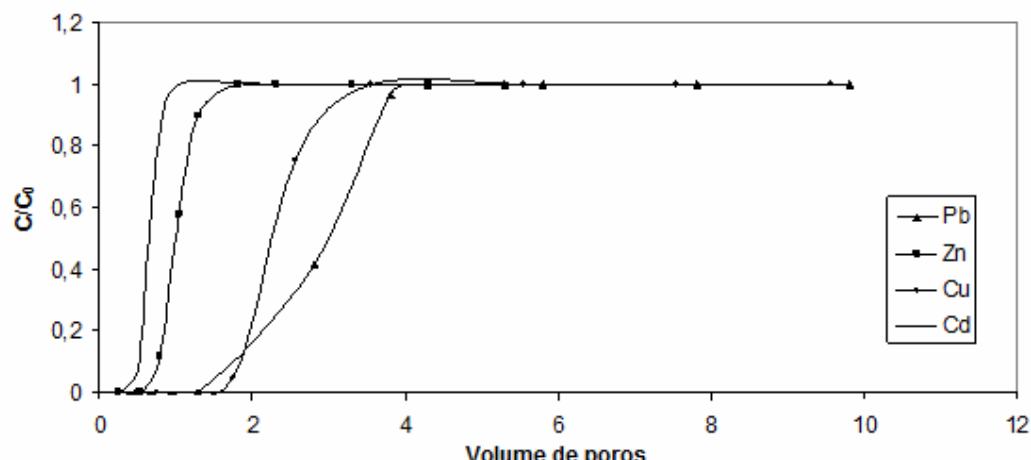
**Figura 6.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado sintético, 25 vezes mais concentrado, em RCC na fração granulométrica de 2 a 4 mm.



**Figura 7.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado na sua concentração normal em RCC, na fração granulométrica de 4 a 7,5 mm.



**Figura 8.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado sintético, 5 vezes mais concentrado, em RCC na fração granulométrica de 4 a 7,5 mm.



**Figura 9.** Curvas de efluente de chumbo, cobre, zinco e cádmio obtidas com a aplicação de percolado sintético, 25 vezes mais concentrado, em RCC na fração granulométrica de 4 a

Na Tabela 2 estão apresentados os valores do número de Peclet, do fator de retardamento e dos coeficientes de dispersão-difusão do cádmio, chumbo, cobre e zinco nas três frações granulométricas de RCC estudadas.

Lima (1999), analisando a constituição química do RCC, concluiu que os compostos de maior abundância são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{CaCO}_3$ . Considerando-se que esses compostos químicos podem se dissociar em meio aquoso, proporcionando, além de aumento no pH do meio, a formação de hidróxidos com os metais, acredita-se que as remoções dos metais, ocorreram devido à presença deles no RCC. Segundo Dal Bosco et al. (2004), a remoção de metais de efluentes aquosos tem sido feita, na maior parte das vezes, pela precipitação com  $\text{CaO}$ , composto que está presente em grandes concentrações no RCC. A reação desses compostos, com os metais em solução pode proporcionar a precipitação deles como hidróxidos, sendo, dessa forma, removidos do percolado, o que pode ser verificado pelo alto valor obtido para o fator de retardamento (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores médios do número de Peclet, fator de retardamento (R) e coeficiente dispersão - difusão (D,  $\text{cm}^2 \text{ h}^{-1}$ ) do cádmio, chumbo, cobre e zinco para o RCC nas três frações granulométricas.

Fração granulométrica do RCC	Percolado*	Metais											
		Pb			Cu			Zn			Cd		
		Peclet	R	D									
0,5 a 1 mm	1	20,34	7,48	38,89	20,91	6,40	37,64	32,62	5,97	26,34	27,95	3,49	32,92
	2	23,64	5,51	38,62	48,33	4,41	23,55	33,60	2,82	27,17	31,14	1,86	19,22
	3	23,62	4,09	30,20	49,47	3,20	14,42	34,02	2,07	20,97	69,11	0,96	10,32
2 a 4 mm	1	30,53	6,52	34,07	29,30	5,55	35,50	39,48	4,89	26,34	164,27	3,00	18,33
	2	38,50	5,31	25,72	65,75	3,60	17,40	62,71	2,72	27,17	47,41	1,73	22,26
	3	78,08	3,16	20,93	69,94	2,73	23,37	97,84	1,51	20,92	92,52	0,90	17,76
4 a 7,5 mm	1	21,35	5,37	40,19	39,01	4,81	22,00	82,08	4,06	10,46	53,25	2,97	16,11
	2	55,52	4,04	20,61	68,83	3,44	14,25	55,55	2,16	17,66	52,81	1,78	18,57
	3	88,49	2,93	12,67	77,84	2,32	14,68	51,16	1,02	22,36	60,17	0,67	19,01

\*Percolado com concentração médias dos metais (1), 5 vezes a concentração média desses metais no percolado (2) e 25 vezes a concentração média desses metais no percolado (3).

Na Tabela 2, verifica-se que a diminuição do tamanho das partículas do RCC (menor granulometria) proporcionou aumento no fator de retardamento, fazendo com que as curvas de eluição, para um mesmo metal, se deslocassem para a direita. Como o fator de retardamento (R) depende das interações entre as fases líquida e sólida que ocorreram durante a percolação da solução na coluna contendo RCC, maiores valores de R são esperados para menores granulometrias, em virtude da maior interação íon-colôide e menor velocidade de avanço.

Menores valores de R no RCC foram obtidos com aumento da concentração dos metais no percolado. Aumentando-se a concentração dos metais no fluido deslocador, mais rapidamente os sítios de adsorção serão saturados e, consequentemente, menores valores de R são obtidos. A sequência de interação entre os metais presentes no percolado e o RCC ( $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd}$ ), nas três frações granulométricas, foi a mesma obtida para os RSUs, sendo o chumbo o metal com maior valor de R.

Também, na Tabela 2, pode-se observar que o Cd, na maior concentração, apresentou valores de R inferiores aos da unidade. Segundo Ferreira (2003), isso indica que apenas uma fração da fase líquida participa do processo de transporte de soluto, ocorrendo exclusão catiônica.

A sequência de valores de D dos metais, nas três frações granulométricas do RCC, foram

MOREIRA, D. A.; MARTINEZ, M. A.; SOUZA, J. A. R.; MATOS, A. T.; REIS, C.; BARROS, F. M. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de metais pesados em resíduos da construção civil e demolição. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 77-86, 2010. ([doi:10.4136/ambi-agua.138](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.138))

---

Em relação ao número de Peclet (P), observam-se, em todas as frações granulométricas do RCC foram obtidos valores superiores a 10 e inferiores a 100, o que indica, segundo Gonçalves (2007) e Sun (1995), ter ocorrido transporte de soluto predominantemente por dispersão mecânica.

## 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste experimento, conclui-se que:

- Os fatores de retardamento dos metais, quando percolado nas três frações granulométricas do RCC, seguiram a seguinte sequência: Pb>Cu>Zn>Cd;
- O aumento na granulometria proporcionou menores valores do fator de retardamento de Pb, Cu, Zn e Cd no RCC.

## 5. REFERÊNCIAS

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 695-702, 2001.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V.; ULSEN, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 6., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON: , 2003. 14p.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 604–611, 2006.

CARVALHO, A. L. **Efeitos da recirculação do percolado sobre a qualidade do efluente de lixo doméstico de diferentes idades**. 2005. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

CARVALHO, A. L.; MATOS, A. T.; HAMAKAWA, P. J.; AZEVEDO, R. F. Produção de percolado por resíduos sólidos urbanos de diferentes idades, na presença de resíduos da construção civil e sob recirculação. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 14, n. 2, p. 131-138, 2006.

DAL BOSCO, S. M.; JIMENEZ, R. S.; CARVALHO, W. A. Aplicação da zeólita natural escolecita na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção. **Eclética Química**, v. 29, n.1, p. 47-56, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 247p.

FERREIRA, P. A. **Manejo de água planta em solos salinos**. Viçosa: UFV, 2003. 111p. Apostila de aula do Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

GONÇALVES, A. D. M. A. **Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo**. 2007. 83f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MOREIRA, D. A.; MARTINEZ, M. A.; SOUZA, J. A. R.; MATOS, A. T.; REIS, C.; BARROS, F. M. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de metais pesados em resíduos da construção civil e demolição. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 77-86, 2010. ([doi:10.4136/ambi-agua.138](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.138))

---

GUTIERREZ, K. G. **Remoção de metais pesados de percolado submetido à recirculação em células de resíduo sólido urbano**. 2006. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 204f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MATOS, A. T. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa-MG**. 1995. 110f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

MATOS, A. T.; COSTA, L. M.; FONTES, M. P. F.; MARTINEZ, M. A. Retardation factors and the dispersion-diffusion coefficients of Zn, Cd, Cu, and Pb, in soils from Viçosa-MG, Brazil. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 42, n. 4, p. 903-910, 1999.

SOUSA, H. A.; ROESER, H. M. P.; MATOS, A. T. Métodos e técnicas aplicados na avaliação ambiental do aterro BR-040 da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte – MG. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 55, n. 4, p. 291-300, 2002.

SOUSA, H. A. **Estudo da contaminação ambiental na área do aterro sanitário da BR-040, da prefeitura municipal de Belo Horizonte (MG)**. 1998. 147f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1998.

SUN, N-Z. **Mathematical modeling of groundwater pollution**: geological publishing. Beijing: House, 1995. 377p.

VALOCCHI, A. J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. **Water Resource Research**, Washington, v. 20, n. 4, p. 499-503, 1984.