

# INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO NA INFILTRAÇÃO E RETENÇÃO DE CARGA ORGÂNICA DE CHORUME

## INFLUENCE OF A SANDY SOIL COMPACTION IN LEACHATE INFILTRATION AND ORGANIC LOADING RETENTION

JORGE HAMADA

Engenheiro Civil, Doutor em Hidráulica e Saneamento, Prof. Adjunto da Faculdade de Engenharia - Campus UNESP de Bauru

DANIELA AUGUSTA NICOLIELO DE QUEIROZ PEREIRA CALÇAS

Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Industrial

HERALDO LUIZ GIACHETI

Engenheiro Civil, Doutor em Geotecnia, Prof. Adjunto da Faculdade de Engenharia - Campus UNESP de Bauru

Recebido: 22/09/03 Aceito: 07/07/04

### RESUMO

Neste estudo avaliou-se o transporte de líquidos e a atenuação da carga orgânica do chorume de aterro sanitário em um solo arenoso fino, compactado com diferentes graus de compactação. Para tanto foram construídas colunas de 1 m do solo compactado com 75 (natural), 80, 85, 90 e 95% do Proctor Normal, que foram alimentadas com água e com chorume, sob condições não saturadas. Foram verificadas reduções sensíveis na permeabilidade do chorume e na remoção de DQO para as colunas submetidas a graus de compactação igual ou superior a 85%. Os resultados desta pesquisa mostram o grande potencial de uso deste solo compactado, em bases de aterros sanitários de pequeno porte, para a retenção da carga orgânica de chorume.

**PALAVRAS-CHAVE:** Percolação de chorume, solos arenosos, atenuação de carga orgânica.

### ABSTRACT

*Water and leachate flow and COD attenuation through a fine sandy soil at different compaction degree were assessed, based on column tests results. Each column was 1.0 m deep and 0.097 m in diameter, and the soil was compacted with 75 (natural), 80, 85, 90 and 95% of Standard Proctor Test, to receive water or sanitary landfill leachate under unsaturated conditions. During the experiment, COD removal and leachate permeability reduction were very significant for columns with 85% or higher compaction levels. The results show the high potential of this practice to install simple system in small sanitary landfills, for leachate organic loading retention.*

**KEYWORDS:** Leachate flow, sandy soils, organic loading attenuation.

### INTRODUÇÃO

A disposição direta dos resíduos domésticos no solo é a forma corrente de disposição para a maioria dos municípios brasileiros. Apesar de ser uma prática comum de destinação de lixo, até o momento, poucos estudos têm sido conduzidos para avaliar os efeitos provocados principalmente pelo percolado ou chorume, que se infiltra no solo.

Além disso, a maioria dos estudos não fornece subsídios para determinar qualitativamente os efeitos sobre o solo e sobre o próprio líquido que escoar pelo meio poroso. Em função das indefinições encontradas, verifica-se que as condutas adotadas pelos técnicos e aquela estabelecida pela legislação, impõem a adoção de sistemas totalmente confinantes.

A adoção de tais critérios, na realidade, acaba inviabilizando soluções para os pequenos municípios geradores do lixo doméstico, principalmente pela obrigatoriedade do emprego de geomembranas para impermeabilização dos respectivos aterros sanitários. Alia-se a esta alternativa, a necessidade de uma operação mais custosa. Por outro lado, quanto maiores são as exigências técnicas, menores serão as possibilidades para que um pequeno município atenda-as integralmente, transformando o que poderia ser um aterro viável em um sistema desordenado de disposição de resíduos.

Uma solução intermediária para restringir o escoamento do chorume para os aquíferos subterrâneos, é a compactação do solo da base, reduzindo sua permeabilidade. Desta forma, o conheci-

mento dos processos envolvidos nesse escoamento, através das condições de permeabilidade natural e do solo compactado, diante do escoamento de chorume, permitiria estabelecer quais parâmetros deveriam ser avaliados para viabilizar ambientalmente as instalações, e também definir potencialmente sua capacidade de confinar e atenuar os eventuais impactos sobre o solo.

A compactação do solo local para as bases de aterros constitui uma forma pouco custosa de preparação, resultando na redução da permeabilidade e garantindo um confinamento maior do chorume, apesar de não atingir, algumas vezes, os valores exigidos pelos órgãos ambientais. Neste caso, torna-se fundamental conhecer os mecanismos envolvidos, que permitam avaliar e quantificar eventuais im-

pactos, assim como estabelecer critérios específicos para execução e operação do sistema de disposição de resíduos. Por outro lado, sabe-se que o uso de geomembranas, sem o devido preparo da base, proteção mecânica ou controle de instalação, pode resultar em sistemas de contenção piores que aqueles constituídos somente por solos compactados.

Como descrito por Daniel (1993), o procedimento de compactação visa a criação de uma barreira protetora, denominada de *liner*, considerada como revestimento de base e laterais em aterros e obras similares, ou como cobertura final dos aterros. Como revestimento de base, são indicadas quando se deseja retardar ao máximo a migração de contaminantes no solo, saturados ou não, de forma a atenuar a concentração dos contaminantes quando atingirem águas subterrâneas.

McBean et al (1995) e Qasin et al (1994) descrevem que os solos naturais apresentam um sistema complexo e dinâmico em que interagem continuamente os processos físicos, químicos e biológicos. O solo é um sistema heterogêneo e polidisperso de componentes sólidos, líquidos e gasosos, em diversas proporções. São também bastante porosos e pela presença de água em seus interstícios, constituem-se como meios solventes. Os solos consistem de substâncias de alta ou baixa solubilidade, de uma grande variedade de compostos orgânicos e de organismos vivos e ainda apresentam um meio favorável no qual ocorrem atividades biológicas complexas de forma simultânea. A força de interação e a predominância de uma reação sobre outra é controlada pelos constituintes específicos do solo. As interações solo-chorume e as reações físico-químicas envolvidas durante a percolação, resultam na atenuação da carga de contaminantes do chorume. Esse processo de atenuação resulta na redução da concentração de contaminantes durante o respectivo transporte através do solo. As principais formas de atenuação estão incluídas nos seguintes mecanismos básicos: físico (filtração, difusão e dispersão, diluição e absorção); químico (precipitação/dissolução, adsorção/desorção, complexação, troca iônica e reações de redox); e microbiológico (biodegradação aeróbia e anaeróbia).

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o transporte de líquidos e a atenuação da carga orgânica do chorume de aterro sanitário nas camadas iniciais do solo e os respectivos efeitos sobre a permeabilidade do solo, considerando-se:

- Base com solo natural
- Bases compactadas com diferentes graus de compactação
- Variação da qualidade do chorume durante o escoamento

## METODOLOGIA

O solo empregado neste estudo pode ser considerado típico daquele que ocorre na região de Bauru, SP, Brasil, e foi classificado texturalmente como areia fina pouco argilosa vermelha. A partir da curva granulométrica, foi obtida a seguinte composição do solo, segundo a escala da ABNT/ NBR-7181/84:

- Areia média: 7%
- Areia fina: 67%
- Silte: 8%
- Argila 18%

Segundo Agnelli (1997), que também caracterizou o solo da mesma área de amostragem do presente trabalho, o argilomineral predominante na fração fina é a caulinita, com base na baixa capacidade de troca catiônica (CTC), confirmada por microscopia eletrônica de varredura e por difração de raios-x.

Foi montado um conjunto com 5 pares de colunas de percolação em PVC marrom com diâmetro externo de 100 mm, contendo o referido solo em 5 diferentes graus de compactação. A compactação foi controlada pela pesagem de quantidades predeterminadas de solo, que após correção da umidade (massa e umidade conhecidas), formaram camadas de 20 cm de espessura (volume conhecido), compactadas através de uma haste metálica dotada de uma chapa circular na extremidade, com diâmetro ligeiramente inferior ao interno do tubo. Cada par de colunas apresentou as características mostradas na Tabela 1. Os coeficientes de permeabilidade mostrados na Tabela 1 foram obtidos em permeâmetros. O esquema de montagem das colunas é apresentado na Figura 1.

Cada par de colunas montadas com mesmo grau de compactação (numeradas de 1 a 5, conforme Tabela 1) recebeu, em princípio, alimentação distinta de água potável (A) e chorume (B) em volumes iguais para todas as colunas. A alimentação foi semanal, visando distribuir uniformemente o volume equivalente à precipitação média de chuva referente ao semestre mais crítico que correspondia ao período de novembro a abril para a região de Bauru, SP, Brasil. Desta forma o volume semanal foi de

340 ml para cada coluna (equivalente a uma taxa de  $7,6 \times 10^{-3}$  m/dia), exceto nos casos em que se formava uma lâmina líquida acima de 30 cm, indicativa da redução de permeabilidade do meio. A evolução dos escoamentos foi acompanhada diariamente, através da coleta do efluente das colunas.

As análises químicas realizadas no decorrer desta pesquisa abrangeram os parâmetros DQO, pH, alcalinidade e condutividade elétrica.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a mesma frequência de alimentação aplicada nas colunas 1A a 3A verificou-se nos efluentes uma amplitude de resposta volumétrica muito grande para a primeira, e menores e muito semelhantes entre si para as colunas 2A e 3A. Portanto, para o escoamento de água nessas colunas, fica bem clara a distinção entre o solo com massa específica natural (coluna 1) e outros compactados (colunas 2 a 5).

Para as colunas 1B e 2B, verificou-se uma grande semelhança na amplitude de resposta (Figuras 2 e 3). Por outro lado para as colunas 3B e 4B, nota-se grande diferenciação na resposta das colunas, quando comparada com as colunas 3A e 4A (Figuras 4 e 5), evidenciando a influência das características do chorume sobre o escoamento no solo compactado. A resposta dessas duas colunas ao longo do tempo permaneceu praticamente a mesma no período observado.

A diferença fundamental entre as colunas 1B a 4B pode ser observada na Figura 6, em que se mostra o volume acumulado medido nos respectivos efluentes. Para as colunas 1B e 2B observa-se um comportamento inverso ao esperado, pois a primeira, menos compacta, apresentou como resposta, volumes acumulados menores, denotando maior retenção e dificuldade para o escoamento. Isto se deve, provavelmente, a uma compactação não uniforme das camadas durante o preparo das colunas. Por outro lado, para as colunas 3B e 4B, fica evidente a tendência de redução do escoamento em função da maior compactação do solo.

Durante os ensaios verificou-se que as colunas alimentadas com o chorume alcalino, apresentaram efluentes acidificados antes da saturação de matéria orgânica, como mostrado na Figura 7.

A acidificação destes efluentes deve ter ocorrido, provavelmente, devido à solubilização dos minerais contidos no solo

Tabela I - Resultados dos ensaios de compactação e permeabilidade com ajuste exponencial de curva para a preparação das respectivas colunas de percolação

Ensaio		Colunas	Coeficientes de permeabilidade (K) para diferentes leituras (cm/s)			Ajuste exponencial	
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	G.C. % proctor normal		1	2	3	K <sub>ajustado</sub> (cm/s)	G.C. % proctor normal
1,90	100	-	1,8x10 <sup>6</sup>	1,3x10 <sup>6</sup>	7,8x10 <sup>7</sup>	2,2x10 <sup>6</sup>	98,3
1,89	95	5A e 5B	2,0x10 <sup>6</sup>	3,1x10 <sup>6</sup>	3,2x10 <sup>6</sup>	2,6x10 <sup>6</sup>	97,6
1,77	90	4A e 4B	3,8x10 <sup>5</sup>	3,0x10 <sup>5</sup>	3,2x10 <sup>5</sup>	2,0x10 <sup>5</sup>	88,4
1,72	85	3A e 3B	5,3x10 <sup>5</sup>	4,9x10 <sup>5</sup>	5,0x10 <sup>5</sup>	4,7x10 <sup>5</sup>	84,9
1,66	80	2A e 2B	1,0x10 <sup>4</sup>	9,0x10 <sup>5</sup>	10,0x10 <sup>5</sup>	1,3x10 <sup>4</sup>	80,8
1,50	75	1A e 1B		extrapolado		2,1x10 <sup>3</sup>	70,7
1,46	70	-		extrapolado		4,1x10 <sup>3</sup>	68,4

G.C.: Grau de compactação do solo

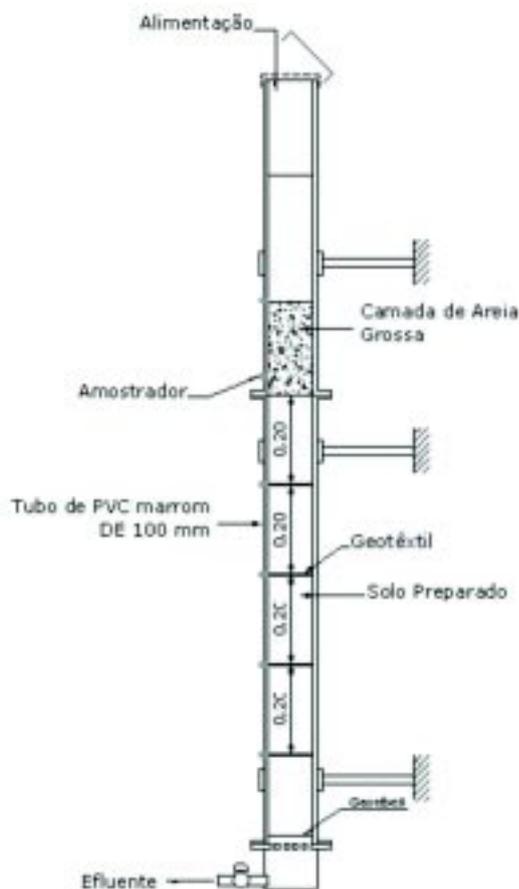
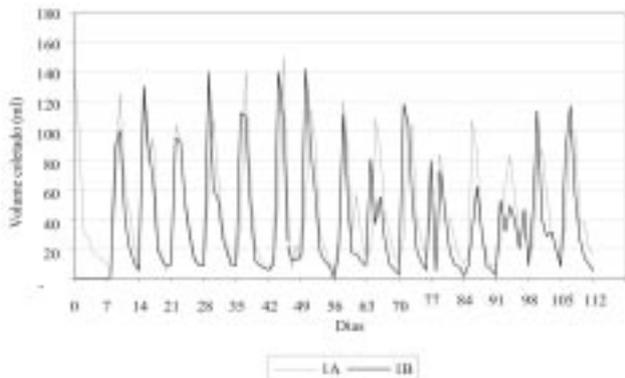
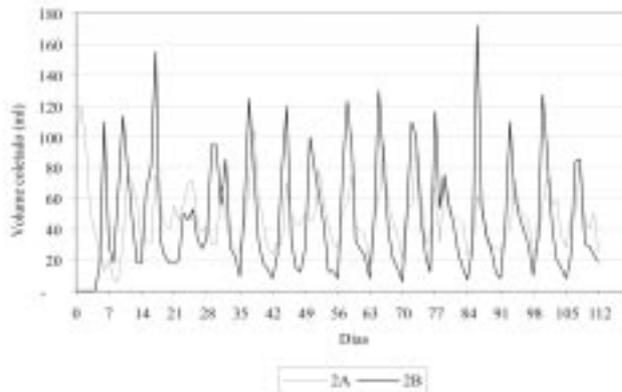


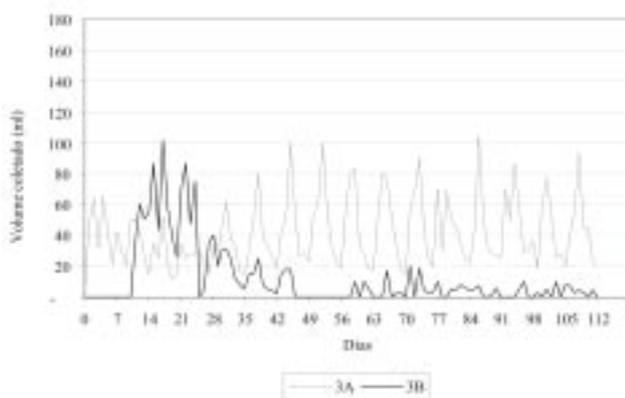
Figura I - Detalhe construtivo das colunas de percolação, que foram dispostas aos pares de forma que (A) refere-se à alimentação com água potável e (B) com chorume



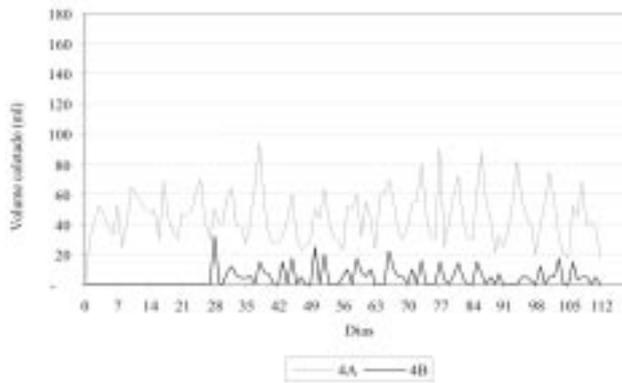
**Figura 2 - Comparação entre as colunas 1A, alimentada com água e 1B alimentada com chorume, considerando-se a resposta volumétrica no efluente**



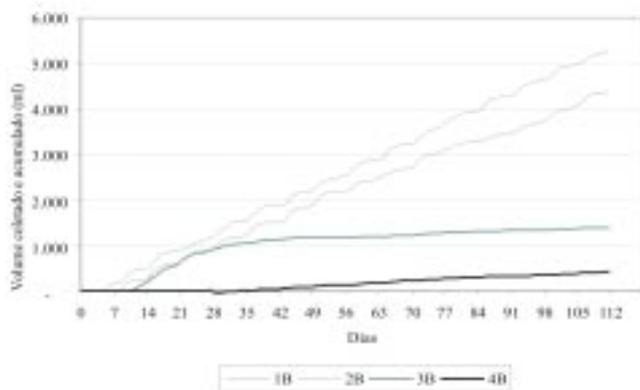
**Figura 3 - Comparação entre as colunas 2A, alimentada com água e 2B alimentada com chorume, considerando-se a resposta volumétrica no efluente**



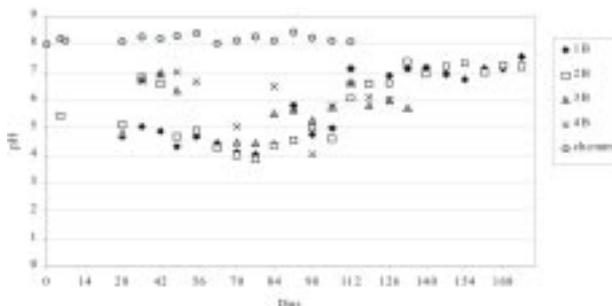
**Figura 4 - Comparação entre as colunas 3A, alimentada com água e 3B alimentada com chorume, considerando-se a resposta volumétrica no efluente**



**Figura 5 - Comparação entre as colunas 4A, alimentada com água e 4B alimentada com chorume, considerando-se a resposta volumétrica no efluente**



**Figura 6 - Volumes acumulados medidos nos efluentes das colunas 1B à 4B, alimentadas com chorume**



**Figura 7 - Valores de pH do chorume bruto e no efluente das colunas de percolação**

solo quando em contato com a solução percoladora, e também pela perda de bases do solo, arrastadas pela água e pelo chorume durante a infiltração. A acidificação do efluente pode ter tido contribuição da matéria orgânica, que tenha sofrido degradação de forma anaeróbia, denotando o surgimento de microorganismos no sistema. Por outro lado, segundo Agnelli (1997), a designação do solo estudado, em relação ao seu pH (valores entre 4 e 5), varia de hiperácido a ácido, fato este que pode ser considerado como o mais relevante para a acidificação do efluente.

Na Figura 8 observa-se que como as colunas 1B e 2B têm menor grau de compactação que as colunas 3B, 4B e 5B, não estão mais conseguindo restringir o escoamento do chorume e o aumento da condutividade elétrica está ocorrendo gradativamente. Nota-se que o efluente da coluna 5A, apresentou uma condutividade inicial bastante alta, comparando-se com as demais colunas alimentadas com água, fato que se deve provavelmente, ao longo período que ficou armazenada em contato direto com o solo, solubilizando minerais.

Ao final do período de dois meses verificou-se que os valores de DQO do efluente das colunas 1B e 2B apresentaram alterações significativas, indicando menor capacidade de retenção de matéria orgânica. Entre o 90º e o 98º dia observa-se nestas colunas o aparecimento de sólidos e uma alteração na cor do efluente, acarretando um aumento considerável no valor da DQO. Essa variação brusca fornece indícios de que ocorreu uma saturação do meio, reduzindo drasticamente sua capacidade de retenção de matéria orgânica.

Verifica-se que além da capacidade de remoção de DQO através de retenção, adsorção ou processos oxidativos, uma forma eficiente de atenuação bastante significativa é a crescente colmatagem, verificada para as colunas 3B e 4B. Nestas colunas a alimentação praticamente foi interrompida, uma vez que a resposta volumétrica no efluente foi muito pequena, atingindo valores inferiores a 100 ml mensais.

Quando comparados às colunas 1B e 2B, esses resultados demonstram a influência significativa da compactação do solo, pois nestas colunas não se observaram alterações relevantes na resposta volumétrica das alimentações semanais. Desta forma conclui-se, para o experimento realizado, que graus de compactação

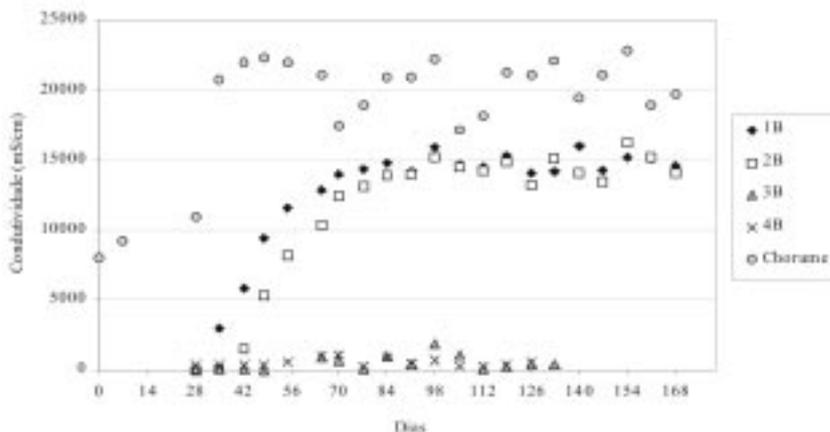


Figura 8 - Valores de condutividade elétrica do chorume bruto e no efluente das colunas de percolação

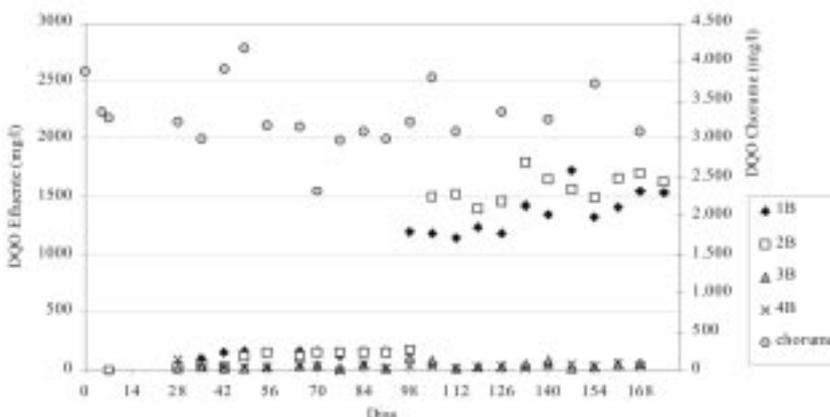


Figura 9 - Valores da DQO do chorume bruto e no efluente das colunas de percolação

acima de 85% são altamente benéficos para a atenuação de DQO considerando-se o chorume utilizado.

Na avaliação dos resultados dos ensaios realizados nas colunas 1B e 2B, observa-se um limite bastante claro na capacidade de remoção de DQO, como ilustrado na Figura 9 e mostrado Tabela 2. Para constatar essa capacidade, foi elaborada a Tabela 3, em termos de carga de DQO, considerando-se como limite os dias em que foram observadas elevações abruptas deste parâmetro, em destaque.

Desta forma, um solo com massa específica natural teria a capacidade de retenção de 1,415 g de DQO por kg de solo seco. Para um grau de compactação de 80% esta capacidade seria de 1,363 g de DQO por kg de solo seco, valor próximo ao anterior. Em valores absolutos, isto significa que uma determinada quantidade de solo retém uma quantidade proporcional de DQO.

## CONCLUSÕES

### Fluxo de líquidos no solo

Considerando o escoamento somente de água, diferença marcante foi observada somente para o solo com grau de compactação de 95%, onde houve uma redução significativa da permeabilidade. Para os demais não houve diferenças significativas, exceto na maior amplitude de resposta para o efluente da coluna cujo solo foi compactado à valores de massa específica natural.

Em relação ao escoamento de chorume não foram observadas alterações significativas para as duas colunas com menor grau de compactação (natural e 80%), assemelhando-se ao comportamento das primeiras colunas submetidas à alimentação com água. Por outro lado, os solos compactados com graus de 85 e 90%, apresentaram entre si comportamentos semelhantes, com redução cres-

Tabela 2 - Cargas de DQO aplicadas às colunas de percolação

Dias	Alimentação		DQO (mg/l)	Carga de DQO (g)	Carga de DQO acumulada (Kg)	DQO efluente (mg/l)	
	Volume (ml)	Vol. acumulado (ml)				Coluna 1 B	Coluna 2 B
0	340	340					
1	340	680					
7	340	1.020	3.280	1,12	0,00375		
13	340	1.360	3.280	1,12	0,00487		
20	340	1.700	3.280	1,12	0,00598		
27	340	2.040	3.240	1,10	0,00709	19	19
34	340	2.380	3.000	1,02	0,00811	103	45
42	340	2.720	3.920	1,33	0,00944	145	31
48	340	3.060	4.180	1,42	0,01086	162	124
55	340	3.400	3.180	1,08	0,01194	156	153
62	340	3.740	3.180	1,08	0,01302	162	128
69	340	4.080	2.320	0,79	0,01381	163	152
75	340	4.420	2.320	0,79	0,01460	123	150
83	340	4.760	3.100	1,05	0,01565	164	154
90	340	5.100	3.000	1,02	0,01667 <sup>(1)</sup>	162	157
97	340	5.440	3.240	1,10	0,01778 <sup>(2)</sup>	1.200	174
104	340	5.780	3.800	1,29	0,01907	1.182	1.494
111	340	6.120	3.100	1,05	0,02012	1.144	1.525

<sup>(1)</sup> Saturação de DQO observada para a coluna compactada a 70% do proctor normal (1B)

<sup>(2)</sup> Saturação de DQO observada para a coluna compactada a 80% do proctor normal (2B)

Tabela 3 - Características físicas e capacidade limite de retenção de carga de DQO das colunas de infiltração

Parâmetro	Unidade	Colunas	
		1	2
Carga de DQO acumulada	kg	0,01667	0,01778
Grau de compactação	%	70	80
Volume coluna	m <sup>3</sup>	0,00785	0,00785
Massa específica do solo seco	kg/m <sup>3</sup>	1500	1660
Massa de solo	kg	11,781	13,038
Capacidade de retenção por unidade de massa	gDQO/kgSolo	1,415	1,363

cente do fluxo para valores inferiores a 100 ml mensais. Tal fato demonstra suscetibilidade à colmatação do solo compactado estudado com graus maiores ou iguais a 85%, promovida pelas partículas em suspensão e pelo desenvolvimento provável de flocos e películas biológicas. O solo compactado a 95%, não apresentou resposta até o momento, com relação ao escoamento, mostrando que para as condições hidráulicas impostas, não foi possível estabelecer um fluxo para o chorume aplicado.

### Capacidade de retenção de carga orgânica

Com relação ao item mais relevante deste estudo, é possível concluir que o solo em questão apresenta, sob diferentes condições, bom potencial para retenção de carga orgânica de aterros sanitários, apesar de ser classificado texturalmente como arenoso. Ainda, mesmo sob condições de massa específica natural, apresenta características importantes de atenuação, com retenção significativa de matéria orgânica. Sua capacidade de atenuação torna-se mais significativa, quando compactado em graus acima de 85% do Proctor Normal.

Portanto, a aplicabilidade e importância deste solo residem, em princípio, no controle da compactação em termos de energia e de umidade. Quando associado à geosintéticos, este solo pode dispensar, com vantagens econômicas, o uso de argila ou solos argilosos nas bases de aterros sanitários.

Presume-se fortemente que a presença da caulinita na fração fina do solo, embora não seja normalmente a mais indicada para a confecção de *liners*, tenha um papel fundamental na capacidade de retenção, principalmente quando se efetua a compactação com maior energia para este solo.

Conclui-se, também, que as características ácidas do solo são fundamentais para remoção da elevada alcalinidade do chorume em questão, que ocorre naturalmente, pela neutralização das bases químicas existentes.

### Limitações para emprego dos resultados obtidos

Os resultados obtidos, embora relevantes, devem ser avaliados com cautela quando se vislumbra o emprego deste tipo de solo sob condições de campo. Em um primeiro momento, duas condições deveriam merecer uma avaliação criteriosa: a heterogeneidade do solo e o controle de execução da base.

Porém, o mais importante, é a consideração que os estudos foram realizados sob condições de laboratório e as alimentações de água e chorume foram controladas e de maneira uniforme, com taxas hidráulicas que propiciaram um escoamento em meio não saturado. Para taxas maiores, como ocorre na incidência de chuvas torrenciais e de longa duração, as condições de permeabilidade podem ser alteradas significativamente, resultando em cargas hidráulicas bem acima daquelas aplicadas em laboratório.

Portanto, os resultados merecem estudos complementares, inclusive com aumento da escala e sob condições de campo.

### AGRADECIMENTO

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelos recursos que viabilizaram a execução desta pesquisa.

### REFERÊNCIAS

AGNELLI, N., *Comportamento de um Solo Colapsível Inundado com Líquidos de Diferentes Composições Químicas*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos. 1997.

DANIEL, D.E. *Case histories of compacted clay liners and covers for waste disposal facilities*. In: Proc. of the 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, St. Mo., S. Prakash (ed.), p.1407-1425. 1993.

McBEAN, E.A., ROVERS, F.A., FARQUHAR, G.J. *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. Prentice Hall, Inc. 521 p. 1995.

QASIM, S.R., CHIANG, W. *Sanitary Landfill Leachate - Generation, Control and Treatment*. Technomic Publishing Co., Inc. 323 p.1994.

---

#### Endereço para correspondência:

**Jorge Hamada**  
**Rua Martinha Dal Médico, 1-35**  
**17018-150 - Bauru - SP - Brasil**  
**Tel.: (14) 3226-1535**  
**E-mail: joha@feb.unesp.br**

## 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

18 a 23 de setembro de 2005

Resumos expandidos: até 30 de outubro de 2005  
 Centro de Exposições Albano Franco

Campo Grande - MS