



Determinação das propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizado na camada de cobertura do Aterro Sanitário de Santa Maria/RS

Mainara Santiago Callegaro

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, mainaracallegaro@gmail.com

Thaís Aquino dos Santos

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, thaiis_as@hotmail.com

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, rinaldo@ufsm.br

RESUMO: O presente trabalho visa avaliar as propriedades hidráulicas do solo empregado na camada de cobertura do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita, localizado em Santa Maria/RS. A metodologia da pesquisa consistiu em ensaios de caracterização física, construção da curva de retenção do solo e ensaios de permeabilidade. Assim, verificou-se que a camada de cobertura do aterro é um solo silto areno-argiloso que possui características adequadas, como permeabilidade na ordem de 10^{-6} e uma porosidade média de 51,19%, sendo a microporosidade média de 43,21% e macroporosidade média de 7,98%. Os resultados obtidos indicam que o uso desse solo como camada de cobertura é adequado. Além disso, a curva de retenção pode comprovar as características desejadas para a função desse solo, como o baixo infiltração de água pelo solo e controle do fluxo de gás produzido pelos resíduos sólidos do aterro.

PALAVRAS-CHAVE: Sucção, Curva de retenção do solo, Permeabilidade, Aterro sanitário.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as diversas técnicas utilizadas para o tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o aterro sanitário figura como uma técnica largamente utilizada nos países em desenvolvimento, devido à facilidade de operação e ao custo relativamente baixo, quando comparados com outras formas de tratamento. Um dos princípios do aterro sanitário é controlar a migração de contaminantes, sejam líquidos ou gasosos, para o meio ambiente por meio de técnicas de impermeabilização de base e cobertura para contenção de resíduos, com a finalidade de evitar a poluição das águas de superfície e subterrâneas, do solo e do ar (ALCÂNTARA, 2007; PECORA et al. 2008; BOSCOV, 2008).

No Brasil, a impermeabilização da cobertura de aterros sanitários tem sido executada em camadas de solo compactado na umidade ótima, principalmente, solos argilosos, uma vez que a principal preocupação é promover uma cobertura com baixa permeabilidade ao fluxo descendente de água pela camada, evitando o acréscimo de umidade à massa de resíduos e; o fluxo ascendente de gases para a atmosfera (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015). A compreensão do processo de percolação (fluxo de água pelo solo) se faz, portanto, extremamente necessário.

O comportamento do solo no estado de não saturação exige a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações as quais o solo pode estar sujeito. Para compreender esse comportamento, a sucção é



um parâmetro determinante, variando com a quantidade de água presente nos vazios de um solo e frequentemente analisada a partir da curva característica do solo. Desse modo, é possível prever o comportamento da água livre nos poros dos solos não saturados, frente às importantes propriedades geotécnicas, como resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade.

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar as propriedades hidráulicas do solo empregado na camada de cobertura do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita, localizado em Santa Maria/RS. O objetivo principal é verificar sua adequação como cobertura de um aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU), uma vez que é de fundamental importância para minimizar os impactos ao meio ambiente atrelados a esse tipo de obra civil.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Solos não saturados

A Mecânica dos Solos envolve uma combinação entre a Mecânica do Contínuo e as propriedades dos solos (FRANCESCHET, 2006). Esta descrição é ampla e pode englobar uma gama variada de tipos de solo. Esses solos podem se encontrar saturados com água ou conter outros fluidos em seus vazios, como o ar. Estudos envolvendo solos não saturados são de interesse da mecânica dos solos desde a instituição da mesma como uma ciência de engenharia. Esse interesse é justificado por existirem diversas obras de engenharia envolvendo solos não saturados como aterros, barragens, estabilização de taludes e obras de infraestrutura viária.

Fredlund e Rahardjo (1993) afirmam que os solos são encontrados na natureza como mistura de várias fases. Uma mistura de partículas sólidas e ar constitui um solo seco, enquanto uma mistura de partículas sólidas e água constitui os solos saturados. Entre esses dois extremos, tem-se os solos não saturados, formados por partículas sólidas, água e ar em percentagens

volumétricas distintas.

Fredlund e Morgenstern (1977) sugerem que se deve considerar ainda uma quarta fase independente, denominada interface ar-água (película contrátil). A película contrátil exerce uma tensão de tração nos materiais contíguos, denominada tensão superficial. Devido à ação dessa tensão, a interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica. Se a fase gasosa for contínua, tal membrana interage com as partículas sólidas, influenciando o comportamento mecânico do solo.

O comportamento do solo na condição não saturada exige a compreensão da distribuição, retenção e liberação da água nas diversas situações as quais o solo pode estar sujeito. Pois, sabe-se que um dos principais fatores de alteração do comportamento mecânico e hidráulico dos solos não saturados é o aparecimento de uma pressão de água negativa nos poros, chamada de sucção.

2.1.1 Conceito de sucção

A sucção do solo é descrita como a energia com que o solo (elemento poroso) absorve água quando está livre para se mover. Esta avidéz por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção é normalmente expressa como pressão, em unidades de kPa, atm ou bar (MARINHO, 2005).

Edil e Motan (1979), definem como sucção a energia necessária para remover uma quantidade infinitesimal de água do solo. A sucção pode ser definida, ainda, como uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água. A sucção total de um solo não saturado é composta por duas componentes, como é possível visualizar na Eq. (1).

$$\Psi_{\text{Total}} = \Psi_{\text{Matricial}} + \Psi_{\text{Osmótica}} \quad (1)$$

Onde: Ψ_{Total} = sucção total, $\Psi_{\text{Matricial}}$ = sucção matricial, $\Psi_{\text{Osmótica}}$ = sucção osmótica.

Entende-se por sucção matricial, a tensão referente às forças de capilaridade e de adsorção que surgem da interação entre a água e as



partículas minerais que constituem o solo, denominada de matriz do solo (HILLEL, 1971).

A sucção osmótica é a pressão equivalente relacionada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre, função da quantidade de sais dissolvidos no interior do solo (HUSE, 2007), ou seja, é resultante da interação da água com os sais dissolvidos nesta.

De acordo com Vanapalli et al. (2002), do ponto de vista da engenharia convencional, os engenheiros geotécnicos e ambientais estão interessados no desempenho das estruturas do solo em uma faixa de sucção relativamente baixa, que varia tipicamente de 0 a 500 kPa. Nesta faixa, as alterações na sucção estão vinculadas às movimentações da água na fase líquida, e por esse motivo, a relação entre as propriedades do solo e a sucção é feita em termos de sucção matricial (MARINHO, 1997; VANAPALLI et al., 1999).

2.1.2 Curva característica dos solos

A curva característica dos solos, também chamada de curva de retenção dos solos (CRA), consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água.

De acordo com Presa (1982), uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva de retenção, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e a umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo. Essa curva permite obter a capacidade de retenção de água no solo. Ela pode ser utilizada para estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (FREDLUND et al., 1997).

Vanapalli et al. (1999) afirmam que características do solo como estrutura do solo e a história de tensões influenciam na curva característica. Outros fatores como agregações/cimentação, índices de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, teor de umidade

inicial (trajetória de umedecimento ou secagem) também a afetam.

Considerando as características dependentes da estrutura do solo, quando este se encontra submetido a baixos níveis de sucção, o efeito da capilaridade e a distribuição dos poros regem a quantidade de água existente no solo. Para valores mais altos de sucção, fatores como a textura e a superfície específica afetam em maior grau a forma da curva característica, desde que a água esteja adsorvida às partículas sólidas (MCQUEEN e MILLER, 1974).

Existe uma grande variedade de técnicas para medição da sucção em solos. Procedimentos diretos e indiretos foram desenvolvidos para a determinação das curvas de retenção. As medidas diretas da curva de retenção são obtidas utilizando equipamentos de pressão que fornecem medidas de teores de água através de uma série de valores de sucção aplicados. Os procedimentos indiretos envolvem banco de dados ou estimativa da curva de retenção, conforme granulometria de um solo (FREDLUND, 2006). Na Tabela 1 estão apresentadas as técnicas mais utilizadas para medida da sucção e os respectivos intervalos de aplicação de cada técnica.

Tabela 1. Técnicas de medição de sucção (adaptado de Lee et al., 1983; Fredlund e Rahardjo, 1993 e Marinho, 1997)

Técnica	Sucção Métrica	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Placa de Sucção	X			0 – 90
Placa de Pressão	X			0 – 1500
Papel Filtro	X		X	0 – 29000
Psicrômetro		X	X	100 – 8000
Tensiômetro	X		X	0 – 90 0 → 1000
Translação de Eixo	X			0 – 1500
Condutividade Térmica	X			0 – 400
Condutividade Elétrica	X	X		20 – 1500

2.2 Camada de cobertura de aterros sanitários

A camada de cobertura em aterros sanitários é executada sobre a última camada de resíduos disposta. Geralmente é composta por uma camada de solo fino (preferencialmente material



inerte) sobre os resíduos, minimizando assim os impactos ao meio ambiente. A camada visa o isolamento dos resíduos, reduzindo assim os vetores contaminadores, a taxa de formação de percolados, odores, saída de gases, além de permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro, entre outros (SALAMONI, 2019).

A cobertura diária é realizada com solo inerte de 0,15 m a 0,30 m, ao término de cada jornada ou etapa de operação. Quando terminada a etapa de operação do aterro, deve ser aplicada a cobertura definitiva, que tem como função impedir a infiltração de água de chuvas e evitar a migração dos fluidos dos resíduos ao exterior do aterro. Esta pode ser constituída por uma série de camadas de solo juntamente com materiais geossintéticos e apresenta espessuras entre 0,40 m a 0,60 m.

Na análise do desempenho de uma camada de solo de cobertura em aterro sanitário, é importante compreender ou definir o balanço hídrico, ou seja, a quantidade de água que entra e sai da camada de solo em determinado período de tempo. Um dos dados essenciais ao projeto é o regime de chuvas da região e os fatores que influenciam a evapotranspiração, tais como incidência de radiação solar, regime de ventos e vegetação local (ZORNBERG, BOUAZZA e McCARTNEY, 2009).

Coberturas evapotranspirativas sobre sistemas de barreiras argilosas (de baixa permeabilidade) incluem baixo potencial de fissuras por ressecamento, fácil construção e baixa manutenção. Objetivos adicionais de coberturas de aterro incluem acomodação de recalques diferenciais sem comprometer o desempenho da cobertura e controle do gás produzido pelos resíduos sólidos do aterro. Além disso, a cobertura deve permanecer estável em condições estáticas ou sísmicas, minimizando a manutenção em longo prazo, permitindo reuso do terreno e provendo uma boa aparência estética (ZORNBERG e MCCARTNEY, 2007).

3 ÁREA DE ESTUDO

A Central de Tratamento de Resíduos de Santa Maria localiza-se na Estrada Geral da Caturrita, no distrito da Boca do Monte, Santa Maria/ RS, e pertence à Companhia Rio-grandense de Valorização de Resíduos (CRVR). Possui capacidade para atender os municípios da Região Central do Estado, operando em uma área de 24 hectares e com capacidade para receber 2,5 milhões de toneladas de resíduos.

O desenvolvimento dessa pesquisa foi realizado no aterro sanitário da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita (CTRC). O aterro é constituído de oito fases operacionais (A, B, C, D, E, F, G e H). O local específico desta pesquisa foi definido durante a realização da fase D2/4, o qual apresenta uma área de 9.792 m² (célula de 64 m x 153 m) e uma altura de aproximadamente 25 m, dividida em 5 níveis de 5 m. Na Figura 1 apresenta-se a localização da fase D2/4.



Figura 1. Localização da área D2/4 na CRVR Unidade Santa Maria (Adaptada: Google Earth, 2019)

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização física

Os ensaios de caracterização física da camada de cobertura da área D2/4 foram realizados conforme os procedimentos descritos nas normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentadas na Tabela 2.



Tabela 2. Descrição dos ensaios de solos realizados no estudo e suas respectivas normas

Ensaio	Norma Referente
<i>Preparação das amostras</i>	NBR 6457 – Amostra de solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaio de caracterização – Método de ensaio (ABNT, 1986)
<i>Determinação da Massa Específica dos grãos</i>	NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio (ABNT, 1984)
<i>Ensaio de Granulometria</i>	NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio (ABNT, 1984)
<i>Determinação do Limite de Plasticidade</i>	NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de ensaio (ABNT, 1984)
<i>Determinação do Limite de Liquidez</i>	NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio (ABNT, 1984)

O estudo da caracterização do solo de cobertura da fase D2/4 do aterro sanitário de Santa Maria, realizado por Salamoni (2019), foi executado com base em amostras deformadas retiradas de quatro pontos distintos do solo de cobertura. Para cada amostra, realizaram-se todos os ensaios apresentados na Tabela 2.

4.2 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade do solo de cobertura do aterro sanitário foi realizado por Salamoni (2019). Para a execução dos ensaios de permeabilidade a carga variável foram moldados, em laboratório, dois corpos de prova com o solo utilizado na camada de cobertura da fase D2/4.

Os corpos de prova foram compactados com energia Proctor normal, na umidade ótima de 27,3% e densidade máxima de 14,59 kN/m³, e ensaiados seguindo os procedimentos contidos na NBR 14545 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável (ABNT, 2000).

4.3 Construção da curva de retenção do solo

Para realização desse ensaio, extraiu-se três amostras indeformadas da camada de cobertura do aterro, as quais foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria. Analisou-se as amostras

através de três métodos diferentes, sendo para tensões de 0 a 10 kPa o método de coluna de areia, para 100 kPa a panela de pressão e para 1500 kPa o psicrômetro (WP4).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da camada de cobertura

A média dos resultados de caracterização do solo utilizado na camada de cobertura da fase D2/4 do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita encontram-se sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo dos ensaios de caracterização de solo da camada de cobertura

Limite de liquidez (%)	50
Limite de plasticidade (%)	27
Índice de plasticidade (%)	23
% pedregulho (200 mm – 2mm)	0
% areia grossa (2 mm – 0,5 mm)	1
% areia média (0,5 mm – 0,2 mm)	2
% areia fina (0,2 mm – 0,05mm)	35
% silte (0,05 mm – 0,002 mm)	42
% argila (<0,002 mm)	20
Classificação SUCS	CL

A distribuição granulométrica do solo utilizado na camada de cobertura apresenta 20% de argila, 42% de silte, 38% de areia, sendo 35% de areia fina, 2% de areia média e 1% de areia grossa. De acordo com a USEPA (2004), o solo



para utilização em aterros deve possuir porcentagem de finos entre 30% a 50%. Para a CETESB (1993), o solo deve conter mais de 30% de granulometria fina em sua composição. Diante disso, pode-se afirmar que o solo possui as características granulométricas adequadas para uso em aterro sanitário.

Encontrou-se valores de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), da ordem de 50% e 27%, respectivamente, e Índice de Plasticidade (IP) do solo de 23%. Segundo Daniel (1993), para a camada de cobertura em aterros sanitários o índice de plasticidade deve ser superior a 10%, estando em conformidade com o encontrado.

Após a realização dos ensaios pode-se dizer que o tipo de camada de cobertura do aterro sanitário é classificado, pelo sistema SUCS (Sistema de Unificado de Classificação dos Solos) como um solo argiloso de baixa a média compressibilidade - CL.

5.2 Permeabilidade

A permeabilidade saturada do solo a água encontrada em laboratório foi de $3,3 \times 10^{-6}$ cm/s. Segundo Lambe e Whitman (1969), solos com coeficiente de permeabilidade (k) entre 10^{-7} cm/s e 10^{-5} cm/s são considerados de permeabilidade muito baixa. Essa permeabilidade foi coerente com o requerido pela NBR 13896 (ABNT, 1997) – Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.

Segundo essa norma, o projeto e construção da cobertura final, deve minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro. Entretanto, segundo Daniel (1993), valores da ordem de 10^{-7} cm/s seriam mais adequados, pois permitiriam obter uma condutividade hidráulica mais baixa. Assim, analisando o resultado apresentado, verifica-se que o mesmo, a princípio, não atende a esse critério.

5.3 Curva de retenção do solo

No âmbito da engenharia geotécnica, algumas obras encontram-se submetidas constantemente a processos de secagem e umedecimento, em função das condições climáticas atuantes durante sua vida útil. Com base nessa afirmação, a determinação da curva característica do solo utilizado na camada de cobertura final de aterros de resíduos sólidos é considerada importante. Os resultados das três amostras ensaiadas encontram-se descritos na Tabela 4. Com os dados obtidos pelo ensaio obteve-se a curva de retenção do solo (Figura 2), que apresenta a relação entre a sucção matricial e a umidade volumétrica do solo.

Os valores de sucção matricial variaram de cerca de 0 kPa a 1500 kPa para as amostras 01, 02 e 03 e apresentaram valores de sucção e umidades próximas nas três amostras. A variação de sucção se assemelha com a encontrada por Menezes (2010) ao estudarem a influência da umidade na absorção e na sucção em solos argilosos.

A porosidade total média das amostras ensaiadas foi de 51,19 %. Esse valor encontra-se inserido na faixa de valores de porosidade encontrados na literatura para solos finos silto-argilosos e silto-arenosos (MORRIS & JOHNSON, 1967). Segundo Reinert e Reichert (2006), solos finos apresentam predomínio de microporos (poros capilares $< 0,05$ mm) em sua composição, o que é comprovado pela microporosidade média de 43,21%, conforme dados da Tabela 4. No que tange as propriedades hidráulicas dos solos, materiais com predomínio de microporos apresentam uma maior capacidade de retenção de água.

No material em estudo, a macroporosidade, responsável pela aeração e pela maior contribuição na infiltração de água no solo (REINERT e REICHERT, 2006), apresentou pouco impacto, com média de 7,98%. Tendo em vista que esse solo é utilizado como camada de cobertura de um aterro sanitário, esse resultado apresentou-se satisfatório e coerente com a textura do material.



Tabela 4. Dados obtidos para a construção da curva de retenção do solo

Amostra	Porosidade (%)			Umidade Volumétrica (%)					
	Macro	Micro	Total	Saturado	1 (-kPa)	6 (-kPa)	10 (-kPa)	100 (-kPa)	1500 (-kPa)
R1	8,47	45,33	53,8	53,8	49,6	45,3	43,4	39,9	21,1
R2	7,72	42,37	50,09	50,09	46,0	42,4	40,5	36,9	22,5
R3	7,74	41,94	49,68	49,68	45,6	41,9	40,4	36,1	21,1
Média	7,98	43,21	51,19	51,19	47,07	43,2	41,43	37,63	21,57

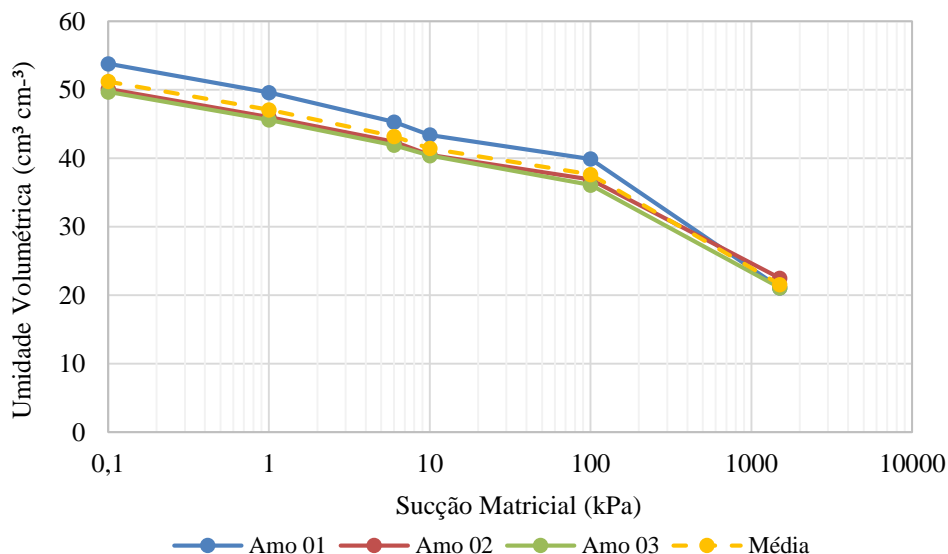


Figura 2. Curva característica do solo de cobertura do aterro sanitário de Santa Maria

Analisando a curva característica média do solo, apresentada na Figura 2, é possível observar que seu formato é próximo de uma curva unimodal. No Brasil, onde há o predomínio de solos tropicais, os solos usualmente apresentam curvas com comportamento bimodal, com dois pontos de dessaturação e um patamar característico. Nesse caso, o formato unimodal pode ser explicado pelo alto teor de silte (42%) presente no material, típico de solos de horizontes transicionais, não lateríticos.

Em relação a compreensão da CRA, existem dois pontos na curva característica que merecem destaque. O primeiro corresponde à pressão de entrada de ar que representa o diferencial de pressão entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo. Na Figura 2 pode-se observar que o valor de entrada de ar (VEA) do material em estudo é de aproximadamente 100 kPa. O segundo se associa ao início do estágio residual de dessaturação do

solo, no qual o efeito da sucção para causar uma perda adicional de água diminui e a remoção da água requer o fluxo do vapor. No caso dos materiais em estudo, o início do estágio residual não pode ser observado, pois as amostras não foram submetidas a tensões de sucção suficientes, tendo como justificativa, nesse trabalho, o interesse nas movimentações da fase líquida.

Apesar desse interesse maior nas movimentações da fase líquida, estudos como o de Porto et al. (2016), afirmam que solos em condições de umidade no qual o nível de sucção seja inferior ao VEA, favorecem baixos valores de fluxo de biogás para a atmosfera. Considerando uma umidade volumétrica de aproximadamente 43%, referente a umidade ótima de 27,3%, tem-se que a sucção do solo, na sua condição de compactação, é de 6 kPa. Esse valor é inferior ao valor de entrada de ar, restringindo o fluxo de biogás, conforme Porto et al. (2016) e ainda corroborando a afirmação de



Vanapalli et al. (2002) que trata sobre o intervalo de sucção de interesse ao estudo do desempenho dos materiais utilizados em obras geotécnicas.

Alcântara (2007) afirma que a curva característica pode ser utilizada ainda para estimar a capacidade máxima de retenção de água pelo solo da camada de cobertura que vai influenciar na geração de lixiviado. Segundo o autor, essa capacidade de campo (CC) é, na prática, referente a tensão 33 kPa para siltes e argilas. Em sua pesquisa, Alcântara (2007) obteve valores de 38,6% e 39,1% para solos silto-arenosos utilizados na camada de cobertura de lisímetros. O autor cita ainda os resultados de Lins (2003) para um solo siltoso do aterro de Muribeca ($30\% < CC < 39\%$) e outros dados da literatura para solos com textura argilosa ($34,7 < CC < 40,65\%$). Para o material utilizado no aterro sanitário de Santa Maria, a capacidade de campo corresponde a 39%, se enquadrando nos limites apresentados em estudos anteriores.

6 CONCLUSÃO

A partir de análises do solo da camada de cobertura do aterro sanitário, foi possível verificar suas características físicas, permeabilidade e análise da condição não saturada pela interpretação da curva de retenção de água no solo, que possibilitaram verificar o desempenho do tipo de camada e do solo utilizado na cobertura dos resíduos do aterro sanitário de Santa Maria/ RS.

Dessa forma, pode-se concluir que a utilização da camada de cobertura do tipo CL no aterro sanitário é adequada, pois a camada silto areno-argilosa auxilia na impermeabilização. O solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário apresenta às condições mínimas (classificação SUCS, composição granulométrica e limites de consistência) exigidas pelas regulações ambientais que orientam o monitoramento de aterros de resíduos sólidos urbanos. Além disso, a permeabilidade à água verificada em laboratório encontra-se dentro dos valores de referência propostos pelas

NBR 13896 (ABNT, 1997).

Resultados encontrados na microporosidade e macroporosidade indicam que o uso desse solo como camada de cobertura de aterro sanitário é adequado. Além disso, a curva de retenção pode comprovar as características desejadas para a função desse solo, como o baixo volume de água percolando pelo solo e controle do fluxo de gás produzido pelos resíduos sólidos do aterro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a ANP/Petrobras pelas bolsas concedidas ao primeiro e segundo autor, e a Universidade Federal de Santa Maria pela estrutura disponibilizada para realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.
- _____. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 10p
- _____. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.
- _____. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.
- _____. NBR 7181: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p.
- _____. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12p.
- _____. NBR 14545: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.
- _____. NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24p.
- ALCÂNTARA, P.B. *Avaliação da influência da composição de Resíduos Sólidos Urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.



- ARAUJO, P.S. *Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário*. 2017. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.
- BOSCOV, M.E.G. *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Org.). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759p
- FRANCESCHET, M. *Estudo dos solos utilizados em camadas de base e cobertura em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de Santa Catarina*. 2006. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2006.
- FREDLUND, D.G. (2006). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*, The 2005 Terzaghi Lecture: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(3): 286-321.
- HILLEL, D. (1971). *Soil and Water: Physical Principles and Processes*, Academic Press. New York, 288p
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics*. New York, Ed. Wiley. 553p. 1969.
- MARINHO, F. A. M. *Medição de sucção em solos*. In: III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, NSAT97, Rio de Janeiro, *Anais...*, vol. 02, pp. 373-397, 1997.
- MCQUEEN, I.S. & MILLER, R.F. (1968). *Calibration and evaluation of a wide range gravimetric method for measuring moisture stress*. Soil Science, 106: 225-231
- MENEZES, M.B.M. (2010). *Análise da influência do teor de umidade na absorção de água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 139 pp
- MORRIS, D.A.; JOHNSON, A.L. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60 *Geological Survey Water-Supply Paper 1839-D*, 42 p., 1967.
- PORTO, M. S.; BRIDI, E.; BRESSANI, L. A.; GEHLING, W. Y. Y. *Análise da curva de retenção de um solo silto-argiloso usado na cobertura do aterro sanitário em Minas do Leão-RS*. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, COBRAMSEG, Belo Horizonte, *Anais...*, 2016.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. *Propriedades físicas do solo*. Universidade Federal de Santa Maria, 18p., 2006.
- SALAMONI, G.P.D. *Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos devido aos processos de biodegradação em um aterro sanitário*, 2019. 230f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2019.
- STERCK, W.N. *Estudo da fundação de condutividade hidráulica de solos não saturados através de amostras centrifugadas*. 2011. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2011.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 1, cap. 4, p. 34-46.
- VANAPALLI, S. K. et al. *Suction and storage characteristic of unsaturated soils*. In: 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, *Proceedings...*, vol.3, pp. 1045-1070, 2002.
- VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on soil-water characteristic of a compacted till. *Géotechnique*, vol. 49, No. 2, pp. 143-159, 1999.
- ZORNBERG, J.G. & MCCARTNEY, J.S. (2007). *Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment*. The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd Edition, Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, pp. 34.1-34.31.
- ZORNBERG, J.G.; BOUAZZA, A. & McCARTNEY, J.S. (2009). *Geosynthetic Capillary Barriers: Principles and Applications*. Invited Keynote Lecture, 1st African Conference on Geosynthetics, GeoAfrica 2009, Cape Town, South Africa. pp. 1-39.