

Análise da curva de retenção de um solo silto-argiloso usado na cobertura do aterro sanitário em Minas do Leão-RS

Mattheus Souza Porto
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, mattheus_porto@hotmail.com

Eliana Bridi
Prefeitura Municipal de Porto Alegre, Porto Alegre, Brasil, elibridi@terra.com.br

Luiz Antônio Bressani
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, bressani@ufrgs.br

Wai Ying Yuk Gehling
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, gehling@ufrgs.br

RESUMO: A grande exploração dos recursos ambientais em função do crescimento das grandes cidades tem gerado problemas quanto à destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos. O aterro sanitário é uma forma de destinação de resíduos muito utilizada no Brasil, mas potenciais impactos ao solo, à água e à atmosfera podem ser causados. Em Minas do Leão – RS, há um aterro de RSU inserido em uma cava remanescente de exploração de carvão, o qual é objeto de estudo no presente trabalho. Pretende-se avaliar o fluxo de biogás que atravessa a camada de solo silto-argiloso que cobre o aterro até chegar à atmosfera. Busca-se analisar a curva de retenção deste material e sua influência no comportamento de permeabilidade ao ar de um solo não saturado, avaliando os valores de emissão de biogás medidos em campo. Utiliza-se a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) para modelar a curva de retenção obtida. Para a realização dos ensaios de curva de retenção, foi adotado o método do papel filtro e ensaiados corpos de prova compactados nas condições de campo do solo silto-argiloso. Seguindo trajetórias de umedecimento e secagem, o solo apresentou valores baixos de sucção (<70 kPa) para elevados graus de saturação ($>80\%$). Neste intervalo, em campo, não foram registrados fluxos significativos de passagem de biogás para a atmosfera. Para graus de saturação de 60 a 70%, o solo apresentou sucções elevadas (~ 400 kPa), e, em campo, a emissão de biogás neste intervalo se manteve igual à de graus de saturação superiores a este intervalo. Assim, fatores como os níveis de sucção apresentados, a porosimetria e a quantidade de água no solo favoreceram o bloqueio da passagem do biogás para a atmosfera. O solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário apresentou um bom desempenho como forma de retenção no fluxo de biogás para a atmosfera, além de possuir vantagens quanto à sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro sanitário, Curva de retenção, Sucção, Fluxo de biogás.

1 INTRODUÇÃO

O acelerado aumento populacional nas grandes cidades naturalmente acarreta em um crescimento da necessidade por bens de consumo. Consequentemente, grandes demandas por materiais geram problemas

quanto ao destino dos rejeitos a serem descartados. A formação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) oferece impactos ao solo, aos recursos hídricos, à atmosfera e à saúde humana e, quando destinados inadequadamente, há grandes possibilidades de potencialização destes impactos.

Na Europa, nos Estados Unidos e no Brasil há uma grande dependência na disposição de RSU em aterros sanitários. A destinação de RSU em aterros é a forma mais antiga de disposição de rejeitos. Principalmente por ser um método barato e por admitir uma grande variedade de resíduos a serem dispostos, os aterros são muito utilizados como destino final de RSU. Por outro lado, podem ser fontes de poluição atmosférica, gerada pela fuga de biogás, podem tornar a área imprópria para usos futuros e não mostram vantagens no aproveitamento de energia quando comparado com formas mais inovadoras de disposição de RSU (Cheremisnoff, 2003).

Diante das desvantagens e dos potenciais impactos ambientais inerentes da destinação de RSU, deve haver uma grande preocupação quanto aos processos de operação de um aterro sanitário no que diz respeito à coleta de percolados, à drenagem de águas pluviais, à impermeabilização da fundação e à criação de barreira ao biogás.

Em virtude de sua composição, formada basicamente por gás metano e gás carbônico, o biogás causa danos à camada de ozônio e tende a amplificar os impactos do efeito estufa. Pelo biogás ser gerado a partir de reações anaeróbias de decomposição de matéria orgânica, a sua presença em aterros é muito comum e a atenção quanto à contenção deste gás acaba sendo muito importante para a preservação do meio ambiente.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa avaliar a curva de retenção do solo usado como camada de cobertura do aterro sanitário de Minas do Leão – RS. Com isto, busca-se avaliar a influência da curva de retenção do solo na permeabilidade ao ar deste material. Este estudo procura analisar o fluxo de gases medidos em campo com estudos de outros materiais presentes na literatura. Além disso, objetiva-se caracterizar o solo e verificar sua adequação ao fim de atuar como camada de cobertura de um aterro de RSU, principalmente no que se refere à barreira ao biogás formado

pela decomposição de rejeitos.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

O aterro sanitário de Minas do Leão está inserido em uma antiga cava de exploração de carvão a céu aberto, situada na Bacia Carbonífera Butiá-Leão, ao sul do vale do Rio Jacuí, no Rio Grande do Sul e a 86 km de Porto Alegre (Figura 1(a) e Figura 1(b)). Este aterro faz parte da Central de Resíduos do Recreio (CRR) e é operado pela Companhia Rio-grandense de Valorização de Resíduos (CRVR).

A CRR possui uma área total de 500 hectares de área, dos quais cerca de 15% são destinados para o recebimento de RSU. Em média, o aterro recebe 3.000 ton /dia de resíduos e sua vida útil estimada é de 23 anos. A área adotada para a realização do trabalho está situada a leste da área destinada para a disposição de RSU, com área de aproximadamente 650 m², conforme mostrado na Figura 1(c).



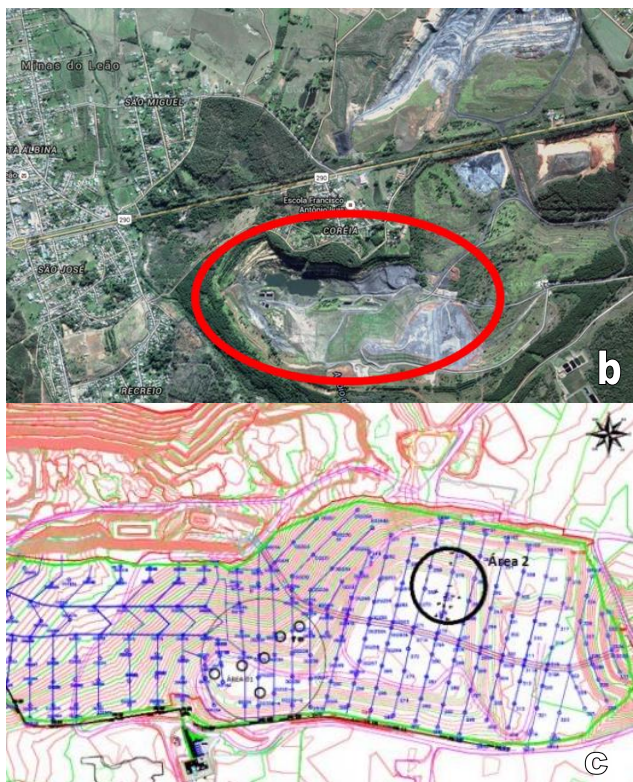


Figura 1: (a) Localização do município de Minas do Leão; (b) Imagem de satélite da CRR; (c) Indicação da área estudada (Área 02).

A disposição de resíduos no aterro é feita em camadas. Após o recebimento de RSU, uma camada de solo é depositada sobre os resíduos. Para a deposição da camada subsequente de RSU, a camada de solo é removida e disposta sobre a nova camada de rejeitos.

4 METODOLOGIA

Para o estudo da adequação do solo como camada de cobertura de aterro sanitário, buscaram-se realizar ensaios de caracterização, envolvendo a execução de ensaios de distribuição granulométrica, de limites de consistência e de compactação. Além disso, foi determinada a curva de retenção para a obtenção de características não saturadas deste material.

4.1 Caracterização do Solo

Para a análise das características do solo estudado, os ensaios de análise granulométrica,

de limite de liquidez, de limite de plasticidade e de compactação seguiram, respectivamente, as normas NBR 7181/1988, NBR 6459/1984, NBR 7180/1988 e NBR 7182/1988.

4.2 Ensaios de Curva de Retenção

Para estes ensaios, seguiu-se a norma americana ASTM D5298-10 e foi adotada a técnica do papel filtro, usando o modelo Whatman nº 42. Este método de ensaio usa como princípio a variação de umidade no papel para mensurar o nível de sucção no solo. Para isso, o papel filtro e a amostra de solo atuam em conjunto. Para uma amostra apresentando um determinado grau de saturação, o papel é colocado em contato com o solo. Após um período de equalização de umidades do conjunto, é possível determinar a sucção neste solo com o uso de uma equação de calibração característica do tipo de papel utilizado.

Os ensaios de curva de retenção realizados para o presente trabalho foram executados com três corpos de prova (CPs) de 5 cm de diâmetro por 2 cm de altura e compactados nas condições de campo (solo silte argiloso da camada de cobertura do aterro estudado). Foi adotado um período de equalização de umidades do conjunto solo-papel de 7 dias, durante os quais os CPs eram conservados em uma caixa de isopor e embalados com filme de PVC e papel alumínio (Figura 2). Inicialmente, o solo foi submetido a uma trajetória de umedecimento, seguida de um processo de secagem e de uma nova trajetória de umedecimento.

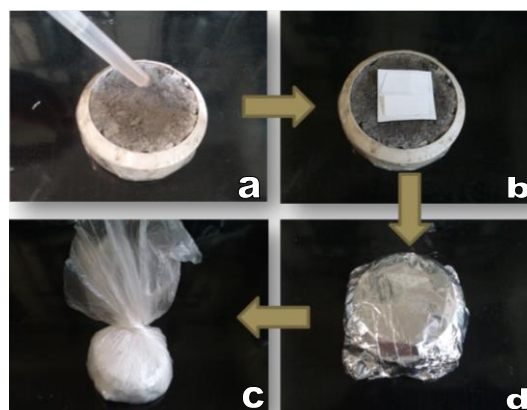


Figura 2: (a) Umedecimento; (b) contato solo-papel; (c) embalagem do CP; (d) conservação do CP.

4.3 Aplicação de modelo numérico à curva de retenção

Além de relacionar níveis de sucção para diferentes quantidades de água no interior de um solo, a curva de retenção pode ser usada na estimativa da função permeabilidade e da resistência ao cisalhamento em solos não saturados. Isso faz com que o conhecimento detalhado da curva de retenção seja muito válido para o entendimento do comportamento de solos em condição não saturada.

Uma das primeiras equações que buscam relacionar a quantidade de água com os níveis de sucção de um solo (através da curva de retenção de dessaturação) foi apresentada com um embasamento teórico por Fredlund e Xing (1994). Este modelo considera a distribuição porosimétrica do solo para a elaboração da seguinte relação:

$$S = S_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad (1)$$

Onde:

S: Quantidade de água expressa em grau de saturação;

S_s: Quantidade de água inicial expressa em grau de saturação (dado experimental);

ψ : Sucção (kPa);

a : parâmetro de ajuste da curva relacionado com o valor de entrada de ar;

m : parâmetro de ajuste da curva relacionado com a quantidade de água residual;

n : parâmetro de ajuste da curva relacionado com a inclinação da curva característica de dessaturação.

4.4 Ensaios de Medição de Fluxo de Gás em Campo

Medições de emissão de biogás em campo foram realizadas por meio de ensaios com placa de fluxo estática de tampa móvel (Figura 3). Este tipo de ensaio, além de registrar o fluxo de O₂, CO₂ e CH₄, permite medir níveis de pressão (interna e externa) e temperatura (externa e

interna). A placa possui a dimensão de (1,00 x 1,00) m, estrutura de aço carbono e tampa móvel em acrílico. Com a cravação da estrutura de aço carbono no solo, a tampa de acrílico é sobreposta ao suporte e o ar no interior da placa fica confinado. A canaleta de encaixe da tampa móvel é vedada colocando-se água. Um período de cerca de 1 minuto é adotado para a equalização dos gases dentro da placa de fluxo. A seguir, a homogeneização é realizada através do agitador manual e conecta-se o equipamento medidor GEMM 2000. Com o início das leituras, o intervalo entre as medições varia em função do fluxo registrado (de 5 minutos caso haja aumento de fluxo ou de 10, 15 ou 20 minutos para estabilização ou decaimento da emissão). Encerradas as leituras em um ponto, a tampa de acrílico móvel é removida e colocada sobre a estrutura de aço da placa de fluxo do ponto seguinte. Para cada ponto, foram realizadas leituras em datas diferentes, que levaram em conta as condições climáticas e os drenos, que poderiam ou não estar ativos (Bridi, 2015).



Figura 3: Execução do ensaio de placa de fluxo, no momento de vedação da canaleta de encaixe com água.

5 RESULTADOS E SUAS APLICAÇÕES

A partir da realização dos ensaios de caracterização do solo usado na camada de cobertura do aterro de RSU, foram observados os seguintes resultados:

5.1 Caracterização do solo

A distribuição granulométrica do material mostrou uma porcentagem de finos de 84% (29% de argila e 55% de silte), 11% de areia (6% fina, 2% média e 3% grossa) e 5% de pedregulho fino. O solo é caracterizado como silto argiloso.

Os testes de compactação revelaram uma umidade ótima de aproximadamente 17,5% e um peso específico aparente seco máximo de cerca de 17,21 kN/m³.

Os limites de consistência encontrados para o solo estudado apresentaram valores de 42% para o limite de liquidez (LL) e 21% para o limite de plasticidade (LP). O valor do índice de plasticidade (IP) é de 21%, revelando um comportamento plástico do solo.

5.2 Ensaio de Curva de Retenção

Os ensaios de curvas características do solo usado na cobertura do aterro buscaram relacionar graus de saturação com os níveis de sucção apresentados pelo solo por meio da técnica de medição de sucção do papel filtro. A curva de retenção obtida, seguindo processos de

umedecimento e secagem, mostrou uma boa adequação do material ao método de medição utilizado e pode ser observada na Figura 4.

Observando o gráfico obtido nos ensaios de papel filtro, é importante destacar os seguintes aspectos:

- seriam necessárias mais medidas no processo de secagem para a obtenção do valor de grau de saturação residual;
- para elevados graus de saturação (>80%) o solo apresentou valores de sucção menores que 70 kPa;
- para graus de saturação entre 60 e 70%, foram encontrados níveis de sucção da ordem de 400 kPa;
- para saturações em torno de 30%, o solo apresentou elevados níveis de sucção (~7 MPa);
- a curva mostra um valor de entrada de ar de aproximadamente 100 kPa;
- a curva de retenção do solo que cobre o aterro mostrou valores intermediários entre curvas típicas de solos siltosos e solos argilosos propostas por Fredlund e Xing (1994);
- os resultados mostraram pequenos valores de histerese diante de trajetórias de umedecimento e secagem do material estudado.

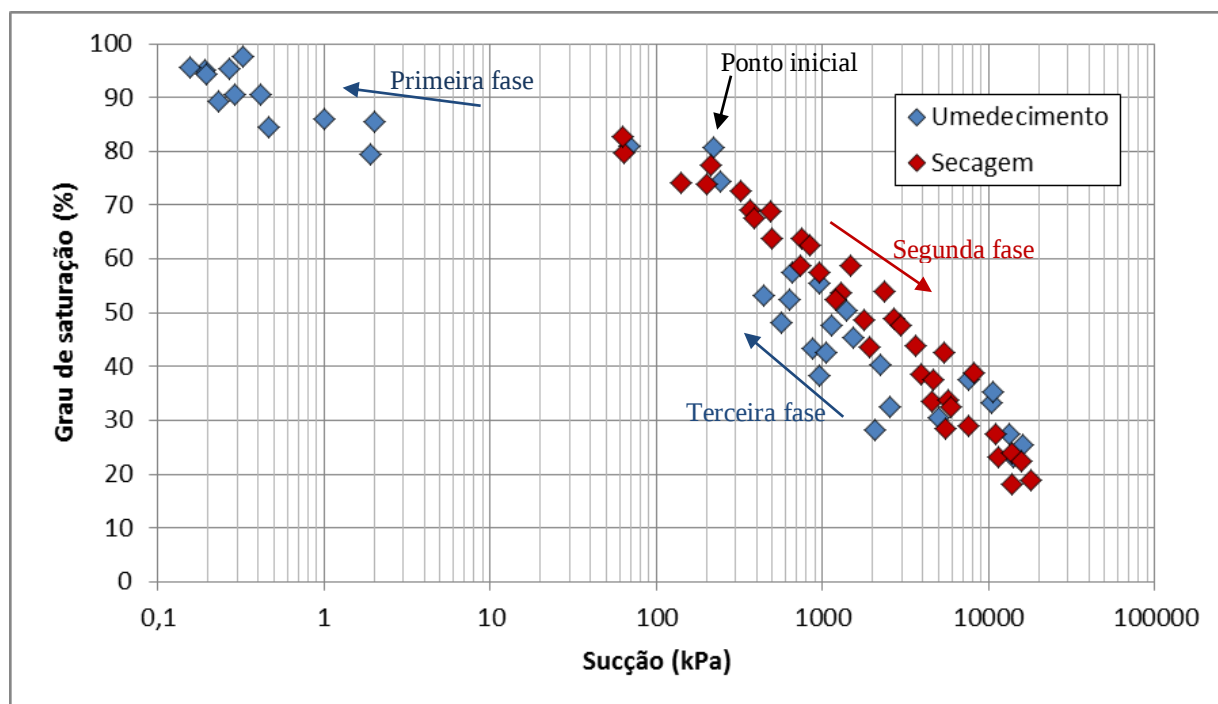


Figura 4: Gráfico da curva de retenção

5.2.1 Aplicação de modelo numérico à curva de retenção

A partir da equação proposta por Fredlund e Xing (1994) e dos resultados obtidos no processo de dessaturação do solo silto argiloso,

os seguintes parâmetros foram estabelecidos: $a = 2000$; $m = 2,54$; $n = 0,52$.

A Figura 5 apresenta a plotagem da equação associada a estes parâmetros, juntamente com os resultados dos ensaios de curva de retenção na dessaturação.

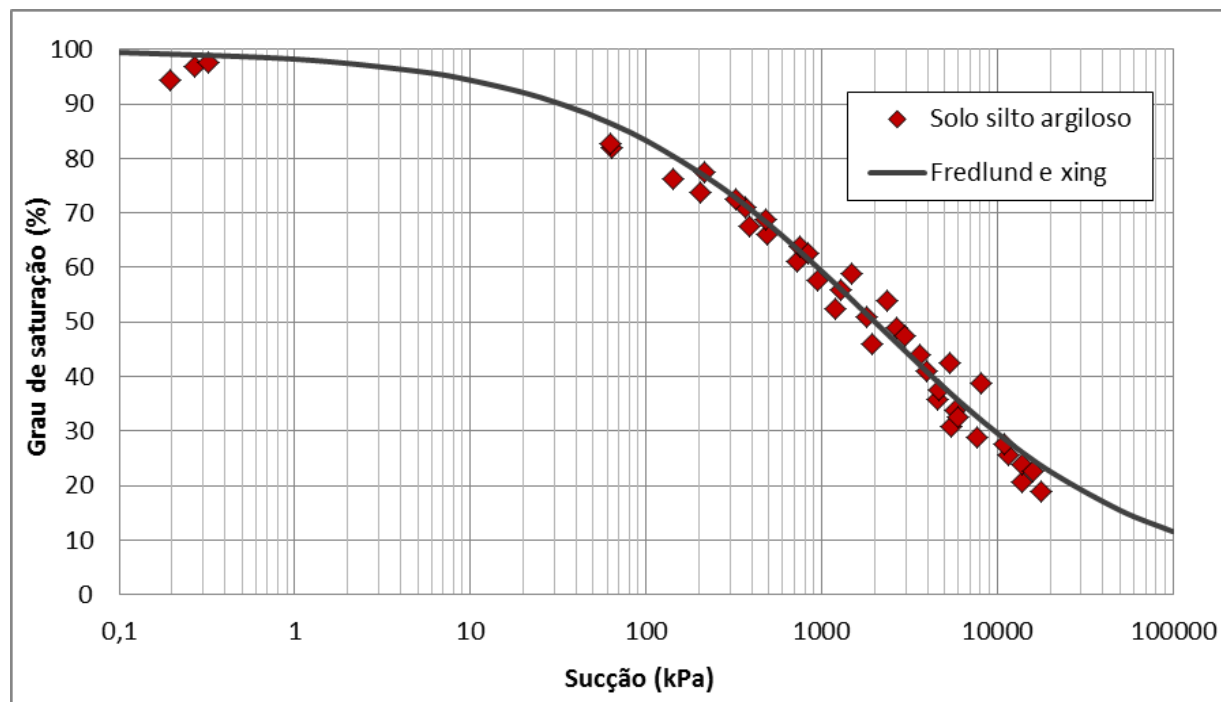


Figura 5: Aplicação da equação de Fredlund e Xing

5.2.2 Permeabilidade ao ar de solos não saturados

Quando se deseja entender o fluxo de gás através de um solo, o comportamento permeável ao ar por consequência acaba sendo investigado. Além disso, uma relação entre o coeficiente de permeabilidade ao ar e a sucção mátrica do solo pode ser estabelecida, conforme Brooks e Corey (1964), mas estes valores não foram medidos no presente trabalho.

Com o aumento do grau de saturação, há a diminuição do coeficiente de permeabilidade do ar em um solo não saturado. Isto faz com que, geralmente, maiores valores de permeabilidade ao ar ocorram para níveis de sucção elevados, quando os graus de saturação tendem a ser menores (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Em solos usados como coberturas de aterros sanitários, busca-se usar materiais que possam

se manter em graus de saturação em que a permeabilidade ao ar seja relativamente baixa (formando uma barreira à emissão de gases para a atmosfera), mas por outro lado, devem apresentar pequenos valores de permeabilidade à água (a fim de evitar infiltrações). Desta forma, indica-se o uso de materiais de granulometria fina e com uma grande capacidade de compactação, para que menores quantidades de água sejam necessárias para atingir graus de saturação elevados.

5.3 Ensaio de Placa de Fluxo

A tabela 1 apresenta os resultados das emissões em termos de percentuais de metano, gás carbônico e oxigênio medidas na superfície da camada de cobertura e os fluxos obtidos para CH_4 e CO_2 . Em cada ponto foram feitos vários ensaios, em datas diferentes, buscando avaliar a

influência do clima, da temperatura e dos drenos ativos ou não. Os valores apresentados na Tabela 1 foram escolhidos por serem os que melhor representam a média dos resultados obtidos com os drenos ativos, mas estes valores não tiveram variações consideráveis ao longo do tempo. Na Tabela 1, verifica-se que excetuando os pontos 1 e 4, os demais apresentaram percentuais de metano variando de 0,10 a 8,80% e gás carbônico variando de 0,10 a 6,30%. Os valores obtidos para os fluxos de metano ficaram entre 0,14 e 4,24 g/m².h e gás carbônico entre 0,40 e 9,62 g/m².h, estando dentro da média encontrada em aterros no Brasil. Fernandes (2009) encontrou valores entre 0,96 e 3,84 g/m² /h em Minas Gerais, ambos com sistema de extração ativo. No ponto 01 observa-se a maior emissão de CH₄ ocorrida (Bridi, 2015).

Tabela 1. Resultados das medições de fluxo em campo.

Caixa	Placa de Fluxo (%)			Fluxo CH ₄	Fluxo CO ₂
	CH ₄	CO ₂	O ₂	g/m ² .h	g/m ² .h
01	39,30	29,90	27,20	34,25	86,04
02	5,50	3,80	18,90	4,24	8,11
03	0,10	0,10	19,20	0,67	1,39
04	20,30	14,80	13,00	17,19	26,10
05	8,80	6,30	18,60	23,96	51,22
06	2,80	2,30	19,10	3,40	7,74
07	0,60	0,40	19,50	1,35	1,14
08	0,10	0,10	20,20	0,14	0,40
09	1,40	1,30	19,80	0,98	4,82
10	0,10	0,20	20,10	1,01	0,50
11-Tal	0,20	0,50	21,50	0,85	2,30
12-Tal	0,10	0,30	19,70	0,27	1,50
13	3,40	2,70	18,50	3,91	9,62
14	0,20	1,80	20,20	1,86	2,80
15	1,20	0,90	19,90	2,79	5,87

5.4 Condições físicas do solo em campo

A Tabela 2 indica condições físicas de campo do solo silto argiloso que cobre o aterro. Os valores encontrados representam índices de vazios, umidades, graus de saturação e pesos específicos encontrados nos quais o solo geralmente se encontra.

Tabela 2. Condições físicas do solo de campo.

Amostras	e	Sr (%)	ω (%)	γ _d (kN/m ³)	γ _n (kN/m ³)
1	0,51	82,08	15,70	17,41	20,14
2	0,51	75,38	14,37	17,42	19,93
3	0,49	81,68	14,79	17,72	20,35
4	0,50	81,43	15,11	17,58	20,24
5	0,52	79,30	15,28	17,36	20,01
6	0,57	83,66	17,60	16,83	19,8
7	0,50	75,09	14,11	17,51	19,98
8	0,55	80,54	16,36	17,05	19,83

Observa-se que em campo o solo se encontra em níveis de umidade de cerca de 15,41%, equivalente a um grau de saturação da ordem de 79,9%. Para estas condições, o solo possui níveis de sucção de aproximadamente 70 kPa, valores menores que o valor de entrada de ar, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de curva de retenção.

6 CONCLUSÕES

Com base nas medidas de campo, o solo silto argiloso, usado para cobrir o aterro de RSU apresenta um bom desempenho como barreira de biogás. O solo silto argiloso em estudo favorece o comportamento de baixa permeabilidade que se deseja para a camada de cobertura de um aterro sanitário. O comportamento de compactação do solo foi julgado satisfatório para obter um baixo índice de vazios em campo, por consequência, pequenas quantidades de água são suficientes para manter o solo com graus de saturação elevados, implicando em uma menor permeabilidade ao biogás.

Os resultados dos ensaios de curva de retenção mostram uma boa adequação do método do papel filtro adotado para a medição dos níveis de sucção em diferentes condições de saturação do solo. Os elevados níveis de sucção apresentados pelo solo para baixos valores de graus de saturação justificam a grande resistência à escavação apresentada pelo

material. As condições de umidade nas quais o solo se encontra em campo mostram que os níveis de sucção são menores que o valor de entrada de ar, o que favorece os baixos valores de fluxo de biogás para a atmosfera.

Com modelos matemáticos, é possível usar equações da curva de retenção dos solos para estimar valores de permeabilidade ao ar em solos não saturados. Estes valores não foram ainda quantificados, mas são o objetivo de futuras pesquisas.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFRGS e ao CNPq pela incentivo à pesquisa. O primeiro autor agradece aos colegas do Laboratório de Geotecnologia da UFRGS (LAGEOtec) pela ajuda e companheirismo.

REFERÊNCIAS

- Bridi, E. (2015) Avaliação da emissão de biogás em aterro sanitário, *REGEO 2015*, Brasília, Brasil.
- Brooks, R.H. e Corey, A.T. (1964) *Hydraulic properties of porous medium*, Hydrology paper, Colorado State University (Fort Collins), Nr. 3, March.
- Cheremisnoff, N.P. (2003) *Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Boston, MA, USA, 477 p.
- CRVR – Companhia Rio-grandense de Valorização de Resíduos. Em: <http://www.crvr.com.br/UnidadeMinasLeao.html> - aceso em 15/01/2016.
- Fernandes, J.G.A. (2009) *Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 116p.
- Fredlund, D.G. e Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, 1st ed., John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA, 517 p.
- Fredlund, D.G e Xing, A. (1994). *Equations for the soil water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal, NRC, Vol. 31, p. 521-532.