

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE DE MASSA EM SOLO RESIDUAL

INFLUENCE OF COMPACTING ENERGY IN MASS TRANSPORT PARAMETERS IN RESIDUAL SOIL

Nascentes, Rejane, Universidade Federal de Mato Grosso, *Cuiabá-MT, Brasil*,
rejanenascentes@cpd.ufmt.br

Alves, Geraldo M., Universidade Federal de Viçosa, *Viçosa-MG, Brasil*,
gerald82000@yahoo.com.br

Azevedo, Izabel D., Universidade Federal de Viçosa, *Viçosa-MG, Brasil*, *iazevedo@ufv.br*

Jesus, Simone C., Universidade Federal de Viçosa, *Viçosa-MG, Brasil*,
sicjesus22@yahoo.com.br

Guimarães, Lucas M., Universidade Federal de Viçosa, *-Viçosa-MG, Brasil*,
guimaraeslm@yahoo.com.br

RESUMO

Camadas de impermeabilização de base de um aterro sanitário são executadas de acordo com critérios de projeto, levando em consideração que a condutividade hidráulica, determinada com água, seja menor que 10^{-9} m/s. Entretanto, interações entre solos e percolados podem modificar algumas propriedades do solo, como o valor da condutividade, e dos parâmetros de transporte. Nesse estudo determinaram-se os valores do fator de retardamento, R_d , e do coeficiente de dispersão hidrodinâmica, D_h , de três metais em amostras de solo compactado com dois valores de energia, Proctor normal e reduzida, e desvio de umidade ótima de -4%. A energia de compactação pouco influenciou os valores de R_d para Mn^{2+} e Zn^{2+} , tendo sido observada a maior diferença para o Cd^{2+} , metal menos móvel. Os valores de D_h diferiram pouco e maiores valores foram observados nas amostras compactadas com energia reduzida.

ABSTRACT

Sanitary landfill liners are executed in agreement with project criteria, taking into account that the hydraulic conductivity, determined with water, be smaller than 10^{-9} m/s. However, interactions between soils and percolating fluid can modify some properties of the soil, as the value of the hydraulic conductivity and of the transport parameters. In this study, values of the retardation factor, R_d , and hydrodynamic dispersion coefficient, D_h , were determined for three metals, in compacted soil samples, for two values of energy, Standard Proctor and reduced, and deviation of optimum humidity of -4%. The compacting energy showed little influence in the values of R_d for Mn^{2+} and Zn^{2+} , the largest difference been observed for Cd^{2+} , less movable metal. The values of D_h differed little and larger values were observed in samples compacted with reduced energy.

1. INTRODUÇÃO

O aterro sanitário é uma das soluções mais usadas para a disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) e industriais. Entretanto, uma das maiores preocupações com este tipo de obra está relacionada à camada de impermeabilização de base que controla o fluxo de percolados, que apresentam, de modo geral, concentrações relativamente elevadas de metais pesados, e podem vir a contaminar o solo e as águas subterrâneas.

A camada de base de um aterro pode ser executada empregando-se solos argilosos compactados, associados ou não a geomembranas. Por razões práticas e econômicas, os materiais naturais vêm sendo mais utilizados. No Brasil, solos argilosos tropicais compactados têm sido amplamente empregados nesse tipo de obra. Para este fim, entretanto, esses materiais devem atender uma série de exigências quanto à sua permeabilidade, grau de compactação, mineralogia, pH, difusão e características de sorção. Essa utilização gera incertezas por ainda não se conhecer completamente muitas das características técnicas e o comportamento desse material para essa finalidade.

Nesse sentido, mais estudos devem ser desenvolvidos sobre as interações que ocorrem entre os solos tropicais e os percolados de áreas de disposição de resíduos sólidos, já que essas interações podem modificar algumas propriedades do solo como a condutividade hidráulica, o coeficiente de difusão, o fator de retardamento e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica, importantes nos processos de transporte de contaminantes nos solos.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos e publicados em relação à determinação de parâmetros de transporte de metais pesados em solo tropical residual (Jesus 2004, Guimarães 2003 e 2005, Nascentes 2003 e 2006, Azevedo et al. 2003a, b, c, Carvalho et al. 2002; Costa 2002, Matos et al. 1999), mas ainda pouco se sabe sobre a influência da energia de compactação nesses parâmetros.

Tendo em vista a escassez de informações a respeito das características de transporte de metais em solos brasileiros o objetivo deste trabalho é estudar a influência da energia de compactação no valor de parâmetros de transporte (fator de retardamento e coeficiente de dispersão hidrodinâmica) de alguns metais pesados em um solo residual de gnaiss.

1.1. Influência da energia de compactação e do teor de umidade na moldagem

Dentre os solos tropicais, destacam-se duas grandes classes, os lateríticos e os saprolíticos. Solos lateríticos são, muitas vezes, denominados solos residuais maduros ou argilas vermelhas tropicais, enquanto que os saprolíticos são chamados de solos residuais jovens ou solos de alteração de rocha. Em relação ao uso de solo laterítico, muito comum no Brasil, poucos estudos têm sido desenvolvidos (Leite et al. 2003).

Além do conhecimento dos componentes, das propriedades físico-químicas e dos mecanismos de retenção do solo, a variação da permeabilidade das camadas de impermeabilização é um aspecto importante na contaminação do solo e das águas subterrâneas. O contato entre uma solução contaminante e o solo, que pode provocar a redistribuição do espaço por rearranjo de partículas de argila (floculação, dispersão, peptização, e micro-migração) em conjunto com reações químicas entre os contaminantes e o mineral argílico como, por exemplo, a dissolução dos sólidos ou precipitação, são as causas mais importantes na variação de permeabilidade.

A estrutura inicial varia conforme a umidade de compactação, energia e grau de compactação. Segundo Mitchell (1976), variações significativas de permeabilidade podem ocorrer dentro de faixas relativamente estreitas de teor de umidade de compactação e densidade, devido à formação de arranjos estruturais diferentes.

O solo compactado fica com uma estrutura que depende da energia aplicada e de sua umidade por ocasião da compactação. Quando compactado com baixo teor de umidade, o solo apresenta estrutura floculada, enquanto que para maiores umidades, a estrutura se apresenta dispersa.

Portanto, para a mesma umidade, quanto maior a energia, maior o grau de dispersão (Lambe 1976).

Em um projeto de construção de uma camada compactada de impermeabilização no campo, as especificações não fixam intervalos de umidade e de densidade a serem obtidos, mas um desvio em relação à umidade ótima e um grau mínimo de compactação, já que em uma área de empréstimo, o solo sempre apresenta alguma heterogeneidade. Amostras retiradas de uma mesma área de empréstimo apresentam curvas de compactação distintas, podendo a umidade ótima, por exemplo, apresentar diferenças de 2 a 4% (Pinto 2000). O comportamento de duas amostras de uma mesma área com curvas de compactação um pouco diferentes, é bastante semelhante se as duas forem compactadas com o mesmo desvio de umidade e o mesmo grau de compactação. Tal fato não ocorre se ambas forem compactadas com a mesma umidade e a mesma densidade seca, que corresponderiam a desvios de umidade e graus de compactação diferentes (Pinto 2000).

Na Figura 1 ilustra-se o efeito do teor de umidade de moldagem e da energia de compactação na estrutura interna do solo compactado. Na condição A, o solo apresenta estrutura interna floculada. Com o aumento da umidade de moldagem, o solo tende a apresentar estrutura dispersa, como ilustrado na condição C. O mesmo acontece com o aumento da energia de compactação.

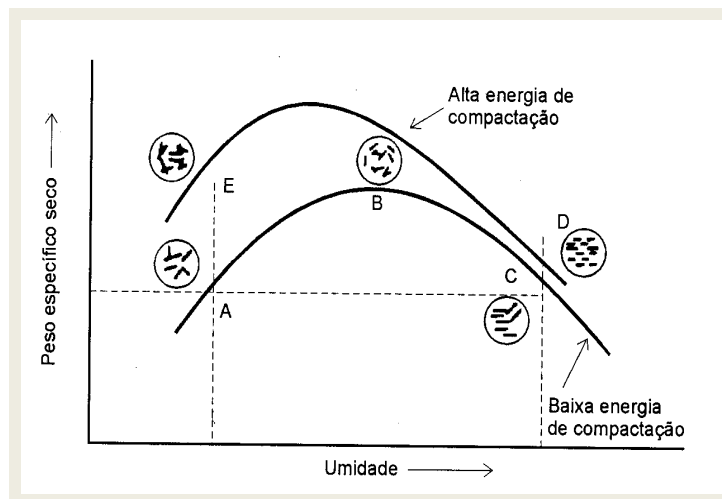


Figura 1 - Efeito da compactação na estrutura interna do solo.

Em trabalhos recentes, Nascentes (2003), Jesus (2004) e Guimarães (2003) determinaram o coeficiente de difusão, fator de retardamento e coeficiente de dispersão hidrodinâmica de metais pesados, em camadas de solo residual compactado. Nascentes (2006) observou que, em consequência da variação da condutividade hidráulica, os valores desses parâmetros podiam variar dentro de uma faixa muito estreita do teor de umidade de compactação. Esta variação é atribuída à formação de arranjos estruturais diferentes que permitem um maior ou menor contato entre a solução contaminante e as partículas de solo.

1.2. Ensaio em Coluna

Este ensaio tem por objetivo determinar os parâmetros de transporte, coeficiente de dispersão e fator de retardamento, que descrevem a migração de espécies químicas, através de um meio poroso, por exemplo, uma argila compactada, em condições controladas de laboratório.

No ensaio tradicional, uma coluna de formato cilíndrico é preenchida com solo e saturada inicialmente por água até que seja estabelecido um regime permanente. Em seguida, aplica-se

sobre a coluna de solo, durante o tempo de duração do ensaio, uma solução contaminante com concentração inicial conhecida, C_0 . O gradiente hidráulico impulsiona esta solução através da amostra de solo. Amostras de efluentes drenados das colunas são coletadas e suas concentrações são determinadas por procedimentos químicos padronizados.

Os resultados das leituras são colocados em um gráfico na forma de uma curva de eluição, que relaciona a concentração relativa de efluente (C_e/C_0) com o número de volume de poros percolados, T . Com base em um modelo analítico, são ajustadas curvas aos pontos de laboratório para determinar os parâmetros de transporte associados, fator de retardamento e coeficiente de dispersão hidrodinâmica (Nascentes 2003).

No método tradicional de análise do ensaio em coluna, o valor do fator de retardamento é admitido como sendo o valor de T para uma concentração efluente relativa, C_e/C_0 , igual a 0,5 (Freeze & Cherry 1979; Shackelford 1993).

O coeficiente de dispersão hidrodinâmica é determinado como sendo a tangente à curva experimental, C_e/C_0 vs. T , no ponto $C_e/C_0 = 0,5$, utilizando a equação:

$$D_h = \frac{V_x L}{4\pi R_d^2 b^2} \quad (1)$$

em que:

L - comprimento da coluna;

b - declividade da curva de eluição para concentração relativa igual a 0,5. O valor de b também pode ser estimado graficamente, considerando-se a primeira derivada da equação C/C_0 vs. T , que corresponde ao valor do fator de retardamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O solo estudado, coletado no horizonte B de um Latossolo Vermelho Amarelo, é utilizado na camada de fundo das células do Aterro Sanitário do Município de Visconde de Rio Branco, MG.

O programa de ensaios de laboratório nesse material consistiu em ensaios de caracterização geotécnica (granulometria, limites de consistência e peso específico dos sólidos); ensaios de compactação e permeabilidade; mineralogia da fração argila e análises químicas e físico-químicas. O solo foi classificado, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação (USC), como um argila siltosa (ML-CL).

No Quadro 1 apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e no Quadro 2 algumas características químicas e físico-químicas do solo.

Quadro 1 – Caracterização geotécnica do solo

Granulometria				Limites de Atterberg			Índices físicos	
Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedreg. (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_s (kN/m ³)	Atividade
56	16	28	0,0	68	33	35	23,44	0,63

LL-limite de liquidez; LP-limite de plasticidade; IP-índice de plasticidade; γ_s -peso específico dos sólidos. Fonte: Jesus (2004).

Quadro.2 – Resultados das análises químicas e físico-químicas do solo

P	K	Zn	Fe	Mn	Cu	P-rem	MO	pH
mg/dm ³						mg/L	dag/kg	H ₂ O
3,4	19	13,67	44,9	15,7	1,83	26,1	1,09	6,59
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC _(t)	CTC _(T)	V	m
cmol _c /dm ³							%	
2,43	0,44	0,00	2,8	2,92	2,92	5,72	51,0	0,0

P - Na - K - Fé - Zn - Mn - Cu - Extrator Mehlich 1; V = Índice de Saturação de Bases; H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0; m = Índice de Saturação de Alumínio; B - Extrator água quente; ISNa - Índice de Saturação de Sódio; S - Extrator - Fosfato monocálcico em ácido acético; Mat. Org. (MO) = C.Org x 1,724 - Walkley-Black; SB = Soma de Bases Trocáveis; P-rem = Fósforo Remanescente. Fonte: Nascentes (2003); Jesus (2004).

No difratograma da fração argila, foi observada a presença de caulinita e goethita (13,3%) determinada pelo método do ditionito. (Nascentes, 2006).

As soluções contaminantes consistiram em soluções de nitrato de Mn (36mg/L), Zn (62mg/L), Cd (1,6mg/L), Cu (5mg/L), Pb (5mg/L) e Cr (0,7 mg/L). As concentrações foram baseadas nas concentrações encontradas no chorume coletado no lixão do Município de Visconde do Rio Branco, MG (Nascentes 2003; Azevedo et al., 2005; Nascentes, 2006).

2.1. Ensaio em coluna

O ensaio foi executado para avaliar o comportamento da condutividade hidráulica do solo compactado percolado pela solução contaminante, e determinar parâmetros de transporte destes metais. A saturação das amostras foi realizada com água destilada, antes da percolação com a solução contaminante.

O equipamento para realização dos ensaios em coluna, um permeâmetro de paredes flexíveis e carga constante, em PVC e acrílico, foi construído no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFV, e é apresentado na Figura 2 (Nascentes 2006).

Procedimento do Ensaio

Para analisar da influência da energia de compactação nos parâmetros de transporte de metais pesados, foram realizados ensaios em coluna em oito corpos de prova: quatro compactados na energia do Proctor normal (595 kJ m⁻³) e quatro com energia de compactação reduzida (293,5 kJ m⁻³), todos com desvio da umidade ótima (wot) de - 4%. As amostras foram inicialmente percoladas por água destilada até a constância da vazão. Após a estabilização da vazão, a água foi substituída pela solução contaminante. Os efluentes foram coletados, nas buretas, em média, uma vez por dia. Os valores de gradiente hidráulico foram iguais a 13,4 m m⁻¹. A tensão de confinamento aplicada foi de 50 kPa.

A compactação do solo no ramo seco teve como objetivo simular situações desfavoráveis que podem ocorrer no campo.

Na Figura 3 apresentam-se as curvas de compactação para os diferentes valores de energia aplicados na compactação das amostras.



Figura 2 – Equipamentos para realização dos ensaios em coluna

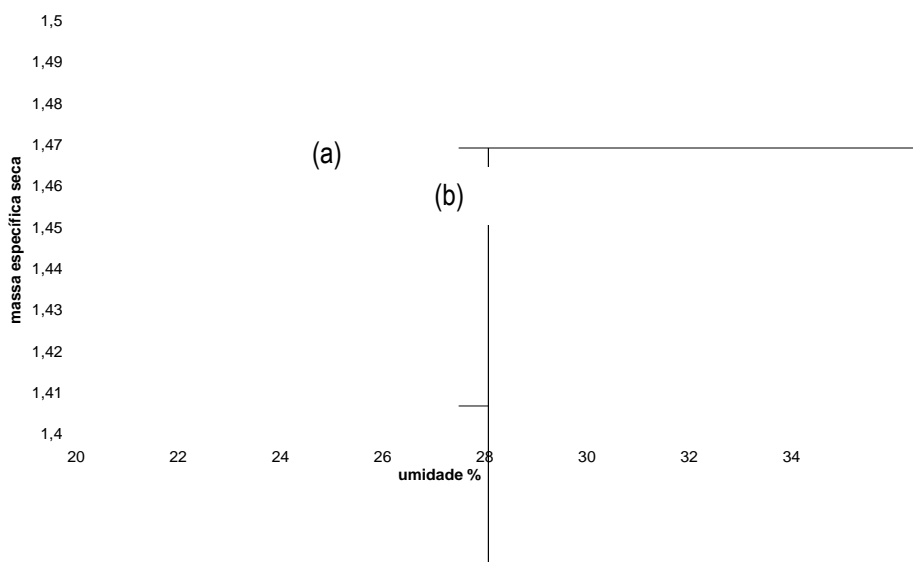


Figura 3 - Curvas de compactação: (a) Na energia do Proctor normal. (b) Com energia reduzida.

3. RESULTADOS

Os valores de fator de retardamento (R_d) e coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_h) para os metais Mn^{2+} , Zn^{2+} , e Cd^{2+} , para as amostras compactadas na energia do Proctor normal ($w_{ot}=4\%$) e na energia reduzida ($w_{ot}=4\%$) estão apresentados no Quadro 3 e Quadro 4, respectivamente.

Quadro 3 – R_d e D_h para amostras compactadas na energia do Proctor normal e w_{ot} -4%.

Metal	CP	R_d	D_h ($m^2 s^{-1}$)
Manganês	01	18,5	1,0E-08
	02	18,4	1,0E-08
	04	17,5	1,6E-08
	Média	18,1	1,2E-08
Zinco	01	23,0	1,4E-08
	02	21,0	1,2E-08
	04	21,5	1,9E-08
	Média	21,8	1,5E-08
Cádmio	01	32,0	2,0E-08
	02	26,0	1,4E-08
	04	29,5	2,0E-08
	Média	29,2	2,1E-08

Quadro 4 – R_d e D_h para amostras compactadas na energia reduzida e w_{ot} -4%.

Metal	CP	R_d	D_h ($m^2 s^{-1}$)
Manganês	01	15,5	9,6E-09
	02	16,0	1,9E-08
	04	16,0	1,8E-08
	Média	15,8	1,6E-08
Zinco	01	18,5	8,0E-09
	02	18,5	4,0E-08
	04	18,0	2,1E-02
	Média	18,3	2,3E-08
Cádmio	01	20,5	9,8E-09
	02	21,0	4,4E-08
	04	21,0	2,4E-08
	Média	20,8	2,6E-08

Não foi possível determinar o fator de retardamento e coeficiente de dispersão hidrodinâmica do cobre, chumbo e cromo, pois somente pequenas concentrações desses metais foram encontradas nos efluentes coletados ao longo do ensaio. Este fato indica elevado retardamento desses elementos no solo estudado.

Verificou-se a seguinte seqüência de mobilidade $Mn^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$ para os dois valores de energia de compactação estudados.

Como era de se esperar, os valores dos fatores de retardamento foram maiores e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica menores, nas amostras compactadas na energia do Proctor Normal. Entretanto a diferença nos valores de fator de retardamento das amostras compactadas na energia do Proctor Normal e na energia reduzida, cresceu de acordo com o aumento do retardamento, ou seja, foi maior para o cádmio, seguido do zinco e uma pequena diferença para o manganês. Os valores do coeficiente de dispersão hidrodinâmica não apresentaram diferenças significativas.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que a variação na energia de compactação do solo influenciou pouco os valores de fator de retardamento dos metais Mn^{2+} , Zn^{2+} , tendo sido observada uma maior diferença no valor de R_d para o metal menos móvel (Cd^{2+}). Os coeficientes de dispersão hidrodinâmica também apresentaram diferenças, porém pequenas (da mesma ordem de grandeza), sendo que os maiores valores foram verificados nas amostras compactadas com energia reduzida.

Conclui-se também ser importante a continuação dos estudos com outros valores de desvios de umidade para avaliar a real importância da energia de compactação nos parâmetros de transporte de massa, principalmente no caso de metais mais lentos como cádmio, cobre e chumbo.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, I.C.D.; Nascentes, C.R.; Matos, A.T.; Azevedo, R.F. (2005). “Determinação de parâmetros de transporte de metais pesados em solo residual compactado.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.623-630. Campina Grande, PB.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. U.S. 604 p.
- Guimarães, L.M. (2005). “Realização de ensaios de difusão e determinação de coeficientes de difusão em solo residual percolado por solução contaminante de metais pesados.” *Anais do XV Simpósio de Iniciação Científica*, Universidade Federal de Viçosa.
- Jesus, S.C. (2004). “Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios de difusão e determinação de coeficientes de difusão em solo residual percolado por solução contaminante de metais pesados.” Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil.
- Leite, A.L., Paraguassu, A.B. & Rowe, R.K. (2003). “Sorption of Cd^{2+} , K^+ , F^- and Cl^- on some tropical soils.” *Can. Geotech J.* 40, 629-642.
- Matos, A.T., Costa, L.M., Fontes, M.P.F. & Martinez, M.A. (1999). “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*, V.42 (4), p. 903-910.
- Nascentes, R. (2006). “Coeficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardamento de metais pesados em solo residual compactado.” *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 117p.
- Nascentes, R. (2006.). “Estudo da Mobilidade de Metais Pesados em um Solo Residual Compactado.” *Dissertação de Doutorado*, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 154p.
- Pinto, C. S. (2000). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos, 247p.
- Shackelford, C.D. (1993). “Contaminant transport.” *Geotechnical Practice For Waste Disposal*. D.E. Daniel, ed., Chapman & Hall, Londres.p. 33-65.