

Comportamento da permeabilidade não saturada em camada de cobertura de aterro sanitário no semiárido brasileiro

Estimation of unsaturated permeability in a sanitary landfill cover layer in the Brazilian semiarid region

Thiago Fernandes da Silva^{1*} , Jeovana Jisla das Neves Santos¹ ,
Jordan Carneiro Martins de Souza¹ , Pablo da Silva Araújo¹ , William de Paiva² 

RESUMO

A camada de cobertura de aterros sanitários tem como função principal minimizar fluxos de gases tóxicos à atmosfera e a infiltração de águas pluviais para o interior do maciço, no entanto a permeabilidade à água em condições saturadas (k_{sat}) não transmite a real situação em que o solo se encontra, sobretudo em aterros sanitários de regiões semiáridas, sendo a permeabilidade na condição não saturada (k_{nsat}) essencial para compreender o comportamento dessa camada. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo estimar o comportamento de k_{nsat} de um solo utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário do semiárido brasileiro. Foi realizada a caracterização geotécnica do solo e, em seguida, verificou-se o comportamento da sucção com variações de umidades volumétricas. Posteriormente, realizou-se o ajuste das curvas de retenção, obtendo-se o modelo que apresenta melhor ajuste. Com base nos dados obtidos para k_{sat} , foi possível inferir os valores de k_{nsat} . Os dados experimentais mostram que o modelo de com melhor ajuste obteve valores de k_{nsat} entre 10^{-7} e 10^{-15} m/s. Desse modo, verificou-se que baixas umidades observadas nos solos dessa região promovem diminuição brusca da permeabilidade à água na condição não saturada, favorecendo o uso desse solo em camadas de cobertura de aterros sanitários. Com o conhecimento do comportamento dessa permeabilidade, é possível ter controle do processo de execução e a consequente redução de riscos de acidentes ambientais, seja pela migração de gases para a atmosfera, seja pela elevação do nível de líquidos da célula sanitária.

Palavras-chave: permeabilidade não saturada; método do papel-filtro; curva de retenção.

ABSTRACT

The sanitary landfill cover layer has the main function of minimizing the flow of toxic gases into the atmosphere and reducing the infiltration of rainwater into the massif. However, permeability to water in saturated conditions (k_{sat}) does not convey the actual situation in which the soil is found, especially in landfills in semi-arid regions, and permeability in the unsaturated condition (k_{nsat}) is essential to understand the behavior of this layer. Thus, this work aimed to estimate the k_{nsat} behavior of a soil used in the cover layer of a sanitary landfill in the Brazilian semiarid region. The geotechnical characterization of the soil was carried out and, then, the behavior of the suction with variations in volumetric moisture was verified. Subsequently, the adjustment of the retention curves was carried out, obtaining the model that presents the best fit. From the data obtained for k_{sat} , it was possible to infer the values of k_{nsat} . The experimental data show that the model that presented the best fit obtained k_{nsat} values between 10^{-7} and 10^{-15} m/s. Thus, it was verified that the low humidity observed in the soils of this region promote a sudden decrease in the permeability to water in the unsaturated condition, favoring the use of this soil in layers of cover of sanitary landfills. With the knowledge of the behavior of this permeability, it is possible to have control of the execution process and the consequent reduction of risks of environmental accidents, either by the migration of gases to the atmosphere or by the increase in the level of liquids in the sanitary cell.

Keywords: unsaturated permeability; filter paper method; retention curve.

¹Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB), Brasil.

²Universidade Estadual da Paraíba - Campina Grande (PB), Brasil.

*Autor correspondente: enghiagofernandes1989@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 23/02/2021 - Aceito: 05/06/2022 - Reg. ABES: 20220108

INTRODUÇÃO

Entre as formas mais utilizadas para a disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos urbanos, destacam-se os aterros sanitários. Sabe-se que uma das maiores preocupações que envolvem esses empreendimentos diz respeito ao destino dos subprodutos gerados pelo processo de biodegradação dos resíduos depositados, como o lixiviado e o biogás (GIUSTI, 2009; ZUQUETTE et al., 2015).

O aumento no volume de lixiviado no interior da célula sanitária, que pode ser ocasionado pela infiltração da água da chuva, possibilita a elevação da poropressão, com consequências à estabilidade dos aterros. Quanto ao biogás, este contém principalmente os gases metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) em sua composição, que, quando lançados ao meio ambiente, contribuem para a ampliação do efeito estufa. Nesse sentido, a camada de cobertura atua como elemento importante para a minimização do fluxo de água e gases na comunicação entre o meio interno e o externo aos maciços sanitários.

O dimensionamento de tais camadas de cobertura tem sido um grande desafio em virtude da gama de variáveis envolvidas, como tipos de solo, espessura, condições meteorológicas, vegetação superficial, topografia e características de projeto do aterro sanitário, além da inexistência de normas e regulamentações de execução (BOSCOV, 2008; YANG; SHENG; CARTER, 2012; GARBO; COSSU, 2017).

As normas e regulamentações ambientais nacionais e internacionais não especificam mais detalhadamente o dimensionamento de sistemas de cobertura de aterros sanitários, sendo apresentadas apenas considerações em termos do coeficiente de permeabilidade à água em condições saturadas (K_{sat}).

Em condições não saturadas, as leis da mecânica tradicional dos solos se tornam inadequadas por causa do aparecimento de tensões de sucção (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977). Tal fato levou diversos pesquisadores, como Gardner (1958), Mualem (1976), Van Genuchten (1980) e Vanapalli e Lobbezoo (2002), a incluírem parâmetros de ajustes nas equações do comportamento hidromecânico dos solos, de forma a representarem a influência da sucção no comportamento hidromecânico dos solos. Diante disso, em aterros sanitários, conhecer a permeabilidade do solo à água na condição não saturada (K_{nsat}) é de extrema importância para entender o real comportamento dessa camada e prevenir acidentes ambientais.

Em regiões semiáridas, como o caso em estudo, a saturação dessa camada de cobertura raramente ocorre, apresentando consequências como o aparecimento de fissuras e a perda de eficiência para retenção do fluxo de gases e líquidos, em virtude dos ciclos de umedecimento e secagem. No presente estudo, buscou-se simular uma forma de aquisição dos dados de sucção da matriz do solo considerando a variação de umidade do material, visto que regiões semiáridas estão sujeitas a abruptas variações de temperatura.

Portanto, este trabalho teve como objetivo estimar o comportamento da permeabilidade à água em condições não saturadas de um solo utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário em uma região semiárida brasileira.

METODOLOGIA

Caracterização do solo

O solo utilizado neste estudo foi coletado de uma jazida usada para a execução da camada de cobertura de um aterro sanitário localizado no município de

Campina Grande, Paraíba. Foram realizados ensaios de análise granulométrica seguindo recomendações da norma brasileira (NBR) 7181/2016, bem como limites de liquidez (NBR 6459/2016) e plasticidade (NBR 7180/2016), massa específica dos grãos de solo (NBR 6458/2016), compactação (NBR 7182/2016) e permeabilidade saturada à água (NBR 14545/2021).

Diante da ausência de normas que direcionem a execução de uma camada de cobertura de aterros sanitários, foram utilizadas regulamentações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2004) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993). Algumas diretrizes também podem ser fornecidas por meio de estudos anteriores realizados em aterros sanitários com características semelhantes. No presente estudo, consideraram-se também os direcionamentos de Kabir e Taha (2004) e Mariano (2008). Tais parâmetros encontram-se descritos na Tabela 1.

Curvas de retenção de água

A obtenção da curva de retenção de água no solo foi realizada por meio do método do papel-filtro, traçando-se o gráfico de sucção matricial (ψ) versus umidade volumétrica (θ). O procedimento adotado baseou-se na norma American Society for Testing and Materials (ASTM) D-5298, na metodologia descrita por Marinho e Oliveira (2006) e Santos (2015). Para o ensaio, utilizou-se papel-filtro Whatman nº 42, com diâmetro de 70 mm e umidade inicial de 6%, o que permite a obtenção de valores de sucção em intervalo de 0 a 29 MPa.

Inicialmente, realizou-se a compactação de cinco amostras de solo em corpos de prova, moldados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo (Proctor Normal), com 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Dos cinco corpos de prova, foram talhadas amostras em anéis metálicos com dimensões de 2 cm de altura e 7 cm de diâmetro, como mostrado na Figura 1.

Com as amostras de solos moldadas nos anéis metálicos, iniciou-se o processo de variação de umidade. Para tal, como indicado na Figura 1, manteve-se a amostra 3 com a umidade ótima (19,6%), obtida no ensaio de compactação Proctor Normal. Para as amostras 1 e 2, realizou-se a secagem ao

Tabela 1 – Parâmetros comparativos utilizados em solos de camada de cobertura de aterros sanitários.

Ensaio	Parâmetro	Valores	Referências
Compactação	Massa específica aparente seca	$\geq 1.450 \text{ kg.m}^{-3}$ entre 1.780 e 1.950 kg.m^{-3}	Kabir e Taha (2004) Mariano (2008)
Limites de liquidez e plasticidade	Limite de liquidez	$\geq 30\%$	CETESB (1993)
	Índice de plasticidade	entre 7 e 15%	USEPA (2004)
Análise granulométrica	Material passante na peneira #0,074 mm (nº 200)	$\geq 30\%$ Entre 30 e 50%	CETESB (1993) USEPA (2004)
Análise granulométrica e limites de liquidez e plasticidade	Tipo de solo pelo sistema unificado de classificação	CL, CH, SC ou OH	CETESB (1993)

USEPA: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos; CL: argila de baixa compressibilidade; CH: argila de alta compressibilidade; SC: areia argilosa; OH: solo orgânico de alta compressibilidade; CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

Fonte: elaboração própria.

ar livre, variando-se essa umidade em -4 e -2% em relação à umidade ótima, obtendo-se, respectivamente, os valores de 15,6 e 17,6%. Já para as amostras 4 e 5, fez-se um processo de umedecimento, a fim de aumentar essa umidade em +2 e +4% em relação à umidade ótima do solo, obtendo-se, respectivamente, as umidades das amostras valores de 21,6 e 23,6%. Tais variações representam ganhos de umidade pela incidência de chuvas ou perdas pela incidência de radiação solar, predominante na maior parte do tempo nas regiões semiáridas brasileiras.

Cada amostra de solo foi colocada em contato direto com um papel-filtro, na face superior (Figura 2), para equilíbrio das umidades entre o papel e a amostra de solo, a fim de se obter a sucção matricial presente na camada.

Em seguida, os conjuntos foram envolvidos em plástico filme (Figura 3A) e papel-alumínio e armazenados em caixa de isopor (Figura 3B), isolando-os termicamente do ambiente externo. Após 15 dias de isolamento, os papéis-filtros foram retirados do contato com o solo (Figura 3C), imediatamente pesados em balança de precisão 0,0001 g (Figura 3D) e levados à estufa para secagem.

Com o teor de umidade do papel, utilizaram-se as Equações 1 e 2 para calibração (CHANDLER; CRILLEY; MONTGOMERY-SMITH, 1992) e obtenção da sucção das amostras de solo.

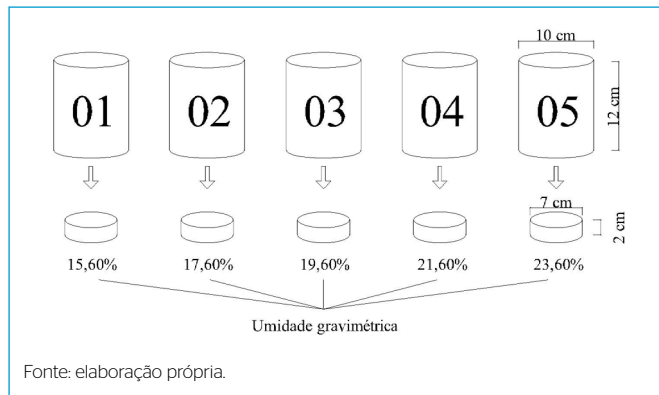


Figura 1 - Corpos de prova utilizados para moldagem de amostras para ensaio de papel-filtro.

$$\text{Para } w_{\text{papel}} \leq 47\%, S = 10^{4,84-0,0622 \cdot w} \quad (1)$$

$$\text{Para } w_{\text{papel}} > 47\%, S = 10^{6,05-2,48 \cdot \log(w)} \quad (2)$$

Em que:

S = sucção matricial (kPa);

w = umidade do papel-filtro (%).

Ajuste de curvas de retenção

Os dados experimentais de sucção obtidos foram ajustados às equações de curvas de retenção de Gardner (1956), Van Genuchten (1980) e Fredlund, Xing e Huang (1994), descritas pelas Equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$\theta = \theta_{\text{Res}} + \frac{\theta_{\text{Sat}} - \theta_{\text{Res}}}{(1 + \alpha \psi^n)} \quad (3)$$

$$\theta = \theta_{\text{Res}} + \frac{\theta_{\text{Sat}} - \theta_{\text{Res}}}{[1 + (\alpha \psi^n)]^m} \quad (4)$$

$$\theta = \theta_{\text{Res}} + \frac{\theta_{\text{Sat}} - \theta_{\text{Res}}}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (5)$$

Em que:

θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);

θ_{Res} = umidade volumétrica residual do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);

θ_{Sat} = umidade volumétrica saturada do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);

ψ = sucção matricial do solo (kPa);

α, m, n = parâmetros de calibração da equação.

Os dados experimentais, os parâmetros de calibração das equações e o traçado das curvas foram obtidos com auxílio da ferramenta Solver, do Microsoft Office Excel®.

Para determinação da curva que apresentou melhor ajuste, foram verificados o coeficiente de determinação (R^2), a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o critério de informação de Akaike (AIC), calculados pelas Equações 6, 7 e 8, respectivamente:

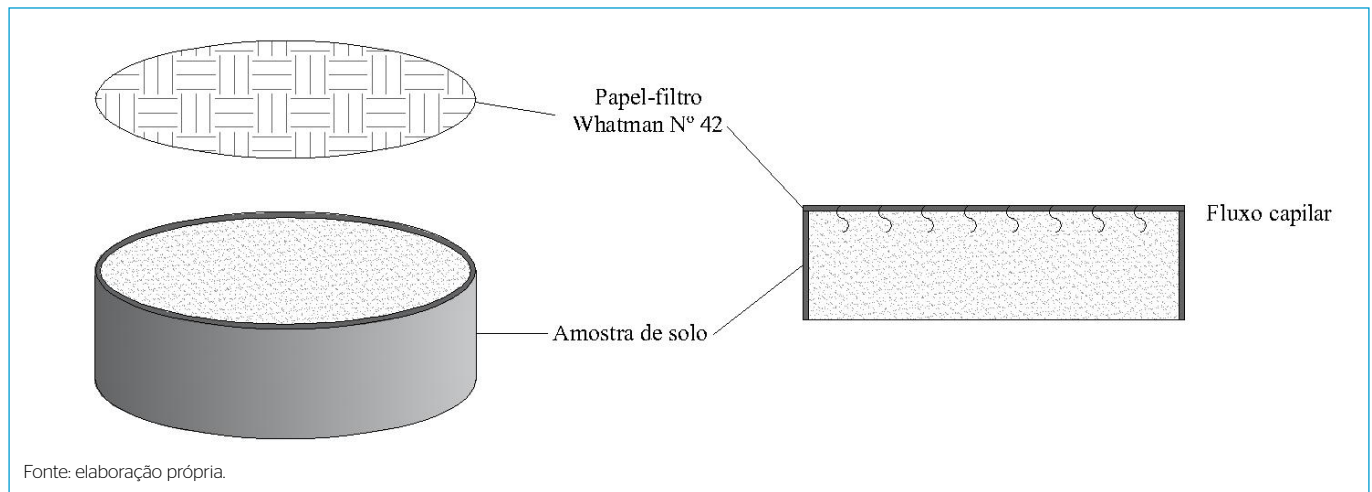
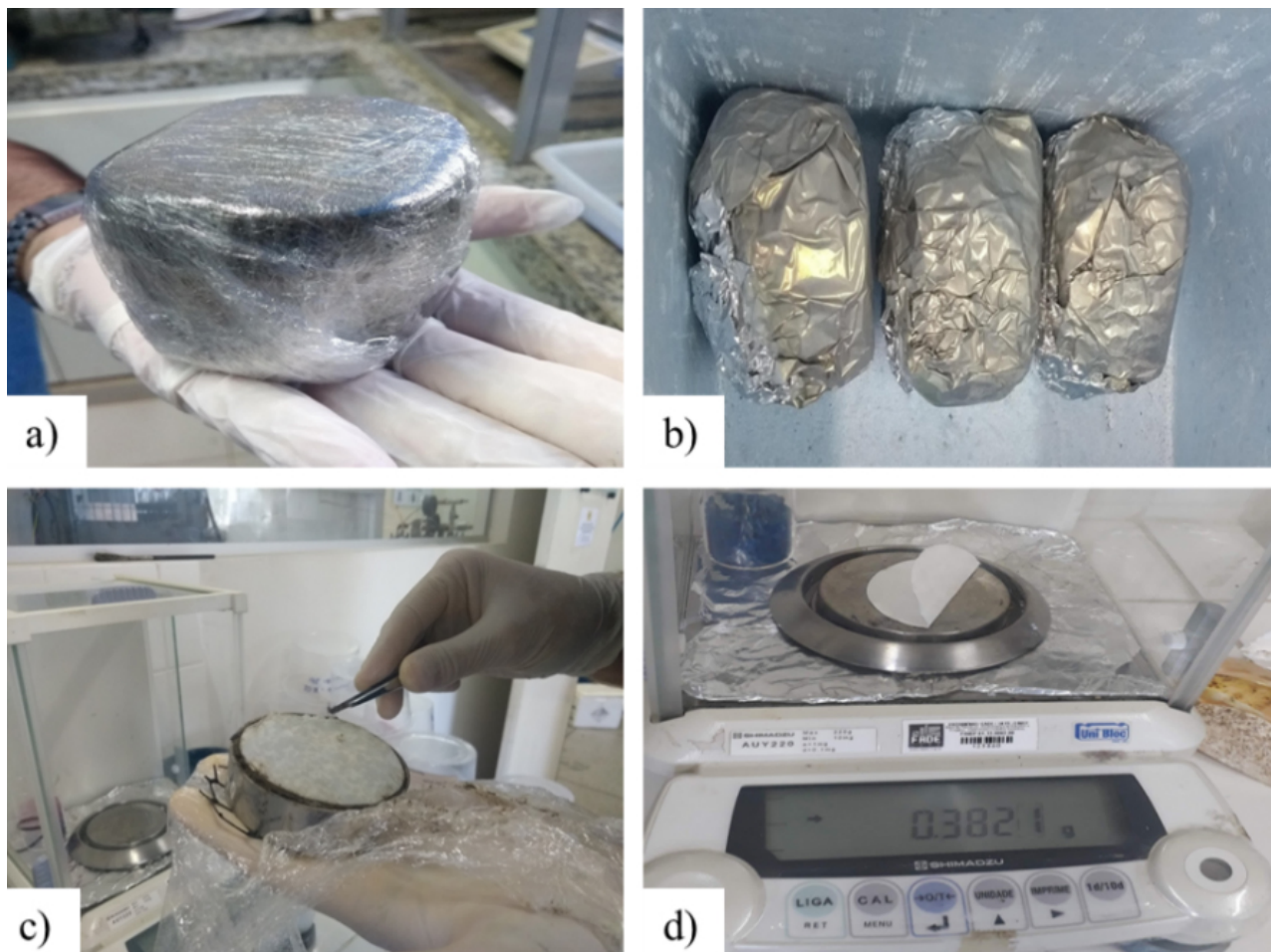


Figura 2 - Modelo de fluxo capilar no contato entre o papel-filtro e o solo.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3 - Procedimentos do ensaio de sucção. (A) Amostra envolta em plástico filme; (B) colocação de papel-alumínio e caixa de isopor pelo período de 15 dias; (C e D) pesagem do papel-filtro.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_e - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X})} \quad (6)$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n (X_0 - X_e)^2 \quad (7)$$

$$AIC = n \times \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_0 - X_e)^2}{n} \right) + 2 \times (p+1) \quad (8)$$

Em que:

n = número de variáveis;

X_0 = variáveis observadas;

X_e = variáveis estimadas.

n = número de observações;

p = número de parâmetros.

O valor de R^2 varia entre 0 e 1, e a maior proximidade de 1 indica que os valores estimados estão próximos aos valores observados, ou seja, mais bem explicada é a variabilidade do modelo. Quanto menor o valor de SQR e de AIC, melhor o ajuste dos dados obtidos à equação de curva de retenção, ou seja, menores os resíduos gerados pela diferença entre os valores observados e estimados (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Permeabilidade à água na condição não saturada

Com os resultados obtidos das curvas de retenção de umidade, foi possível selecionar o modelo de melhor ajuste e, com base nele, determinar a permeabilidade à água na condição não saturada pelo modelo descrito por Van Genuchten (1980), conforme as Equações 9 e 10.

$$k(S_e) = k_{sat} \cdot S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (9)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (10)$$

Em que:

$k(S_e)$ = permeabilidade para o grau de saturação S_e ;

S_e = grau de saturação do solo;

m = parâmetro de ajuste da equação.

Existem algumas regulamentações ambientais no tocante à permeabilidade do solo em condições saturadas que fornecem critérios de dimensionamento das camadas de cobertura de aterros sanitários, como mostrado na Tabela 2.

Para análise da permeabilidade dessas camadas, percebeu-se vacância de parâmetros normativos de execução. Porém, mediante estudos como este, é possível estimar o comportamento de k_{nsat} pela variação de umidade do solo e dimensionar camadas eficientes, que minimizem a emissão de gases para a atmosfera e a infiltração de água de chuva pela camada. Com isso, podem-se sugerir direcionamentos práticos na execução das camadas de cobertura dos aterros sanitários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do solo

Os resultados da caracterização geotécnica, bem como os parâmetros das normas e regulamentações ambientais (quanto ao uso de solo como camada de cobertura de aterros sanitários), encontram-se descritos na Tabela 3.

O solo de cobertura foi classificado como CL (argila de baixa compressibilidade), estando fora da especificação proposta por CETESB (1993), no entanto ele apresenta outros aspectos que favorecem o uso do solo como material de camada de cobertura de solo compactado. Em relação aos limites de consistência, observou-se limite de liquidez de 46%, de acordo com a recomendação mínima de 30% (CETESB, 1993), limite de plasticidade de 29%, não havendo parâmetro comparativo, e índice de plasticidade de 17%, um pouco acima da faixa de 7 a 15% estabelecida pela USEPA (2004). Quanto maior essa zona plástica, maior a capacidade de absorção de água do solo, favorecendo o aparecimento de trincas que podem gerar caminhos preferenciais de fluxo.

Observou-se que o percentual de grãos passantes na peneira de nº 200 (abertura de 0,075 mm) encontrado foi de 65,59%, estando conforme o recomendado pela CETESB (1993), que busca um percentual maior que 30% para

Tabela 2 - Parâmetros de permeabilidade à água na condição saturada utilizados para camadas de cobertura de aterros sanitários.

	Valores	Referências
Permeabilidade à água (saturada)	10^{-7} m.s^{-1}	CETESB (1993) e USEPA (2004)
	10^{-8} m.s^{-1}	ABNT (1997)

USEPA: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos; CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; NBR: norma brasileira.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 3 - Parâmetros do solo de cobertura do aterro sanitário em Campina Grande, PB.

Ensaio	Parâmetro
Compactação	$W_{ot} = 19,6\%$ $\gamma_{max} = 1.630 \text{ kg.m}^{-3}$
Limite de liquidez	46%
Limite de plasticidade	29%
Índice de plasticidade	17%
Análise granulométrica	#0,074 mm = 65,59%
Classificação do solo	CL (argila de baixa compressibilidade)
Permeabilidade à água (saturada)	$2,30 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$

Wot: umidade ótima; γ_{max} : massa específica seca máxima; #0,074 mm: Material passante na peneira de 0,074 mm; CL: argila de baixa compressibilidade.
Fonte: elaboração própria.

camadas de cobertura de aterros sanitários, entretanto esse percentual ficou bem acima da faixa especificada pela USEPA (2004), que indica valores no intervalo de 30 a 50%. A predominância de solos finos na composição do solo pode influenciar no comportamento da retenção de umidade e no aumento da sucção da matriz do solo.

Verificou-se que o solo de cobertura apresenta coeficiente de permeabilidade à água na condição saturada na ordem de 10^{-7} m.s^{-1} , em conformidade com os requisitos da USEPA (2004), porém não atendendo às recomendações da NBR 13896/1997, cujo valor é de 10^{-8} m.s^{-1} . Essa amostra atinge valor de massa específica aparente seca máxima de 1.630 kg.m^{-3} e, de acordo com o critério estabelecido por Kabir e Taha (2004), possui características adequadas para o uso em aterros sanitários, visto que o valor se encontra acima de 1.450 kg.m^{-3} .

Ajuste de curvas de retenção

As curvas de retenção (Figura 4), obtidas por meio do método de ensaio do papel-filtro para o solo da camada de cobertura do aterro sanitário em Campina Grande, seguiram os modelos de ajuste de Gardner (1956), Van Genuchten (1980) e Fredlund, Xing e Huang (1994).

As curvas de retenção apresentaram formato semelhante ao das curvas características de solos finos. Verificaram-se também valores elevados de sucção para o solo estudado, superior a 7.000 kPa, o que pode estar associado ao tipo, à composição granulométrica, à estrutura e à mineralogia do material analisado.

A sucção matricial no valor de entrada de ar (VEA) identificada pelas curvas ajustadas pelos modelos de Gardner (1956) e Fredlund, Xing e Huang (1994) correspondeu a 300 kPa, enquanto para a curva ajustada por Van Genuchten (1980) se verificou 200 kPa. O VEA equivale ao ponto em que se inicia o processo de dessaturação do material, conforme destacado por Jucá e Maciel (2006). Esses autores, ao estudarem o comportamento não saturado de uma argila de alta plasticidade, observaram valores de sucção matricial no VEA de 3.000 kPa, 10 vezes maior que o constatado aqui. O índice de plasticidade da argila estudada por eles foi de 30%, 43% acima do IP da argila neste estudo. Fondjo, Theron e Ray (2021), ao investigarem a influência de propriedades do solo no VEA, identificaram maiores valores de sucção matricial nesse ponto associados a maiores teores de argila, o que explica o maior valor para o trabalho de Jucá e Maciel (2006) em comparação à presente pesquisa.

Além disso, os autores verificaram maior retenção de água para teores de umidade próximos à umidade ótima e que para umidades abaixo da ótima a perda de água é mais considerável, contribuindo para maior percolação de gases. Por intermédio da curva da Figura 3 também se observou que a perda de água começa a ocorrer para a umidade gravimétrica de 17,6% (2% abaixo da ótima), correspondente à umidade volumétrica de 45,7%.

Segundo Fredlund (1996), em solos finos a retenção de umidade é influenciada tanto pela maior heterogeneidade no tamanho dos poros, com melhor distribuição granulométrica, quanto por fatores eletroquímicos. A matéria orgânica, por sua vez, também influencia, promovendo aumento de retenção em virtude de aspectos como capacidade de troca catiônica, textura e fenômenos físico-químicos. Visto que o solo analisado consiste em uma argila, seu comportamento pode ser influenciado pela parcela de matéria orgânica presente (3,32%).

Ao estudar a sucção em um solo do tipo SC (areia argilosa), também utilizado na camada de cobertura de uma das células do aterro sanitário em

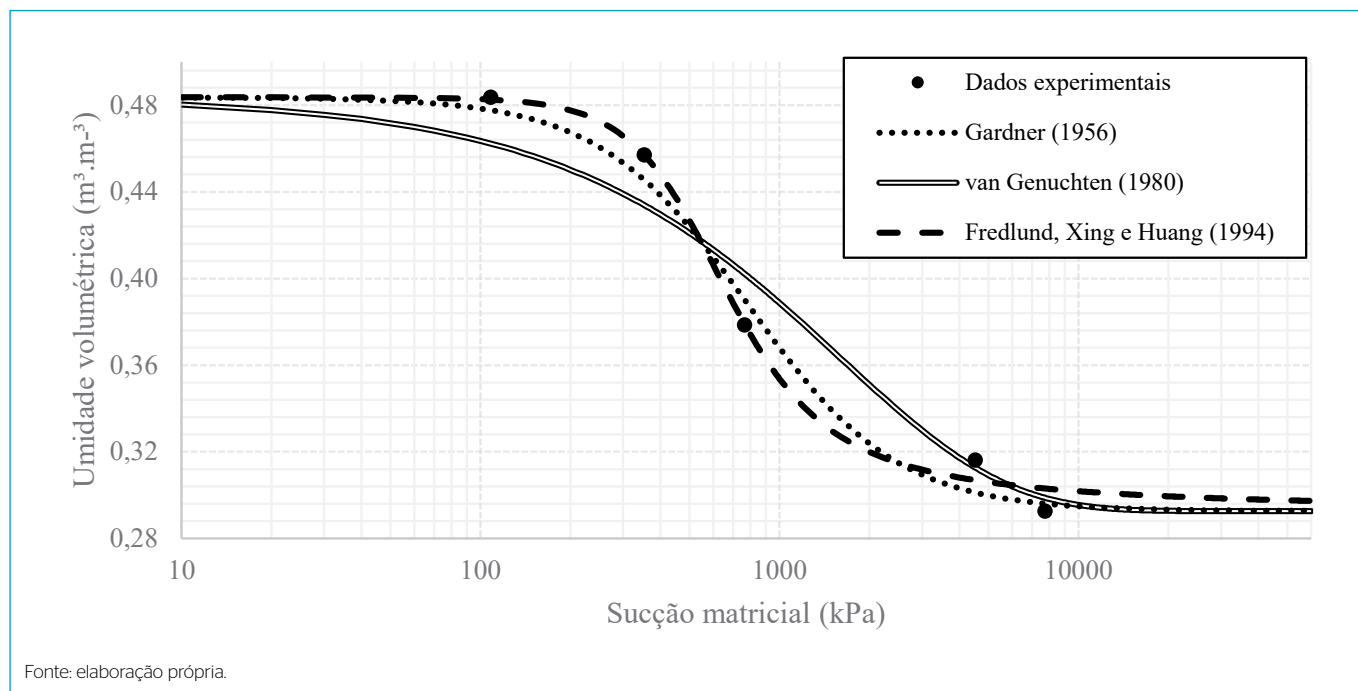


Figura 4 - Pontos experimentais e traçado de curvas de retenção de água do solo de cobertura.

Campina Grande, Santos (2019) encontrou baixos valores de sucção para esse material, em torno de 30 kPa, e umidade volumétrica em torno de 20%. Para esse solo foi verificado um coeficiente de permeabilidade não saturada de $5,26 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. Dessa forma, percebe-se que a relação sucção-umidade pode estar diretamente associada à composição granulométrica, ao tipo e à estrutura do solo.

Viu-se que os modelos de Gardner (1956) e Fredlund, Xing e Huang (1994) apresentam comportamento similar em toda a extensão da curva, com umidade volumétrica residual em torno de $0,29 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Saravanathiiban e Khire (2014) estudaram a condição não saturada em argilas do tipo compactada e não compactada no estado de Michigan, Estados Unidos da América. Eles realizaram ajustes de Van Genuchten (1980) e observaram para a argila compactada, de coeficiente de permeabilidade saturada, k_{sat} de $4,4 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ e umidade volumétrica de saturação em torno de $0,39 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, um pouco abaixo da que foi verificada no presente estudo, a qual foi de $0,48 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Os autores observaram que para elevadas sucções não há diferença no comportamento das argilas em termos de estado de compactação.

Os modelos de Van Genuchten (1980) e Fredlund, Xing e Huang (1994) foram utilizados por Rahimi e Rahardjo (2016), que perceberam comportamento similar no início da curva, apresentando pontos de entrada de ar semelhantes. Os três modelos utilizados neste trabalho também foram experimentados por Maleksaeedi e Nuth (2020), que avaliaram os efeitos da retenção de água capilar na curva característica, concluindo que todos os modelos apresentados podem ser usados para ajustar os dados experimentais.

Nota-se que os três modelos empregados podem se ajustar adequadamente aos dados experimentais, porém, de acordo com os critérios estatísticos estabelecidos para análise das curvas obtidas, foi selecionado o melhor modelo (Tabela 4).

O modelo que apresentou melhor ajuste foi o de Fredlund, Xing e Huang (1994), pois se constataram maior valor de coeficiente de determinação (R^2),

Tabela 4 - Dados de ajustes dos modelos do solo de cobertura utilizados no aterro sanitário em Campina Grande, PB.

Modelo de ajuste	R^2	SQR	AIC
Gardner (1956)	0,96	0,00054	-39,68
Van Genuchten (1980)	0,76	0,00160	-34,23
Fredlund, Xing e Huang (1994)	0,97	0,00020	-44,75

R^2 : coeficiente de determinação; SQR: soma dos quadrados dos resíduos; AIC: critério de informação de Akaike.
Fonte: elaboração própria.

menor SQR e menor valor de AIC. Apesar de Maleksaeedi e Nuth (2020) utilizarem apenas coeficiente de determinação e erro quadrado médio, também foi selecionado o modelo de Fredlund, Xing e Huang (1994) com melhor ajuste aos dados. Ma e Chen (2017) realizaram uma comparação entre três modelos de ajuste de curvas de retenção de água para amostras de solo do tipo CL (argila de baixa plasticidade), naturais e compactadas, em uma região da China. Eles usaram os modelos de Van Genuchten (1980), McKee e Bumb (1984) e Fredlund, Xing e Huang (1994). Considerando os parâmetros de R^2 e SQR, concluíram que a curva característica dos solos estudados pode ser ajustada pelo modelo de Fredlund, Xing e Huang (1994), estando em conformidade com o que foi observado neste trabalho.

Pan et al. (2019) compararam três modelos de ajuste de curvas de retenção de água, entre eles de Gardner (1956) e Van Genuchten (1980), também considerados no presente estudo. Observou-se variação no coeficiente de determinação de 0,971 a 0,995 e de 0,688 a 0,909 para os dois modelos citados, respectivamente. Verificou-se que o modelo de Van Genuchten (1980) foi melhor em termos de R^2 , quando comparado ao de Gardner (1956). Porém, para o presente estudo, foi visto o oposto. Esse fato pode ser explicado pela variabilidade dos solos estudados pelos autores citados, pelo efeito

de degradação a que as amostras estavam submetidas e também por este trabalho apresentar mais ferramentas estatísticas para indicar com maior precisão o melhor modelo.

Permeabilidade à água na condição não saturada

Com o modelo de Fredlund, Xing e Huang (1994) apresentando melhor ajuste, a curva de sucção matricial *versus* a permeabilidade não saturada (k_{nsat}) foi determinada e encontra-se na Figura 5A. O comportamento de curva delineada foi do tipo exponencial, com coeficiente de determinação de 0,92. Percebe-se diminuição acentuada de permeabilidade quando a sucção matricial atinge valores entre 5.000 e 20.000 kPa. O comportamento da curva é similar ao ilustrado por Rahimi e Rahardjo (2016), com diminuição considerável de permeabilidade a partir de certo ponto de transição de sucção (10^3 a 10^4 kPa).

Na Figura 5A, verificam-se coeficientes de permeabilidade não saturada à água de 10^{-7} a 10^{-15} m.s⁻¹. Bouchemella, Ichola e Séridi (2016), estudando o comportamento não saturado de dois solos (uma argila e um silte) estimaram seus parâmetros combinando os modelos de Mualem (1976) e Van Genuchten (1980). Por meio das curvas de permeabilidade definidas, nota-se semelhança entre o resultado obtido com o solo siltoso, do estudo citado, e os resultados do presente estudo. Isso pode ser explicado pela semelhança entre algumas características geotécnicas dos dois solos, como índices de consistência e compactação, que podem influenciar na retenção de umidade e, conseqüentemente, no seu comportamento na condição não saturada.

Tal comportamento também pode ser verificado quando a umidade volumétrica atinge patamares abaixo de $0,35$ m³.m⁻³ (Figura 5B), relacionados a umidades abaixo da umidade ótima, percebendo-se brusca diminuição do coeficiente de permeabilidade não saturada, estando na faixa de permeabilidade recomendada pela NBR 13896. Entende-se que, para baixos valores de umidade, maior é a avides do solo por água e, portanto, maior a sucção e menor a permeabilidade verificada.

Ainda, na Figura 5A, percebe-se que a redução na permeabilidade não saturada ocorre também para valores de sucção acima do VEA. Como a dessaturação do material começa a ocorrer a partir desse ponto, a permeabilidade à água é dificultada em virtude do maior número de poros preenchidos por ar.

Como o aterro sanitário se localiza na região semiárida brasileira, os níveis de umidade no solo da camada de cobertura são bem baixos, dada a longa exposição ao sol, além dos baixos níveis de umidade relativa do ar que podem contribuir com a redução da umidade do solo, o que explica a umidade volumétrica da amostra ser igual a $0,20$ m³.m⁻³. Com isso, o solo estudado pode apresentar coeficiente de permeabilidade muito abaixo do valor exigido em normas, sendo benéfico para a redução da infiltração de água.

Todavia, essa avides do solo por água em baixas umidades volumétricas em solos tropicais pode promover a ocorrência de trincas, como verificado por Al Haj e Standing (2016) em solos do Sudão, que facilitam o fluxo ascendente para a atmosfera dos gases gerados no interior das células do aterro sanitário.

CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou estimar e analisar o comportamento da permeabilidade não saturada de camadas de solos compactados utilizados em camada de base de aterro sanitário. Os dados mostraram que o modelo de Fredlund, Xing e Huang (1994) apresentou melhor ajuste da curva de retenção de umidade.

Para baixos valores de umidade volumétrica, promove-se menor permeabilidade à água na condição não saturada, o que pode contribuir para a redução de infiltração de água no maciço sanitário. Observaram-se elevada sucção para o solo estudado e diminuição acentuada de permeabilidade à água na condição não saturada. O coeficiente de permeabilidade à água na condição não saturada se encontra conforme os critérios estabelecidos pelas regulamentações ambientais, o que torna o solo analisado adequado ao uso como camada de cobertura de aterros sanitários.

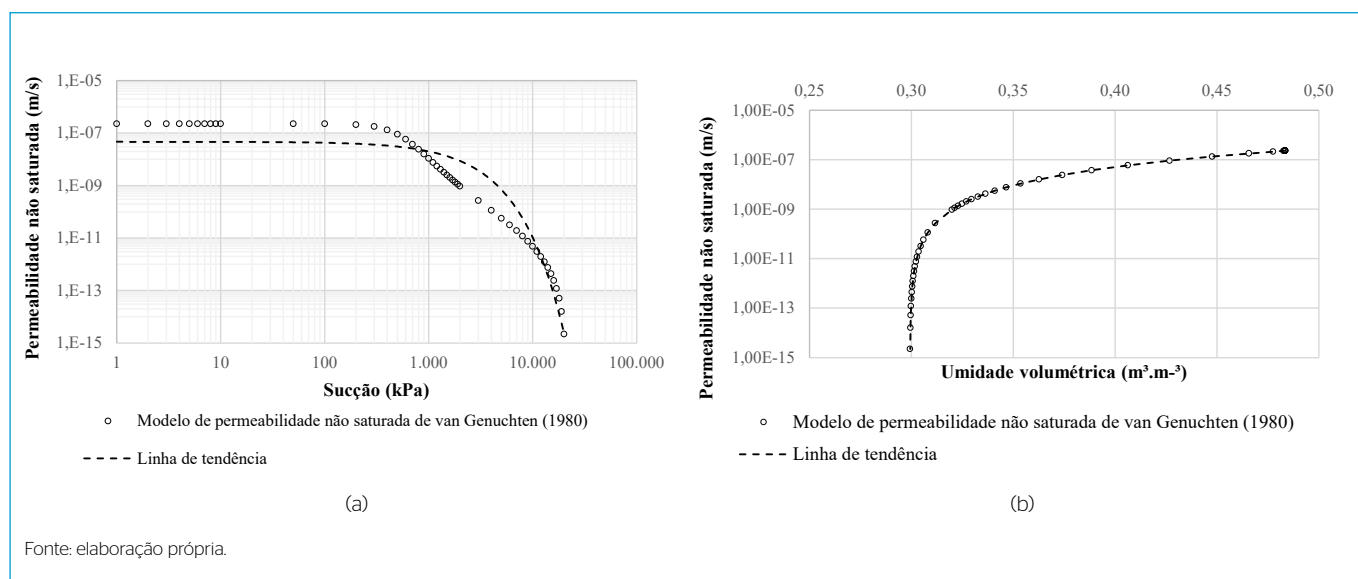


Figura 5 - Curva de comportamento de k_{nsat} : (A) de acordo com variação da sucção; e (B) de acordo com variação da umidade volumétrica.

Tendo em vista a dificuldade de executar com exatidão ensaios *in situ* nas camadas de solo em condições não saturadas — sobretudo porque seriam necessários elevadíssimos gradientes hidráulicos para permitir o fluxo de líquido por essas camadas —, a estimativa por meios indiretos se torna extremamente prática e adequada.

Pela análise do comportamento não saturado dessas camadas de solo, sobretudo em regiões semiáridas brasileiras, extremamente suscetíveis a elevadas temperaturas, foi possível prever situações de umidade que prejudicam o desempenho das camadas de cobertura de aterros sanitários, possibilitando o controle do processo de execução e a consequente redução de riscos de acidentes

ambientais, seja pela migração de gases para a atmosfera, seja pela elevação do nível de líquidos internos à célula sanitária.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Silva, T.F.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia.
Santos, J.J.N.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia.
Souza, J.C.M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia.
Araujo, P.S.: Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Recursos.
Paiva, W.: Conceituação, Análise Formal, Administração do Projeto.

REFERÊNCIAS

- AL HAJ, K.M.A.; STANDING, J.R. Soil water retention curves representing two tropical clay soils from Sudan. *Geotechnique*, v. 66, n. 1, p. 71-84, 2016. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P086>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6458*: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6459*: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7180*: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7181*: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7182*: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13896*: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 14545*: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BOSCOV, M.E.G. *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.
- BOUCHEMELLA, S.; ICHOLA, I.A.; SÉRIDI, A. Estimation of the empirical model parameters of unsaturated soils. In: E3S WEB OF CONFERENCES. *EDP Sciences*, 2016. p. 16007.
- CHANDLER, R.J.; CRILLEY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 92, p. 82-89, 1992. <https://doi.org/10.1680/iciem.1992.18771>
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Resíduos sólidos industriais*. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233 p.
- FONDJO, A.A.; THERON, E.; RAY, R.P. Investigation of the influencing soil parameters on the air entry values in soil-water characteristic curve of compacted heaving soils. *Architecture*, v. 9, n. 1, p. 91-114, 2021. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090108>
- FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, v. 103, n. 5, p. 447-465, 1977. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000423>
- FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting of the permeability function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 4, p. 533-546, 1994. <https://doi.org/10.1139/t94-062>
- FREDLUND, M.D. *Design of a knowledge-based system for unsaturated soil properties*. Doutorado (Tese) - University of Saskatchewan, Sask, 1996.
- GARBO, F.; COSSU, R. Landfill cover systems: an overview. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 16, 2017. *Proceedings* [...]. S. Margherita di Pula, Cagliari, Itália, 2017.
- GARDNER, W.R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 20, n. 3, p. 317-320, 1956. <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000030006x>
- GARDNER, W.R. Some steady-state of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. *Soil Science*, v. 85, n. 4, p. 228-232, 1958. <https://doi.org/10.1097/OO010694-195804000-00006>
- GIUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, v. 29, n. 8, p. 2227-2239, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.028>
- JUCÁ, J.F.T.; MACIEL, F.J. Gas permeability of a compacted soil used in a landfill cover layer. In: Autor (org.). *Unsaturated soils 2006*. Carefree: Geotechnical Special Publication, 2006. p. 1535-1546.
- KABIR, M.H.; TAHA, M.R. Assessment of physical properties of a granite residual soil as an isolation barrier. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 92c, 2004.
- MA, Y.; CHEN, W. A comparative analysis of soil water retention curves for natural and compacted loess. *EJGE Bund*, v. 22, 2017.
- MALEKSAEEDI, E.; NUTH, M. Evaluation of capillary water retention effects on the development of the suction stress characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 57, n. 10, p. 1439-1452, 2020. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0326>

- MARIANO, M.O.H. *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. 2008. 225f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- MARINHO, F.A.M.; OLIVEIRA, O.M. The filter paper method revisited. *Geotechnical Testing Journal*, v. 29, n. 3, p. 250-258, 2006. <https://doi.org/10.1520/GTJ14125>
- MCKEE, C.R.; BUMB, A.C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site. In: HAZARDOUS WASTE AND ENVIRONMENTAL EMERGENCIES: HAZARDOUS MATERIALS CONTROL RESEARCH INSTITUTE NATIONAL CONFERENCE, Houston. *Anais [...]*. Houston: Silver Spring, 1984. p. 50-58.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- PAN, T.; HOU, S.; LIU, Y.; TAN, Q. Comparison of three models fitting the soil water retention curves in a degraded alpine meadow region. *Scientific Reports*, v. 9, 18407, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54449-8>
- RAHIMI, A.; RAHARDJO, H. New approach to improve soil-water characteristic curve to reduce variation in estimation of unsaturated permeability function. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 4, p. 717-725, 2016. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0199>
- SANTOS, G.M. *Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco*. 2015. 196f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- SANTOS, J.J.N. *Avaliação geotécnica de misturas de solo e composto orgânico para uso como biocoberturas em aterros sanitários*. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- SARAVANATHIIBAN, D.S.; KHIRE, M.V. Field-scale unsaturated hydraulic properties of compacted and uncompacted earthen covers. In: GEO-CONGRESS: GEO-CHARACTERIZATION AND MODELING FOR SUSTAINABILITY, 2014. *Anais [...]*. 2014. p. 1859-1869.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers*. Washington, DC.: USEPA, 2004. 421 p.
- VANAPALLI, S.K.; LOBBEZOO, J.P. A normalized function for predicting the coefficient of permeability of unsaturated soils. *Unsaturated Soils*, v. 1, p. 839-844, 2002.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892-989, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- YANG, C.; SHENG, D.; CARTER, J.P. Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, v. 41, p. 36-56, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.11.006>
- ZUQUETTE, L.V. *Geotecnia ambiental*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 399 p.