



# Determinação de parâmetros de transporte de metais pesados em Latossolo compactado



Izabel C. D. Azevedo<sup>1</sup>, Cleidimar R. Nascentes<sup>1</sup>, Antonio T. de Matos<sup>2</sup> & Roberto F. de Azevedo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DEC/UFV. CEP: 36570-000, Viçosa. Fone: (31) 38991303. E-mail: [iazevedo@ufv.br](mailto:iazevedo@ufv.br) (Foto), [rejanenascentes@zipmail.com.br](mailto:rejanenascentes@zipmail.com.br), [razevedo@ufv.br](mailto:razevedo@ufv.br)

<sup>2</sup> DEA/UFV. CEP: 36570-000. Fone: (31) 3899-1886. E-mail: [atmatos@ufv.br](mailto:atmatos@ufv.br)

Protocolo 81 - 7/6/2003 - Aprovado em 6/9/2005

**Resumo:** Neste trabalho são comparados os valores de coeficiente de dispersão hidrodinâmica e de fator de retardamento do zinco, do manganês e do cádmio, em Latossolo (horizonte B) compactado, obtidos através dos métodos de análise tradicional e de massa acumulada para ensaios em coluna de lixiviação. Para facilitar a utilização do método da massa acumulada, desenvolveu-se um programa computacional, baseado em procedimento de otimização. Os valores dos parâmetros de transporte obtidos não foram influenciados pelas metodologias de determinação empregadas, mesmo quando no método da massa acumulada se usou um número reduzido de volume de poros efluentes das colunas de lixiviação. Utilizando-se o método da massa acumulada e se tendo por base um número reduzido de volume de poros efluentes, consegue-se reduzir tempo e custo em ensaios para determinação de parâmetros de transporte.

**Palavras-chave:** coeficiente de dispersão hidrodinâmica, fator de retardamento, ensaio em coluna de lixiviação, método da massa acumulada

## Determination of transport parameters for heavy metals in compacted Oxisol

**Abstract:** In this work, values of hydrodynamic dispersion coefficient and retardation factor, for zinc, manganese and cadmium in a mature Oxisol (horizon B) determined through the traditional and the cumulative mass approaches of column tests are compared. A computer program, which uses an optimization procedure, was developed to facilitate the interpretation of the results obtained from cumulative mass approach. The transport parameter values obtained in this work were not affected by the determination methodology employed, even when a reduced number of effluent samples were used for the cumulative mass approach. The use of the cumulative mass method, based on a reduced number of pore volumes, in the determination of transport parameters, reduces time and costs involved in tests.

**Key words:** hydrodynamic dispersion coefficient, retardation factor, column test, cumulative mass approach

## INTRODUÇÃO

Em várias situações práticas, como no caso do transporte de contaminantes miscíveis através de camadas de solo pouco espessas e de baixa permeabilidade, como ocorre, por exemplo, nas camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, o solo pode ser considerado um material homogêneo isotrópico e indeformável e se admite que a migração do contaminante é governada pelo fluxo estacionário de um fluido incompressível; além disto, processos acoplados de fluxo são, geralmente, desprezados, e apenas as reações de sorção instantâneas, lineares e reversíveis, são incluídas na

análise. Quando essas hipóteses são aceitáveis, o transporte transiente unidimensional de espécies químicas em solos saturados pode ser descrito pela conhecida equação de advecção-dispersão (Freeze & Cherry, 1979). Esta equação requer a definição de alguns parâmetros determinados em geral com base em ensaios de laboratório em coluna de lixiviação, de difusão e de equilíbrio em lote.

Os ensaios em coluna de lixiviação referem-se à medição dos parâmetros de transporte, que descrevem a migração de espécies químicas através de um meio poroso, em condições controladas de laboratório (Shackelford, 1995). Esses ensaios são de simples execução, mas podem ser demorados e onerosos,

já que requerem medições periódicas durante sua duração que, em alguns casos, podem levar algumas semanas ou até meses.

Dois métodos podem ser utilizados para análise dos dados de concentração dos efluentes de ensaios em coluna. O método tradicional consiste em medir concentrações instantâneas em função do tempo, determinar a curva de eluição e aplicar um modelo analítico na determinação do fator de retardamento e do coeficiente de dispersão hidrodinâmica. Quando o comprimento da coluna é suficientemente grande, a equação de concentração de solutos no efluente é (Shackelford, 1995):

$$C_e(L, T) = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[ (R_d - T) \sqrt{\frac{P_L}{4TR_d}} \right] \right\} \quad (1)$$

sendo:

$$T = \frac{V_x t}{L} \quad P_L = \frac{V_x L}{D_h} \quad (2)$$

em que  $C_e$  ( $M L^{-3}$ ) é a concentração efluente de soluto;  $C_0$  ( $M L^{-3}$ ) é a concentração afluente de soluto;  $R_d$  é o fator de retardamento (adimensional);  $T$  é um parâmetro adimensional que corresponde à relação entre o volume de efluente coletado e o volume de vazios da amostra e equivale ao número de volume de poros;  $P_L$  é o número de Peclet da coluna (adimensional);  $L$  é a altura da coluna de solo ( $L$ );  $D_h$  é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $L^2 T^{-1}$ ) e  $V_x$  é a velocidade de percolação na direção  $x$  ( $L T^{-1}$ ).

Tomando-se a derivada da Eq. 1 em relação a  $T$  obtém-se, no ponto  $T = R_d$ , o valor  $b = \sqrt{P_L / (4\pi R_d^2)}$ . Substituindo-se  $P_L$  por  $V_x L / D_h$ , conclui-se que o coeficiente de dispersão hidrodinâmica pode ser determinado-se a tangente à curva experimental,  $C_e/C_0$  vs.  $T$ , no ponto  $C_e/C_0 = 0,5$ , é conhecida

$$D_h = \frac{V_x L}{4\pi R_d^2 b^2} \quad (3)$$

Este método, além de certa dispersão nos resultados, requer a coleta de grande número de amostras de efluentes ao longo do ensaio e a análise da concentração dos efluentes em todas as amostras.

Schackelford (1995) propôs uma nova interpretação dos ensaios em coluna para calcular o fator de retardamento, que permite o efluente acumular-se em um reservatório por período de tempo finito ou volumes de poro de fluxo. Este tipo de ensaio (Cumulative Mass Approach - CMR) difere do ensaio em coluna tradicional no que se refere à análise dos dados medidos; neste caso, em termos da massa de soluto ao invés da concentração de soluto.

O incremento de massa de soluto,  $\Delta m$ , que passa através da extremidade efluente de uma coluna finita de solo (em  $x = L$ ) em um intervalo de tempo, pode ser determinado utilizando-se a Eq. 4.

$$\Delta m = A \int_{t_1}^{t_2} J(L, \tau) d\tau \quad (4)$$

em que  $J(L, \tau)$  é o fluxo de massa de um soluto em um meio poroso e representa a taxa no tempo da variação de massa,  $dm$ , através da seção transversal total (sólidos e vazios) perpendicular à direção do fluxo,  $A$ .

A razão de incremento de massa de soluto, IMR (Shackelford, 1995) é dada por:

$$\text{IMR} = \frac{\Delta m}{V_p C_0} = \frac{R_d}{2P_L} \left[ (\xi_4 - \xi_2) \operatorname{erfc}(\xi_1) + (\xi_4 + \xi_2) \exp(\xi_2) \operatorname{erfc}(\xi_3) \right]_{t_{\text{inicial}}}^{t_{\text{final}}} \quad (5)$$

em que  $V_p$  corresponde a um volume de poros (vazios) do solo na coluna;  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  e  $\xi_4$  são obtidos utilizando-se as equações:

$$\xi_1 = \frac{R_d - T}{2 \sqrt{\frac{TR_d}{P_L}}} \quad \xi_2 = P_L \quad (6)$$

$$\xi_3 = \frac{R_d + T}{2 \sqrt{\frac{TR_d}{P_L}}} \quad \xi_4 = \frac{TP_L}{R_d}$$

$\Delta m$  é função do intervalo de amostragem ou do incremento do volume de poros,  $\Delta T$  ( $T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}$ ). Portanto, quanto maior o valor de  $\Delta T$  maior será também o valor de IMR para um mesmo número de volume de poros de fluxo total (acumulado). Em regime estacionário, quando a concentração efluente é igual à concentração afluente ( $C_e = C_0$ ), o valor de IMR permanece constante e igual ao valor de  $\Delta T$  (Shackelford, 1995).

A quantidade acumulada ou total de massa de soluto efluente é a soma dos incrementos de massa de soluto do início ( $T_{\text{inicial}}=0$ ) até o final ( $T_{\text{final}}=T$ ) do ensaio em coluna, desde que a coluna seja alimentada permanentemente, como pressupõe o ensaio. Se esses limites de integração forem aplicados à Eq. 11 e os limites da função erro complementar forem respeitados poder-se-á, então, expressar a quantidade de massa acumulada de soluto efluente, de forma adimensional, por uma razão de massa acumulada, CMR, dada por:

$$\text{CMR} = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta m_i}{V_p C_0} = \frac{R_d}{2P_L} \left[ (\xi_4 - \xi_2) \operatorname{erfc}(\xi_1) + (\xi_4 + \xi_2) \exp(\xi_2) \operatorname{erfc}(\xi_3) \right] \quad (7)$$

em que  $k$  é o número total de amostras de efluente coletadas ao longo do número de volume de poros escoados (ou tempo decorrido),  $T$ .

Com base na conservação da massa de uma coluna de solo finita, o fator de retardamento pode ser representado mais corretamente pela área acima da curva de eluição (van Genuchten & Parker, 1984; Schackelford, 1994, 1995), ou seja:

$$R_d = \int_0^{T_{ss}} \left[ 1 - \frac{C_e(T)}{C_0} \right] dT = T_{ss} - \int_0^{T_{ss}} \left[ \frac{C_e(T)}{C_0} \right] dT \quad (8)$$

em que  $T_{ss}$  é o número de volumes de poros necessários para atingir o regime estacionário.

No método da massa acumulada, a inclinação da curva CMR vs. T em regime de fluxo estacionário é igual à unidade e esta tendência independe do valor de  $R_d$ , ou seja, o fator de retardamento influi no tempo necessário para atingir o regime permanente, mas não no valor do fluxo de massa de soluto atingido neste regime. O valor de T resultante do prolongamento da linha reta da curva T vs. CMR até o eixo horizontal (CMR = 0) representa o valor do fator de retardamento ( $R_d = T_0$ ), conforme mostrado na Figura 1.

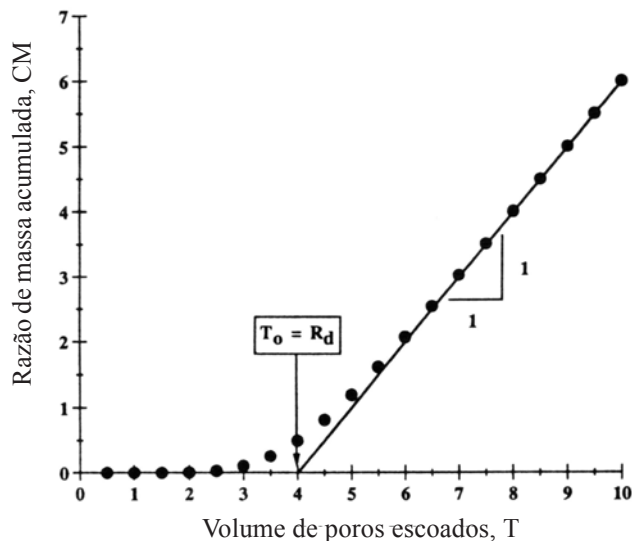


Figura 1. Exemplo de estimativa de  $R_d$  de dados CMR versus T

A massa total de soluto afluente e efluente da coluna de solo do início do ensaio até que seja atingido o regime de fluxo estacionário, é dada por:

$$R_d + M = T_{ss} \left( \frac{C_e}{C_0} \right) = T_{ss} (1) = T_{ss} \quad (9)$$

em que o valor de  $R_d$  é calculado usando-se a Eq. 8; M é a área sob a curva de eluição (mostrada na Figura 1) e representa a massa de soluto total efluente, do início do ensaio até que o regime de fluxo estacionário tenha sido atingido, ou

$$M = \int_0^{T_0} \frac{C_e(T)}{C_0} dT = \frac{\sum_{i=1}^j \Delta m_i}{V_p C_0} \quad (10)$$

Comparando-se as Eq. 7 e 10, verifica-se que, para  $j=k$

$$M = CMR_{ss} \quad (11)$$

em que  $CMR_{ss}$  representa a razão de massa acumulada no tempo necessário para que o transporte de soluto atinja o regime estacionário (em  $T = T_{ss}$ ). Substituindo-se a Eq. 11 na Eq. 9 e se comparando o resultado com a Eq. 8, obter-se-á:

$$R_d = T_{ss} - CMR_{ss} \quad (12)$$

Portanto, o valor de  $R_d$ , definido com relação à restrição do balanço de massa (Eq. 8), é dado pela diferença entre o número de volumes de poros necessários para que o fluxo atinja um regime permanente,  $T_{ss}$ , e o valor de CMR em  $T = T_{ss}$ . O valor de  $R_d$  permanece inalterado para valores de  $T > T_{ss}$  e, de modo geral

$$R_d = (T - CMR) \Big|_{T=T_{ss}} = (T - CMR)_{ss} \quad (13)$$

Conhecido o valor de  $R_d$ , o valor de  $P_L$  é determinado com o ajuste da Eq. 7.

Uma vantagem considerável na análise com o uso do método da massa acumulada é a menor dispersão dos resultados. Além disso, o número de amostras de efluentes coletadas para a determinação dos parâmetros pode ser significativamente menor que no método tradicional; entretanto, a determinação dos parâmetros de transporte (fator de retardamento e coeficiente de dispersão hidrodinâmica) com base em resultados experimentais, é mais trabalhosa que quando obtida com o uso do método tradicional.

Neste trabalho, compararam-se os valores de coeficiente de dispersão hidrodinâmica e de fator de retardamento do zinco, manganês e cobre, em solo residual (horizonte B) compactado, utilizando-se os métodos de análise tradicional e de massa acumulada de ensaios em coluna de lixiviação.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Solo

O material utilizado neste estudo foi coletado no horizonte B de um Latossolo Vermelho Amarelo sendo classificado, segundo a USCS, como um silte de alta plasticidade (MH).

A caracterização do solo estudado a ser utilizado na camada de impermeabilização da base do futuro aterro sanitário do Município de Visconde do Rio Branco, MG, foi feita com o uso de ensaios de caracterização geotécnica, mineralogia da fração argila e análises químicas e físico-químicas. Algumas características estão apresentadas na Tabela 1. Os resultados de análises químicas e físico-químicas são mostrados na Tabela 2 e, na Figura 2, tem-se a curva granulométrica do solo.

A baixa atividade do solo indica predominância de minerais caulínicos, o que foi verificado na análise mineralógica. No difratograma da fração argila do solo, mostrado na Figura 3, observa-se a presença de dois grandes picos, de primeira e de

Tabela 1. Características do solo

Granulometria				Limites de Atterberg			Índices Físicos			
Argila	Silte	Areia	Pedregulho	LL	LP	IP	Atividade	$\gamma_d$	$\gamma_{d\text{máx}}$	$w_{\text{ótima}}$
			g kg <sup>-1</sup>					kN m <sup>-3</sup>		g kg <sup>-1</sup>
420	100	471	9	520	300	220	0,52	27	16,45	223

LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – Índice de plasticidade;  $\gamma_d$  - peso específico do solo seco;  $\gamma_{d\text{máx}}$  - peso específico máximo do solo seco;  $w_{\text{ótima}}$  - teor de umidade ótimo

segunda ordem, do mineral argílico caulinita, indicando sua predominância, coerentemente com os valores encontrados para os limites de consistência (Lambe, 1979).

Tabela 2. Análises química e físico-química do solo

Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>	CTC <sub>ef</sub>	CTC <sub>pot</sub>	pH
cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>							
1,23	0,11	0,026	0,0	0,7	1,37	2,07	6,01

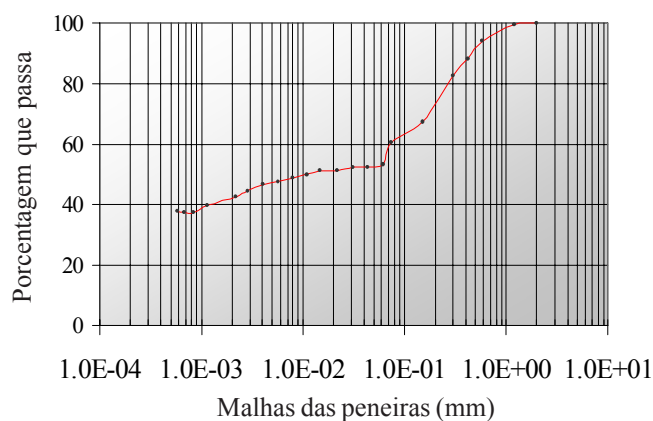


Figura 2. Curva granulométrica

### Solução contaminante

Utilizou-se uma solução contaminante produzida artificialmente (chorume ou percolado sintético), composta por seis metais pesados. A solução foi preparada com a adição de nitratos de manganês, zinco, cádmio, cobre, chumbo e crômio, por serem esses metais comumente encontrados em chorume produzido em aterros sanitários urbanos. O pH (igual a 5) e as concentrações dos metais pesados no percolado, apresentadas na Tabela 3, estão dentro das faixas citadas na literatura para diversos percolados de aterros sanitários do Brasil (Oliveira & Jucá, 1999; Barbosa & Otero, 1999).

### Equipamento utilizado

O equipamento utilizado nos ensaios, um permeâmetro de paredes flexíveis, semelhante a uma câmara triaxial, está apresentado na Figura 4A e B; tendo o mesmo a capacidade de ensaiar, simultaneamente, quatro corpos-de-prova com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Cada corpo-de-prova, denominado CP1, CP2, CP3 e CP4, possui uma entrada para o fluido percolante e uma saída para a coleta do efluente, sendo que, através do corpo-de-prova, o fluxo é ascendente. Cada uma das quatro entradas e quatro saídas possui válvulas

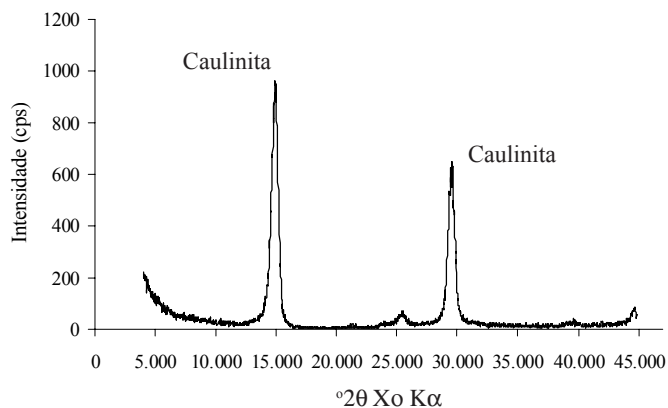


Figura 3. Difratograma da fração argila

Tabela 3. Concentrações dos metais pesados utilizadas na solução contaminante

Metal Pesado	Crômio (Cr <sup>3+</sup> )	Cádmio (Cd <sup>2+</sup> )	Chumbo (Pb <sup>2+</sup> )	Cobre (Cu <sup>2+</sup> )	Manganês (Mn <sup>2+</sup> )	Zinco (Zn <sup>2+</sup> )
Concentração (mgL <sup>-1</sup> )	0,7	1,6	1,6	5	36	72

A.



B.

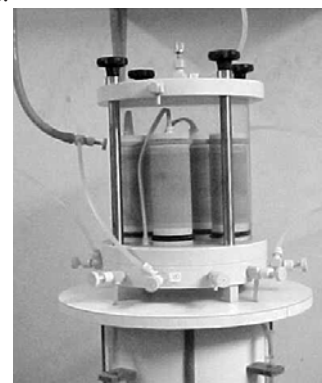


Figura 4. Vista geral do sistema utilizado nos ensaios (A) e Vista em detalhe do permeâmetro (B)

de abertura e fechamento, utilizadas para facilitar a execução do ensaio. Cada entrada foi interligada a um frasco de Mariotte, onde foi acondicionado o fluido, por meio de uma mangueira de látex. O equipamento possui, ainda, uma entrada para aplicação de tensão de confinamento, permitindo a reprodução de tensões horizontais de campo (Nascentes 2003).

### Procedimento nos ensaios

O gradiente de carga foi mantido constante durante o ensaio. As amostras foram saturadas com água destilada antes da percolação com a solução contaminante. Os efluentes de cada coluna de solo foram coletados utilizando-se buretas de 50 mL, fixadas ao pedestal de sustentação do equipamento, enquanto os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura controlada, entre 17 e 21 °C. Uma tensão de confinamento de 50 kPa, correspondente a uma situação de campo na qual a camada de impermeabilização tivesse cerca de 10 m de altura de resíduos sobre ela, foi aplicada nas amostras de solo.

As concentrações dos metais nos efluentes,  $C_e$ , foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica, e os dados coletados e apresentados neste trabalho correspondem a um período de quatro meses de percolação com contaminante (de 9/9/2002 a 9/1/2003).

### Programa computacional para o cálculo dos parâmetros de transporte na análise, pelo método da massa acumulada

Na análise dos resultados dos ensaios em coluna utilizando-se o método da massa acumulada (Shackelford, 1995), a obtenção do fator de retardamento foi direta, a partir da Eq. 13. A determinação do número de Peclet, do qual se obtém o coeficiente de dispersão hidrodinâmica (Eq.5), porém, não é simples. Para o cálculo deste valor desenvolveu-se um programa computacional (Nascentes et al., 2003) que, por meio de um processo iterativo de otimização, fornece os valores de  $R_d$  e  $P_L$ . O algoritmo proposto para a obtenção dos parâmetros consiste em arbitrar valores para os parâmetros  $R_d$  e  $P_L$ ; com esses valores, calcular os valores de CMR para todos os valores de T nos quais foram feitas medições no laboratório; calcular o vetor diferença  $\{DIF\} = \{CMR_{lab} - CMR_{teor}\}$ , em que  $\{CMR_{lab}\}$  e  $\{CMR_{teor}\}$  são vetores que contêm os valores experimentais e teóricos (Eq.7) respectivamente; calcular o erro =  $|\{DIF\}|/|\{CMR_{lab}\}|$ ; verificar se o erro está dentro de uma tolerância preestabelecida (o erro admitido foi de 0,01%). Como se trata de um problema em que as equações são razoavelmente simples e que somente dois parâmetros têm que ser otimizados e se pretende simplicidade na formulação, faz-se o processo de busca de melhores parâmetros por um procedimento de otimização de ordem zero no qual só o valor da função é requerido (Vanderplaats, 1984).

### Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e em caso de detecção de efeito de tratamento (métodos de determinação) nos valores de  $R_d$  e  $D_h$ , as médias foram comparadas com uso do Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise pelo método tradicional

Conhecidos as concentrações inicial e efluente da solução contaminante e o número de volumes de poros escoados, foi possível traçar-se as curvas de eluição para três dos metais da

solução contaminante, manganês, zinco e cádmio, apresentadas na Figura 5 (Nascentes et al., 2003).

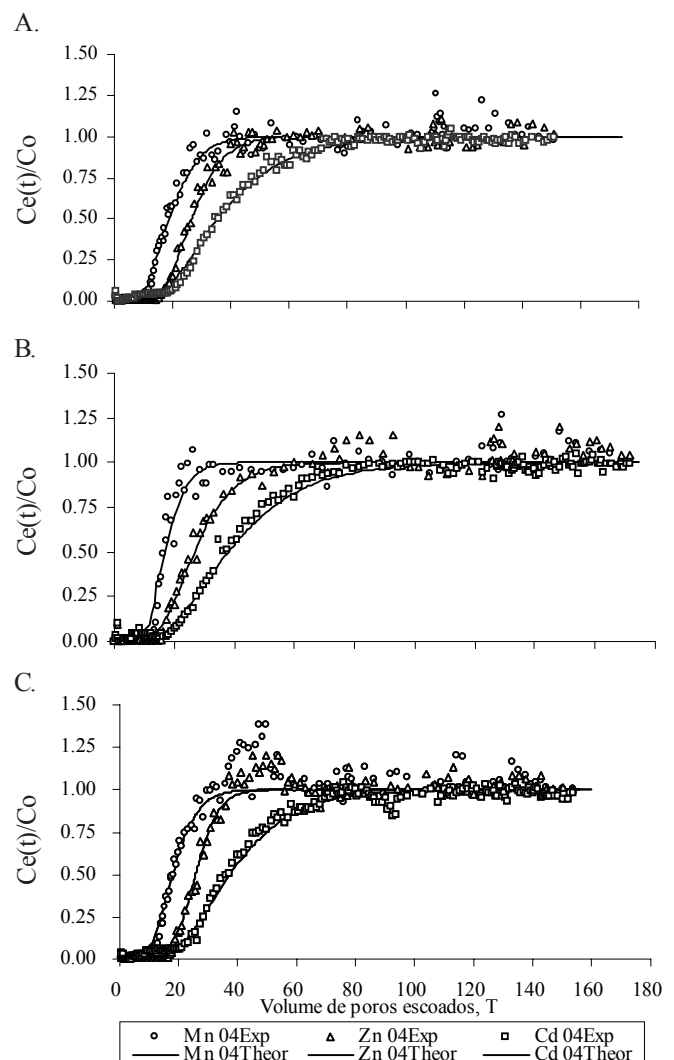


Figura 5. Curva de efluentes dos metais Mn, Zn e Cd: (A) CP1; (B) CP2; (C) CP4

Os valores obtidos para fator de retardamento são valores altos comparados aos encontrados na literatura (Elbachá, 1989; Matos et al., 1999; Azevedo et al., 2002; Costa, 2002; Azevedo et al., 2003), porém as soluções contaminantes utilizadas nesses trabalhos se basearam em valores encontrados em chorumes e lixiviados brutos de diferentes resíduos, ao contrário dos deste trabalho, que foram baseados na concentração encontrada em percolados. Elbachá (1989) encontrou valores de  $R_d$  menores que 4,5 para o zinco, que são valores bem menores que o encontrado neste trabalho (em média  $R_d$  para o zinco foi de 26,5). A concentração foi, provavelmente, um fator que influenciou muito no valor do fator de retardamento, uma vez que, havendo sítios de cargas limitados nas colunas de lixiviação, quanto maior a quantidade de cátions presentes na solução em percolação, mais rápida deverá ser sua saturação iônica.

As curvas de efluentes completas dos metais foram utilizadas seguindo-se a metodologia tradicional para a

determinação dos valores de  $R_d$  e  $D_h$  para o Mn, Zn e Cd, os quais se encontram apresentados na Tabela 4.

### Análise pelo método da massa acumulada

A quantidade total de massa de soluto efluente da coluna foi determinada utilizando-se as Eqs. 7, 1 e 5.

Uma das vantagens de se determinar os parâmetros pelo método da massa acumulada é diminuir o número de amostras coletadas e, conseqüentemente, o número de análises. A fim de se avaliar possível influência da redução do número de amostras na determinação de  $R_d$  e  $D_h$ , utilizaram-se apenas 10 pontos experimentais, igualmente espaçados entre o intervalo de amostragem de número de volume de poros. Nas Figuras 6, 8 e 9 estão apresentadas as curvas CMR versus T, experimentais e teóricas, obtidas com os valores de  $R_d$  e  $D_h$  indicados na Tabela 4 para os metais manganês, zinco e cádmio, considerando-se todos os pontos do ensaio e dez pontos somente, para três dos corpos-de-prova ensaiados. Não foi possível obter-se qualquer resultado do corpo-de-prova CP3 em virtude de um entupimento inesperado no sistema de condução da solução para os permeâmetros.

Os valores de fator de retardamento e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica, determinados especificamente para cada metal, foram muito semelhantes entre si para os três corpos-de-prova, o que pode ser atribuído ao fato de serem as velocidades de percolação médias da solução praticamente iguais e, por isso, com semelhante tempo de contato com os sítios de adsorção do solo.

A análise estatística dos dados (análise de variância com teste F a 5% de probabilidade) indicou não ter havido efeito do método de determinação de  $R_d$  e  $D_h$ . Em vista disso, pode-se considerar que o método da massa acumulada, mesmo quando foram utilizados apenas 10 pontos da curva de efluentes, possibilitou a obtenção de valores de  $R_d$  e  $D_h$  que não diferiram dos obtidos pelo uso do método tradicional.

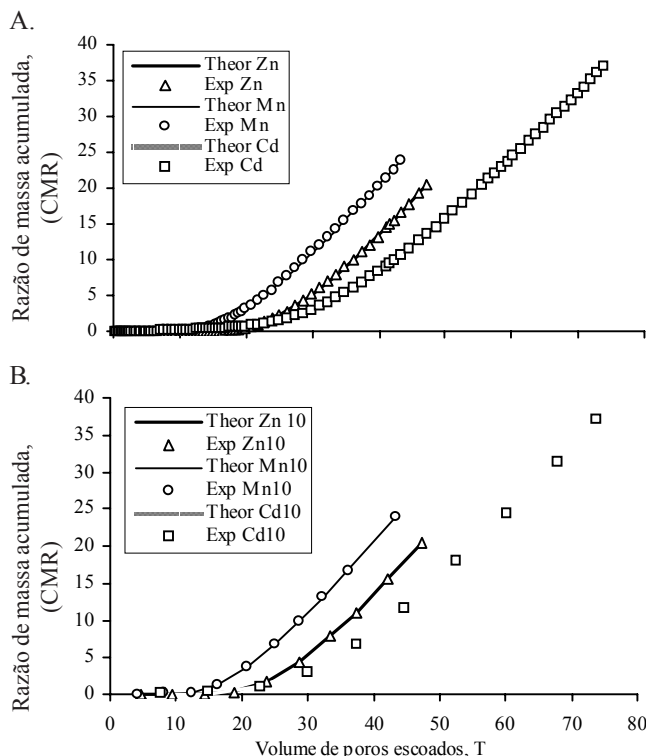


Figura 6. Gráficos de razão de massa acumulada de Zn, Mn e Cd no CP01, considerando-se: (A) Todos os pontos; (B) 10 pontos

Analisando-se as Figuras 6, 7 e 8, verifica-se boa concordância entre as curvas CMR versus T, experimentais e teóricas, determinadas com base nos valores de fator de retardamento e de coeficiente de dispersão hidrodinâmica, apresentados na Tabela 4. A análise realizada com dez dados de massa acumulada indicou não haver necessidade da coleta freqüente e contínua de efluentes para fornecer estimativas

Tabela 4. Valores de fator de retardamento e coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$ ) obtidos pelo Método Tradicional e pelo Método da Massa Acumulada, considerando-se todos os dados e apenas 10 dados experimentais

Metal	Amostra	$R_d^*$			$D_h^*$		
		MT	$D_T$	$D_{10}$	MT	$D_T$	$D_{10}$
Mn	CP1	19,50	19,64	19,50	9,79E-3	1,08E-2	1,04E-2
	CP2	18,00	17,81	18,11	6,29E-3	7,05E-3	1,11E-2
	CP4	18,50	18,90	18,85	7,76E-3	7,37E-3	7,18E-3
	$\bar{X}$		18,76			8,64E-3	
	CV (%)		4,26			22,94	
Zn	CP1	26,50	26,97	27,01	6,96E-3	6,77E-3	7,03E-3
	CP2	27,50	28,54	28,55	4,48E-3	1,01E-2	1,03E-2
	CP4	26,00	26,19	26,16	3,93E-3	4,07E-3	4,15E-3
	$\bar{X}$		27,05			6,42E-3	
	CV (%)		3,98			41,40	
Cd	CP1	36,00	37,80	37,69	1,64E-2	1,79E-2	1,75E-2
	CP2	38,50	39,74	39,58	1,67E-2	1,84E-2	1,79E-2
	CP4	37,50	39,85	39,72	1,28E-2	1,70E-2	1,64E-2
	$\bar{X}$		37,38			1,68E-2	
	CV (%)		8,66			8,30	

\* MT – Método Tradicional;  $D_T$  – Método da Massa Acumulada usando-se todos os dados experimentais;  $D_{10}$  – Método da Massa Acumulada usando-se 10 dados experimentais igualmente espaçados

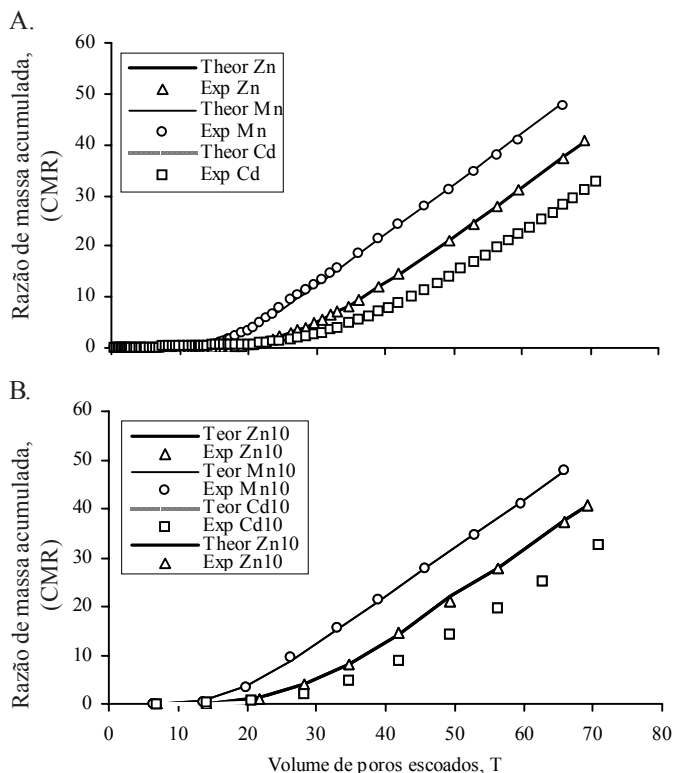


Figura 7. Gráficos de razão de massa acumulada

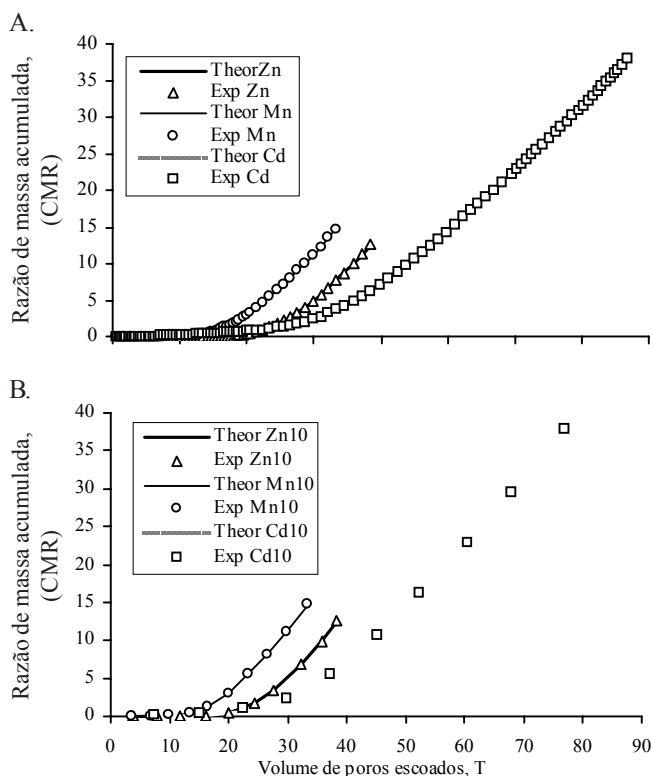


Figura 8. Gráficos de razão de massa acumulada de Zn, Mn e Cd no CP04, considerando-se: (A) Todos os pontos; (B) 10 pontos

precisas de  $R_d$  e  $D_h$ , para velocidades de percolação da ordem das observadas neste trabalho. Espera-se que o mesmo comportamento seja verificado em outros solos, uma vez que

os métodos são sensíveis às alterações nas características físicas, químicas e físico-químicas dos solos. O método de massa acumulada pode ser indicado para testes em coluna de lixiviação em longo prazo, como nos casos de avaliação de transporte de contaminantes reativos em taxas de escoamento baixas, comumente associadas a camadas de impermeabilização, como foi o caso estudado.

Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os observados por Shackelford (1995) que verificou diferenças menores que 3% nos parâmetros  $R_d$  e  $P_L$  (associado a  $D_h$  conforme a Eq.5) atribuindo-as à maior dispersão nos dados pelo Método Tradicional e a pequenos erros envolvidos neste método, ao se relacionar  $C_e/C_o$  com o número de volumes de poros escoados correspondente ao meio do intervalo amostral ( $T_{médio}$ ).

### CONCLUSÕES

1. Os valores de fator de retardamento e de coeficiente de dispersão hidrodinâmica não foram influenciados pelo método de determinação.

2. A análise realizada com um número reduzido de dados experimentais da massa acumulada (10 dados) indicou não haver a necessidade de coleta freqüente e contínua de efluentes para fornecer estimativas precisas de  $R_d$  e  $D_h$ , para velocidades de percolação da ordem das observadas neste trabalho.

3. A utilização do Método de Massa Acumulada pode ser indicada para testes em coluna de lixiviação em longo prazo, como em casos de avaliação de transporte de contaminantes reativos em taxas de escoamento baixas, comumente associadas às camadas de impermeabilização, como foi o caso estudado.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e à CAPES, pelo apoio financeiro, aos Departamentos de Engenharia Civil, Engenharia Agrícola, Solos e de Química, da Universidade Federal de Viçosa, MG, pela realização dos ensaios.

### LITERATURA CITADA

Azevedo, I.D.; Azevedo, R.F.; Carvalho, A.L.; Matos, A.T.; Nascentes, C.R. Contaminação do solo e de águas sub-superficiais por metais pesados no antigo lixão de Viçosa, MG, Brasil. Geotecnia, Lisboa, v.98, p.23-55, 2003.  
 Azevedo, I.D.; Azevedo, R.F.; Germano, A.M.; Carvalho, C.A. A numerical study of heavy metal transport in the dump area of the Municipal District of Viçosa, MG, Brazil. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4, 2002, Rio de Janeiro. Proceedings. ...Rio de Janeiro: ICEG, 2002. v.1. p.27-32.  
 Barbosa, R.M.; Otero, O.M.F. Caracterização da pluma de poluição originada por depósito de lixo urbano. Geochimica Brasiliensis, Rio de Janeiro, v.13, n.1, p.51-65, 1999.

- Costa, P. Avaliação em laboratório de parâmetros de transporte do chorume no Aterro Sanitário de Sauípe, BA. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002. 190p. Dissertação Mestrado.
- Elbachá, A.T. Estudo da influência de alguns parâmetros no transporte de massa em solos argilosos. Rio de Janeiro: PUC/RJ, 1989. 178p. Dissertação Mestrado
- Freeze, R.A.; Cherry, J.A. Groundwater. New York: Prentice Hall, Inc. 1979. 604p.
- Lambe, T.W. Soil mechanics. New York: John Wiley & Sons Inc. 1979. 553p.
- 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, Transaction of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, v.42, n.4, p.903-910, 1999.
- Nascentes, C.R. Coeficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardamento de metais pesados em solo residual compactado. Viçosa: UFV, 2003. 117p. Dissertação Mestrado
- Nascentes, C.R.; Azevedo, I.D.; Azevedo, R.F.; Matos, A.T.; Guimarães, L.M. Determinação de parâmetros de transporte de metais pesados em solo laterítico visando aplicação em camadas de impermeabilização. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5, 2003, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: REGEO, 2003, CD-Rom
- Oliveira, F.J.S.; Jucá, J.F.T. Estudo da contaminação do subsolo da região do aterro de resíduos sólidos de Muribeca, PE. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 4, 1999, Salvador. Anais... Salvador: REGEO, 1999. v.1. p.455-460.
- Shackelford, C.D. Critical concepts for column testing. Journal of Geotechnical Engineering, American Society for Civil Engineers, Reston, v.20, n.10. p.1804-1828, 1994.
- Shackelford, C.D. Cumulative mass approach for column testing. Journal of Geotechnical Engineering, American Society for Civil Engineers, Reston, v.121. n.10. p.696-703, 1995.
- Vanderplaats, G.N. Numerical optimization techniques for engineering design. New York: McGraw-Hill, Inc. 1984. 232p.
- van Genuchten, M.T.; Parker, J.C. Boundary conditions for displacement experiments through short laboratory soil columns. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.48, n.4, p.703-708, 1984.