

# Uso de argilas expansivas em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros sanitários no Nordeste do Brasil

*Use of expansive clays in waterproofing layers of landfill of the final cover in Northeastern Brazil*

Paulo Rossy Forte Magalhães<sup>1\*</sup> , Anderson Borghetti Soares<sup>1</sup> 

## RESUMO

Os aterros sanitários são obras construídas para o confinamento seguro dos resíduos sólidos e, entre seus elementos de projeto, destaca-se a camada de impermeabilização da cobertura final, frequentemente construída com solo argiloso, que deve, entre outras funções, minimizar ao máximo a infiltração de águas pluviais para o interior do aterro e o fluxo de gases com o meio ambiente. As características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais dessa camada devem ser analisadas para avaliar seu potencial de utilização. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de argilas expansivas, sujeitas à variação de umidade, como material impermeabilizante de cobertura de aterros sanitários, sendo caracterizadas duas amostras por meio de ensaios geotécnicos. As características foram compatíveis com os requisitos exigidos nas normas consultadas. A parte superior de uma camada de argila compactada foi reproduzida com uma das amostras em um modelo experimental, sujeita à secagem, com observação da formação de trincas e medições do teor de umidade ao longo do tempo e profundidade. A formação de trincas na superfície se iniciou para teores de umidade acima do limite de plasticidade. A aplicação de uma carga hidráulica na superfície após a etapa de secagem resultou em um fechamento das trincas em razão da expansão da argila, indicando eficiência na restrição de entrada de águas pluviais. No entanto, o uso de material expansivo para esse fim deve ser investigado quanto ao seu desempenho em campo, tanto na fase de construção, durante a compactação, quanto de operação, quando estará sujeito às variações climáticas.

**Palavras-chave:** aterros de resíduos sólidos; camada de cobertura final; camada de impermeabilização; argilas expansivas; argilas compactadas; desempenho.

## ABSTRACT

Solid waste landfills are works built to contain solid urban waste, being the most used final disposal method in Brazil. One of the most important components of the project is the final cover, the low hydraulic conductivity layer, with clayey materials, which has the function of minimizing the infiltration of rainwater into the landfill and the entry and exit of gases. The physical, chemical and mineralogical characteristics of clayey materials must be analyzed for potential use as a cover layer. The present work aimed to evaluate the use of clays, with expansive characteristics, subject to water content variations, as cover material in landfills, being characterized two clay samples through geotechnical tests. The characterization indicated samples with characteristics compatible with the requirements demanded by the consulted standards. One of them was used in a laboratory model and reproduced the upper part of a layer of compacted clay, subject to drying on the surface, with observation of the formation of cracks, and with measurements of the water content over time and depth. Cracks on the clay surface occurred during the drying process, starting for water contents above the limit of plasticity of the clay. The application of a hydraulic head on the surface, after the drying step, resulted in cracks closure, due to the expansion of the clay, indicating efficiency in the restriction of rainwater entry. However, the use of expansive material for this purpose should be investigated regarding its performance in the field, both in the construction phase, during compaction, and in operation, subject to climatic variations.

**Keywords:** solid waste landfill; final cover layer; waterproofing layers; expansive clays; compacted clay; performance.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará - Fortaleza (CE), Brasil.

\*Autor correspondente: paulorossyf@hotmail.com

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

**Financiamento:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

**Recebido:** 18/11/2019 - **Aceito:** 12/03/2020 - **Reg. ABES:** 20200206

## INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos sólidos são estruturas construídas para confinar os resíduos e evitar a contaminação do meio ambiente. Em razão de serem compostos por diferentes componentes, o dimensionamento de cada um é baseado em critérios de engenharia (BOSCOV, 2008). Uma das estruturas de grande importância nesse tipo de aterro é a camada de cobertura final, que serve para limitar a entrada de água para dentro do resíduo, bem como a saída ou entrada de gases. A cobertura é formada por uma ou várias camadas, das quais destaca-se a camada com função impermeabilizante, que pode ser composta por materiais argilosos, misturas solo-bentonita ou geossintéticos. Quando se utilizam materiais argilosos, estes devem conter características físicas, químicas e mineralógicas adequadas, sendo essencial a etapa de caracterização, em que tais materiais devem atender a requisitos mínimos na aceitação descritos em normas vigentes (CETESB, 1993; USEPA, 2004; ABNT, 2010). O Nordeste brasileiro caracteriza-se por apresentar longos períodos de estiagem e de altas temperaturas, o que acarreta grande variação na umidade e consequente ressecamento da camada argilosa, que podem dar origem a formação de trincas que comprometem a eficiência da estrutura.

Camadas argilosas, quando sujeitas a ciclos de secagem e umedecimento, sofrem variação do teor de umidade e deformações, com o surgimento de trincas que criam caminhos preferenciais ao fluxo de água e de gases, modificando as propriedades geotécnicas e diminuindo o desempenho da cobertura a longo prazo. Com as trincas, há um aumento da condutividade hidráulica da camada, podendo ser superior a duas ordens de grandeza (LI *et al.*, 2016) em relação à camada na condição inicial “intacta”, após a compactação. Diversos autores têm verificado o padrão de formação das trincas através de digitalização e processamento de imagens. Julina e Thyagaraj (2020) verificaram em amostras argilosas, em laboratório, que o volume das trincas na fase de secagem depende do efluente percolante. Constataram também que a expansão e a cicatrização durante a fase de umedecimento são reduzidas quando em contato com soluções salinas em razão da redução da dupla camada difusa (MESRI & OLSON, 1971; BOWDERS & DANIEL, 1987; SHACKELFORD *et al.*, 2000). Nesse caso, há uma degradação da camada argilosa, com aumento da permeabilidade saturada em relação à condição inicial, mesmo após o fechamento das trincas. Tang *et al.* (2011) observaram que as taxas de evaporação são constantes até o teor de umidade alcançar um valor próximo ao de entrada de ar do material argiloso, sendo nesse intervalo que a maior parte das trincas se forma. A partir daí, as taxas de evaporação começam a decrescer até atingir um valor nulo, quando também é finalizada a propagação das trincas. Tollenaar, Van Paassen e Jommi (2017) verificaram que o início do processo de formação das trincas nas camadas argilosas ocorre para teores de umidade superiores ao limite de plasticidade, podendo estar acima ou abaixo do limite de liquidez. O padrão das fraturas e o teor de umidade em que as fraturas se iniciam dependem da espessura da camada, do formato e do tipo de material do recipiente que contém a amostra e do teor de umidade inicial, corroborando com resultados obtidos por Corte e Higashi (1960).

O presente trabalho buscou verificar a viabilidade da utilização de uma amostra de argila expansiva como camada de cobertura em aterros sanitários e contribuir para o entendimento do mecanismo de formação de trincas. Os estudos envolveram a caracterização do material argiloso e a execução de um modelo de cobertura de laboratório, utilizando um lisímetro contendo uma camada de argila compactada de 20 cm, inicialmente saturada, sujeita à evaporação em um ambiente controlado. Durante a fase de secagem, a variação da umidade

da camada foi monitorada ao longo da profundidade e do tempo, sendo verificada a relação da umidade com as deformações e com a formação das trincas.

## METODOLOGIA

Para o programa experimental, amostras de um solo argiloso foram retiradas do município de Itapajé, nas proximidades da barragem Ipuzinho, no estado do Ceará, com as seguintes coordenadas: Latitude 3°40'04.2" Sul e Longitude 39°34'30.4" Oeste. A coleta foi feita de forma manual através de pá e picareta. A camada superficial foi descartada até a profundidade de 40 cm para evitar a presença de raízes e excesso de matéria orgânica.

As amostras foram transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará, onde passaram por etapas de preparação da amostra (ABNT, 1996), com processos de destorroamento, homogeneização e quarteamo. Posteriormente, foram armazenadas em sacos plásticos e devidamente identificadas. A caracterização das amostras constou de ensaios para análise geotécnica e mineralógica, bem como determinação de pH, e os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 1.

Os ensaios de caracterização granulométrica compreenderam peneiramento e sedimentação (ABNT, 2016a). Segundo a classificação unificada (SUCS), as amostras foram classificadas como CH (argila de alta compressibilidade). De acordo com a denominação proposta pela ASTM D-2487 (ASTM, 2017), a amostra pode ser denominada de argila arenosa de alta compressibilidade. A densidade real dos grãos foi em torno de 2,7, sendo obtida segundo a norma DNER-ME 93 (1994).

As amostras apresentaram teores de finos, limites de consistência (ABNT, 2016b; ABNT, 2016c; ASTM, 2018) e coeficiente de permeabilidade (ABNT, 2000) compatíveis com as normas consultadas para utilização de solos argilosos em camadas de impermeabilização (CETESB, 1993; USEPA, 2004).

Os valores de pH foram obtidos segundo a metodologia proposta pela Embrapa (1997) em soluções de água destilada com solo. A amostra apresentou

**Tabela 1 - Resumo dos ensaios de caracterização geotécnica.**

Parâmetro	Valor
Teor de matéria orgânica (%)	6,21
pH	6,61
Densidade real	2,72
Areia (%)	30
Silte (%)	28
Argila (%)	42
LL (%)	54
LP (%)	21
LC (%)	13
IP	33
Classificação SUCS	CH
Umidade ótima (%)	20,4
Peso específico seco máx. (kN/m³)	16,18
Coefficiente de permeabilidade saturada (cm/s)	2,90 x 10 <sup>-7</sup>

LL: limite de liquidez; LP: limite de plasticidade; LC: limite de contração; IP: índice de plasticidade.

Fonte: elaborada pelos autores.

um valor de pH um pouco abaixo do requisito da CETESB, que recomenda pH igual ou acima de 7. A USEPA (2004) não recomenda um valor de mínimo de pH para uso de material de cobertura.

Os ensaios de teor de matéria orgânica (ABNT, 1996) indicaram um valor significativo, que sugere uma maior compressibilidade e dificuldade de compactação. No entanto, o solo é pouco orgânico (TMO < 10%) e em laboratório não apresentou dificuldades na compactação.

O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor normal (ABNT, 2016d), com o objetivo de definir um valor de densidade máxima e umidade ótima de compactação, que foi reproduzida nos ensaios de permeabilidade, de curva de retenção e na camada do modelo de cobertura.

O ensaio de permeabilidade foi realizado segundo o método B da NBR 14545 (ABNT, 2000). Foi utilizado o permeâmetro de parede rígida, e os corpos de prova foram compactados na umidade ótima com energia Proctor normal e dimensões de 8,0 cm de altura e 15,0 cm de diâmetro. Foi utilizando um gradiente hidráulico de 30, valor recomendado pela ASTM (2015). Para a saturação do corpo de prova por percolação, foi utilizado o mesmo gradiente. A determinação do coeficiente de permeabilidade foi feita através da média aritmética dos cinco últimos resultados depois que os valores tenderam à constância. O coeficiente de permeabilidade foi compatível para o uso em camadas de cobertura com função impermeabilizante.

Para a obtenção da curva de expansão (ASTM, 2011), foram utilizados corpos de prova de 11,3 cm de diâmetro por 2,5 altura, submetidos a uma carga de 2 kPa na célula de adensamento, sendo posteriormente inundados, e monitoradas as variações de altura. As expansões observadas foram significativas, com 13 % em relação à altura inicial, sendo classificada como solo de elevado potencial de expansão (SEED, WOODWARD JR. & LUNDGREN, 1962). A expansibilidade é um indicio da presença de argilominerais 2:1, sendo os mais expansivos os solos montmoriloníticos. A curva de expansão em relação ao tempo é apresentada na Figura 1. O teor de matéria orgânica pode ter uma influência nas características de expansão dos materiais. No entanto, esses teores não são suficientes para classificar o solo como orgânico (ASTM, 2017).

A presença de argilominerais expansivos foi confirmada pelos resultados obtidos em ensaios de difração de raios X na fração argilosa da amostra, como pode ser observado na Figura 2. Para o ensaio, depois de seca em estufa, a fração

argilosa da amostra foi submetida à hidratação por vapor de glicerol com o objetivo de identificar picos característicos de argilominerais expansivos. A difração de raios X foi realizada para a amostra seca e, posteriormente, hidratada para detectar o aumento das distâncias interplanares de argilominerais expansivos.

Segundo Gomes (1988), por meio da intensidade dos picos registrados no difratograma, é possível fazer uma análise semiquantitativa da amostra. As maiores intensidades correspondem àqueles argilominerais com maior presença na amostra. Assim, observando os difratogramas e comparando as distâncias interplanares com as distâncias características para os argilominerais mais comuns apresentados na Tabela 2, pode-se observar que a fração argilosa da amostra é composta basicamente de argilominerais da família das montmorilonitas e caulinitas, com algum teor de argilominerais da família das illitas.

A curva de retenção foi obtida através do método do papel filtro (ASTM, 2016), utilizando o papel Whatman 42, com corpos de prova compactados na umidade ótima em anéis cilíndricos de 5,0 cm de diâmetro e 2 cm de altura. Os corpos de prova foram inicialmente saturados e posteriormente secos ao ar até atingir a umidade desejada. Foram utilizados dois papéis filtro em cada amostra com o objetivo de evitar o contato direto com o solo em um deles. Posteriormente, o conjunto foi acondicionado por um período de dez dias para equalização da sucção entre o papel filtro e o solo. Para a determinação dos teores de umidade dos papéis filtro, foi utilizada uma balança com precisão de quatro dígitos. A obtenção da curva de ajuste aos pontos experimentais de sucção e umidade volumétrica foi feita pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980), utilizando o programa RETC (VAN GENUCHTEN, LEIJ & YATES, 1991), e pode ser vista na Figura 3. Com base na curva de retenção, foi possível obter indiretamente os valores de sucção no perfil do modelo de laboratório.

A amostra apresentou uma curva típica de solos argilosos, com inclinação suave da curva. Materiais argilosos tendem a apresentar elevada capacidade de adsorção de água, em razão da natureza mineralógica da partícula argilosa e elevada superfície específica, comparada a materiais arenosos. Esses últimos materiais exibem baixos valores de sucção de entrada de ar por apresentarem diâmetros de vazios maiores e menor superfície específica, comparados aos solos mais finos, ocorrendo drenagem nos poros quando sujeitos a baixos valores de sucção. Os parâmetros da curva de retenção obtida através dos ensaios de papel filtro estão apresentados na Tabela 3.

## Metodologia do modelo laboratorial

Para analisar o comportamento de uma camada de argila sob processo de secagem quanto à formação de trincas, uma camada de 20 cm de espessura da amostra foi compactada dentro de um lisímetro, com 30 cm de diâmetro externo, 0,5 cm de espessura da parede e 100 cm de altura. A camada argilosa foi compactada na umidade ótima, posteriormente confirmada pela determinação da umidade em amostras coletadas antes da compactação. A camada foi compactada na energia Proctor Normal, com grau de compactação de 102%, utilizando soquete manual de concreto, com diâmetro de 20 cm e massa de 10 kg. O número de camadas, a altura de queda e o número de golpes foram adaptados para a obtenção da energia Proctor Normal. A espessura final da camada (20 cm) foi definida para reproduzir as variações da umidade e a formação das trincas, e analisar o comportamento da camada sob o processo de umedecimento após a etapa de secagem, não sendo objetivo reproduzir a espessura real de uma camada de campo. Ao longo da profundidade foram instalados três sensores para o monitoramento das variações do teor de umidade ao longo do tempo. Os sensores são modelo ML3, da Delta-T Devices, com acurácia de 1%

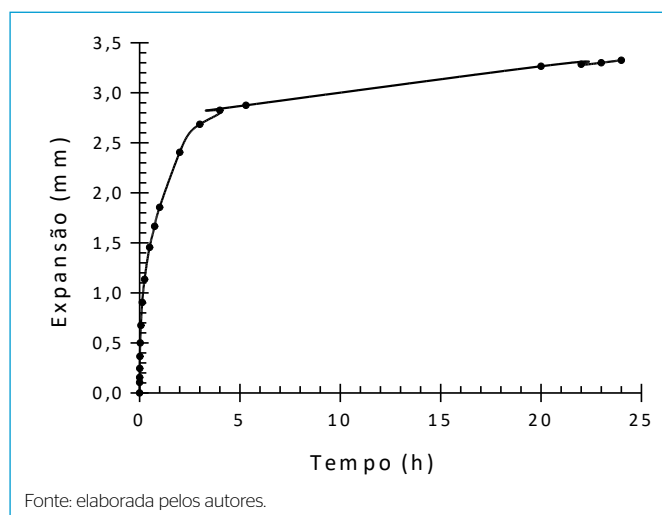


Figura 1 - Expansão da amostra em função do tempo.

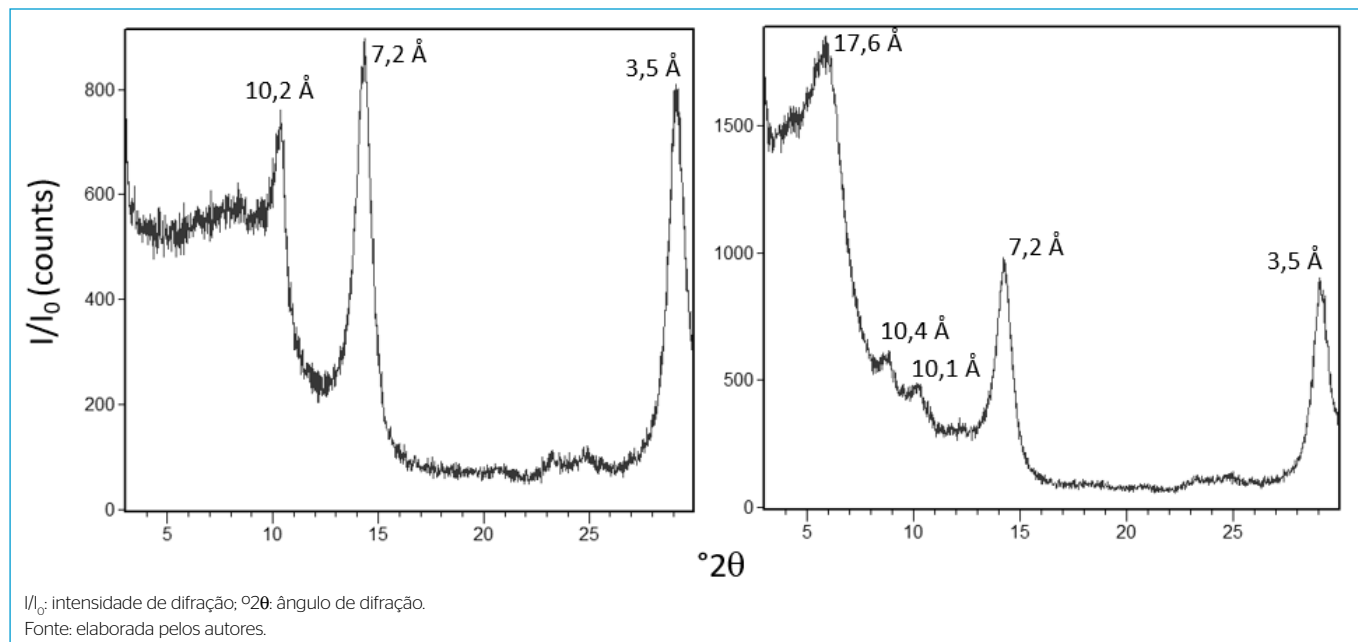


Figura 2 - Difratoograma da fração argilosa da amostra seca em estufa e hidratada com glicerol, respectivamente.

Tabela 2 - Distâncias interplanares características de argilominerais.

Tipo de camada	Argilomineral	Distâncias interplanares (Å)		
		Seco a 100 °C	Hidratado	Picos secundários
01:01	Caulinita	7	7	4,4; 3,5
02:01	Ilita	10	10	5,0; 4,5; 3,5
	Vermiculita	14	14	4,5
	Montmorilonita	10	17	5,1; 3,5
Mista	Clorita	14	14	7,0; 4,7; 3,5
	Corita expansível	14	17	7,0; 4,7; 3,5

Fonte: Souza Santos e Santos (1989); Albers *et al.* (2002); Resende *et al.* (2005).

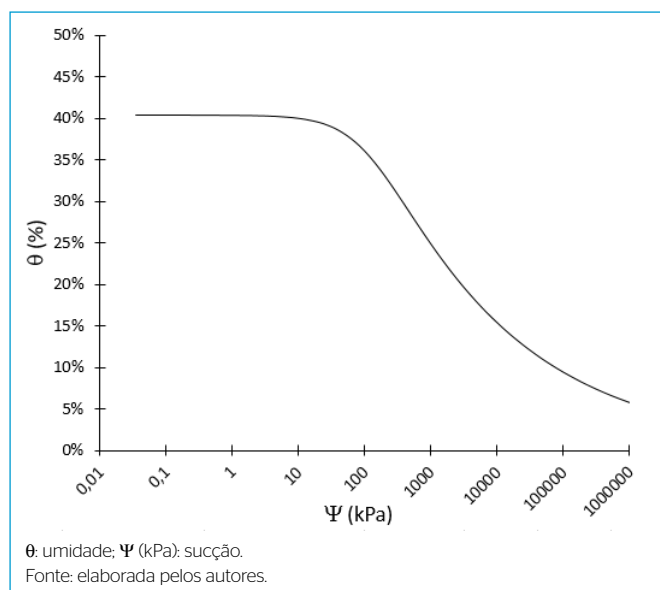


Figura 3 - Curva de retenção da amostra.

Tabela 3 - Valores de entrada de ar, umidade residual e parâmetros de ajuste.

Parâmetro	Valor
$\Psi_{EA}$ (kPa)	54
$\theta_r$ (%)	5
$\alpha$	0,09156
$n$	1,21296
$m$	0,17557

Fonte: elaborada pelos autores.

$\Psi_{EA}$ : sucção de entrada de ar;  $\theta_r$ : umidade residual;  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ : parâmetros de ajuste da curva de retenção.

de umidade volumétrica. As leituras dos teores de umidade foram feitas com o uso de um leitor digital HH2, da Delta-T Devices. O posicionamento dos sensores no modelo de laboratório pode ser visto na Figura 4. O ensaio foi realizado em laboratório com temperatura controlada de  $24 \pm 2$  °C.

Após a compactação, a camada de argila foi submetida a uma carga hidráulica na superfície de 20 cm. A etapa de umedecimento durou 18 dias com o

objetivo de observar a percolação da água na camada argilosa. A etapa de secagem durou 90 dias com o intuito de monitorar o processo de evaporação. Após esse período, aplicou-se uma nova carga hidráulica na superfície da camada argilosa por nove dias para a avaliação do coeficiente de permeabilidade final do solo trincado. Durante esse período, a umidade ao longo da camada não foi monitorada em razão de as trincas terem alcançado o sensor mais próximo a superfície, comprometendo assim as leituras de umidade.

Em função dos resultados obtidos no modelo experimental, executou-se um novo modelo experimental com o objetivo de verificar a relação entre a contração volumétrica, a sucção e a umidade durante o processo de secagem da amostra. Os detalhes do modelo são apresentados na Figura 5, na qual as variações de umidade foram medidas em um corpo de prova com 2 cm de altura e 12 cm de diâmetro, compactado na mesma densidade do modelo de cobertura dentro de um cilindro metálico.

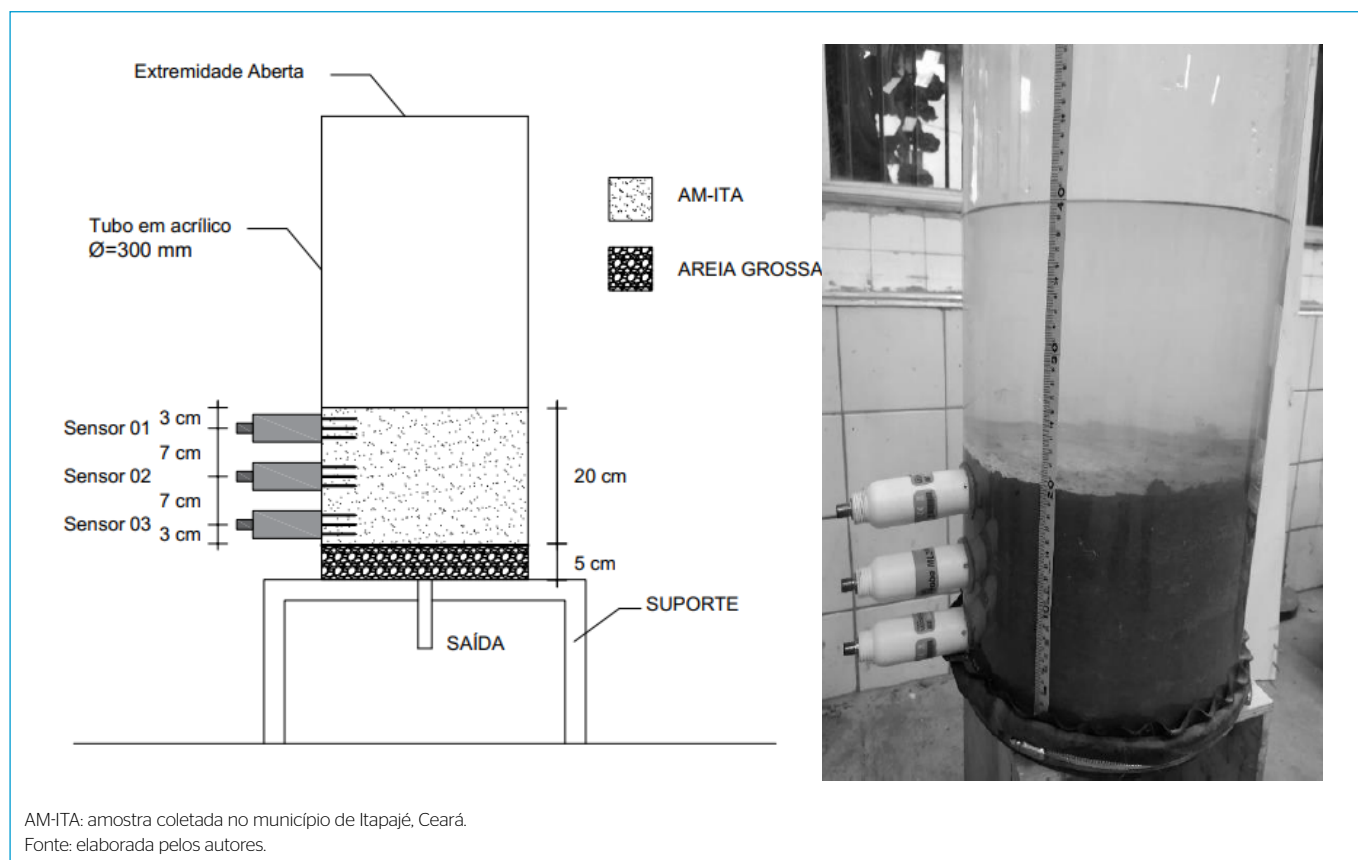


Figura 4 - Esquema do modelo de laboratório de camada de argila compactada.

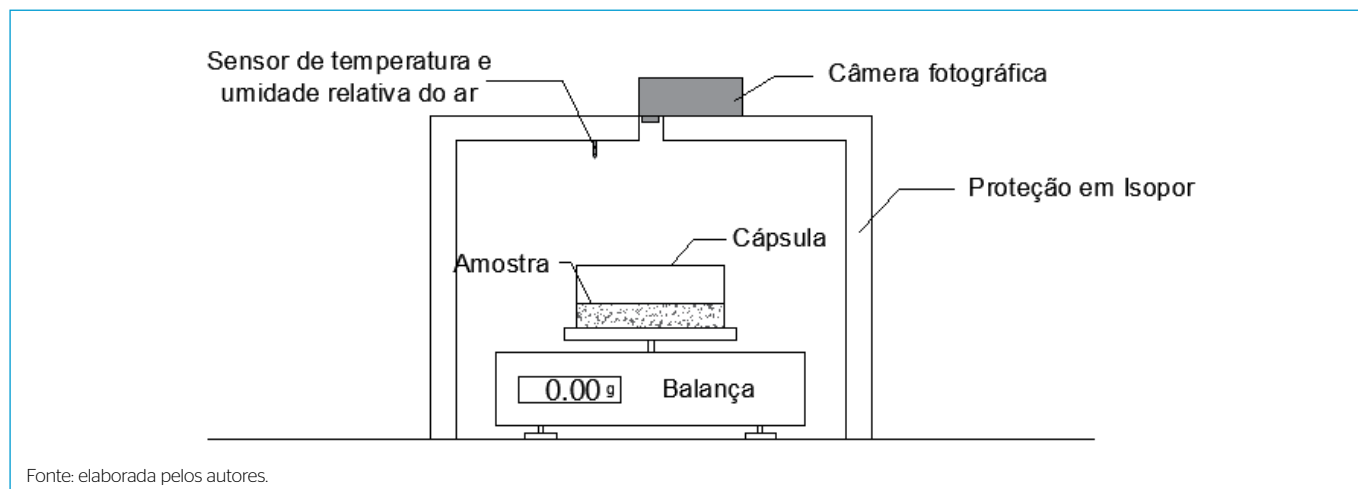


Figura 5 - Modelo reduzido para verificação das variações de umidade, sucção e volume com o processo de secagem.

As variações da umidade foram obtidas por meio de uma balança com precisão de duas casas decimais, e a sucção foi verificada indiretamente utilizando a curva de retenção do solo. A contração volumétrica do corpo de prova foi determinada pela análise de fotos digitais, tiradas por uma câmera instalada na parte superior de uma proteção em isopor, posteriormente tratadas com o auxílio do *software* AutoCad da Autodesk. O grau de contração foi determinado pela razão entre a variação da área da seção transversal e a área inicial. Durante os ensaios, foi feito o controle de temperatura e umidade a partir de sensores instalados na parte superior do modelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 mostra os resultados de variação da umidade volumétrica ao longo da profundidade e com o tempo no modelo de laboratório. Verifica-se que as maiores variações de umidade ocorreram na superfície, sendo observadas pequenas variações em profundidades maiores. Nas leituras dos sensores 2 e

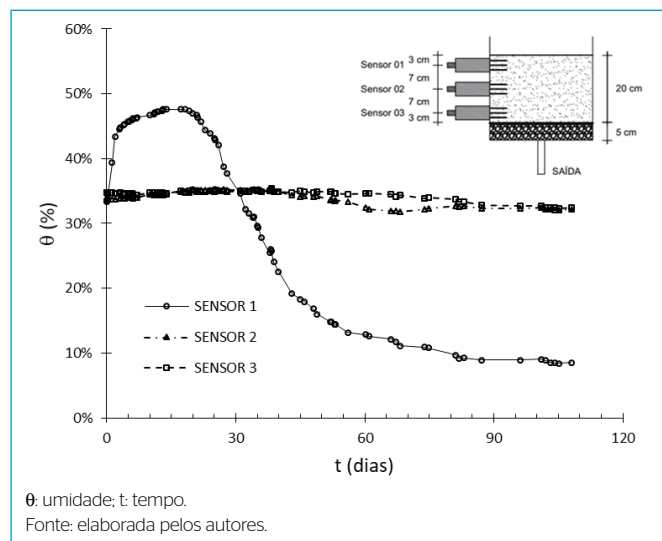


Figura 6 - Variação da umidade volumétrica ao longo da profundidade.

3, os teores de umidade se mantiveram próximos à umidade de compactação devido à baixa permeabilidade da argila. As primeiras trincas foram observadas no décimo primeiro dia da etapa de secagem, com teor de umidade de 38% (cerca de 23,5% de umidade gravimétrica), sendo abaixo do limite de liquidez (LL=55%) e acima do limite de plasticidade da amostra (LP = 21). Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Tollenaar, Van Paassen e Jommi. (2017).

A umidade volumétrica máxima registrada pelo sensor 1 foi de 47,6 %, valor este superior à umidade volumétrica de saturação, que é de 40,5 %, indicando que houve um aumento no volume de vazios em razão da expansão do solo. A amostra expandiu cerca de 2 cm, ou seja, 10% de sua altura inicial, valor próximo ao encontrado no ensaio de expansão.

A Figura 7 apresenta os perfis de umidade volumétrica com a profundidade e com o tempo durante a etapa de umedecimento. Com os valores de umidade volumétrica e com o auxílio da curva de retenção obtida para amostra, foram alcançados os perfis de sucção em função da profundidade e com o tempo. Nos sensores 2 e 3, as sucções variaram de 100 a 200 kPa. A partir do segundo dia, as sucções próximas à superfície tenderam a valores nulos, como pode ser visto na Figura 7.

Na etapa de secagem, o sensor 1 registrou umidade volumétrica mínima 8,5%, variando em 39% desde o início do processo de secagem. Nos sensores 2 e 3, a variação foi pequena, de cerca de 2,5%. Na Figura 8, estão apresentados os resultados para a etapa de secagem.

A máxima sucção observada no sensor mais próximo à superfície (sensor 1) foi da ordem de 230.000 kPa, enquanto nos demais sensores as sucções variaram de 100 a 300 kPa durante todo o período da etapa de secagem. Quanto ao surgimento de trincas, estas só foram observadas na superfície da camada experimental a uma profundidade máxima de 3 cm. A Figura 9 apresenta a fotografia do topo do corpo de prova ao final da etapa de secagem e após a aplicação de uma carga hidráulica na superfície, em que se observou o fechamento das trincas, que resultou na diminuição da permeabilidade, como pode ser visto na Figura 10.

Para a determinação dos coeficientes de permeabilidade, foi aplicada uma carga hidráulica de 50 cm no interior do lisímetro, e os coeficientes de permeabilidade foram determinados por meio da lei de Darcy, considerando a carga hidráulica variável. Observou-se que o fluxo da água inicialmente ocorreu entre as superfícies laterais, entre o lisímetro e o corpo de prova, devido à contração volumétrica do solo. Com o decorrer da infiltração, a permeabilidade

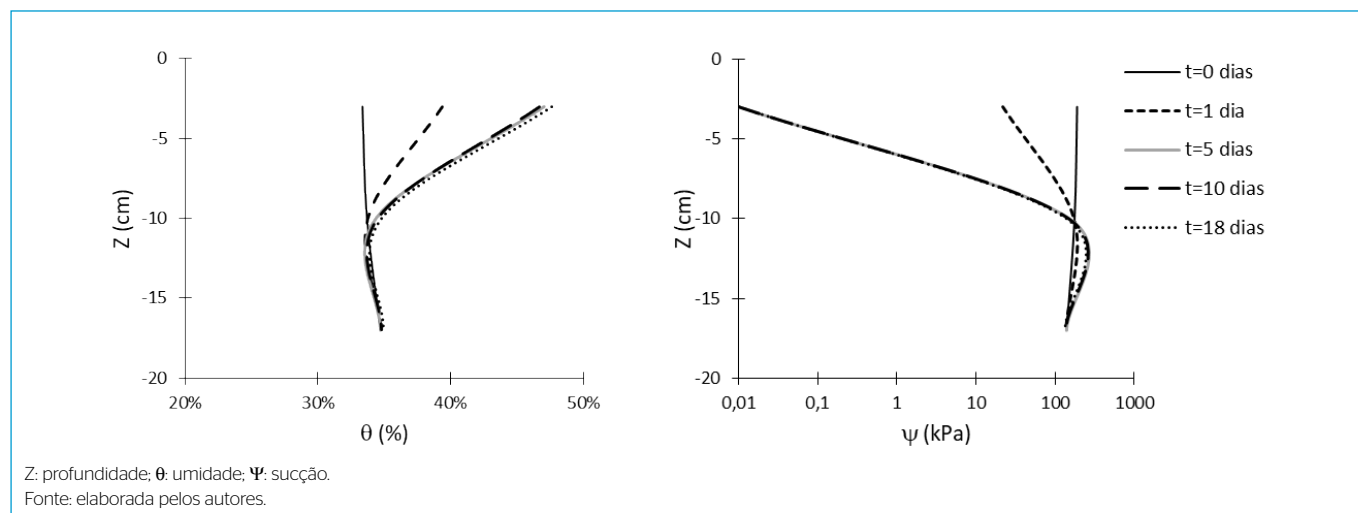


Figura 7 - Variações de umidade e sucções ao longo do corpo de prova durante o processo de umedecimento.

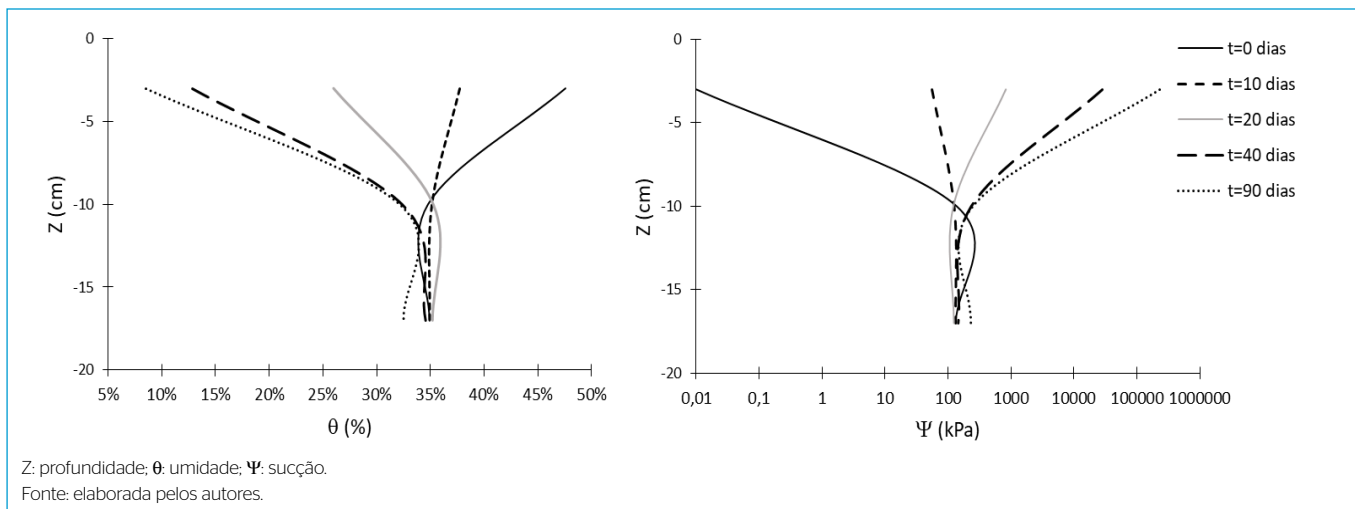


Figura 8 - Perfil de umidade volumétrica em função do tempo de secagem.

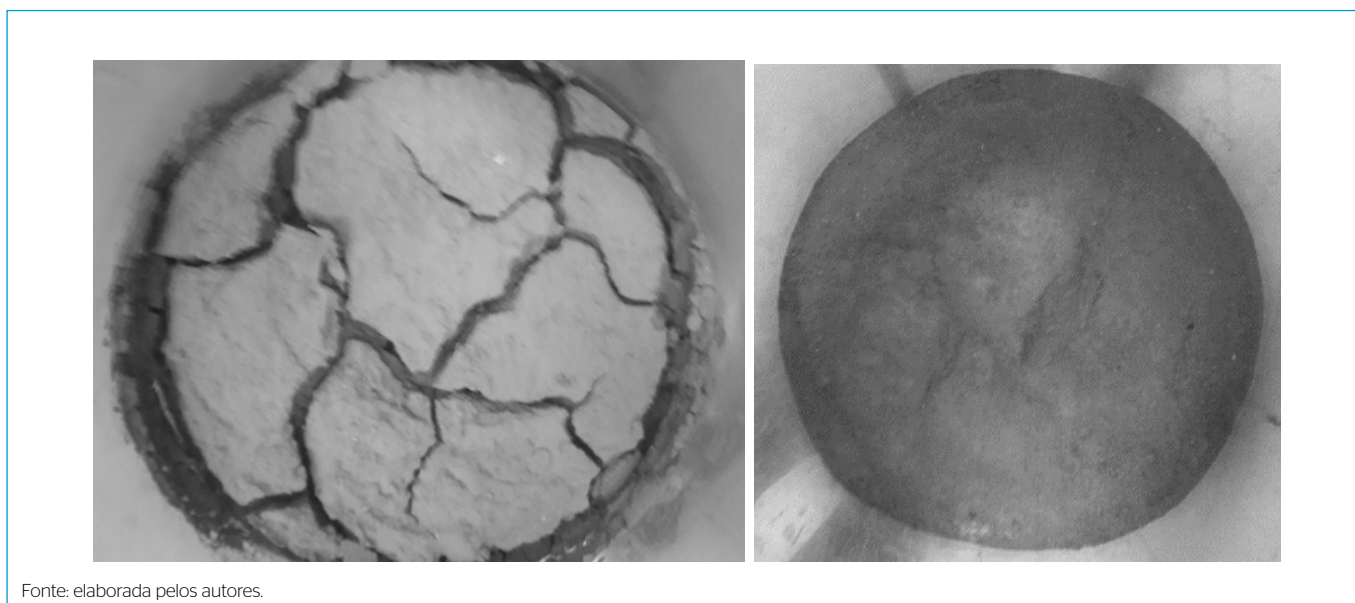


Figura 9 - Fotografia da superfície da camada experimental no final da etapa de secagem e após a infiltração na superfície com o fechamento das trincas.

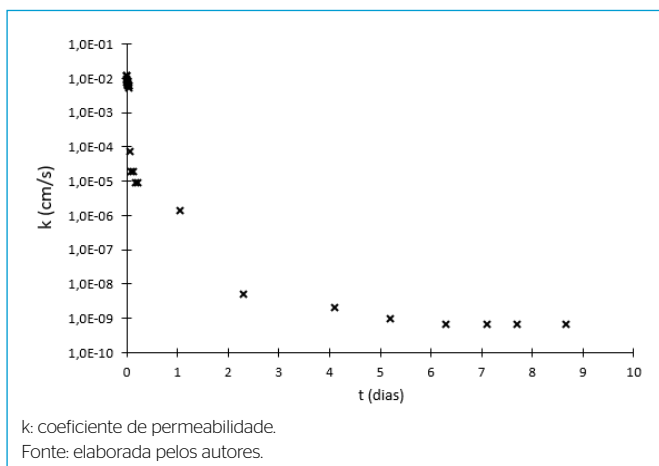
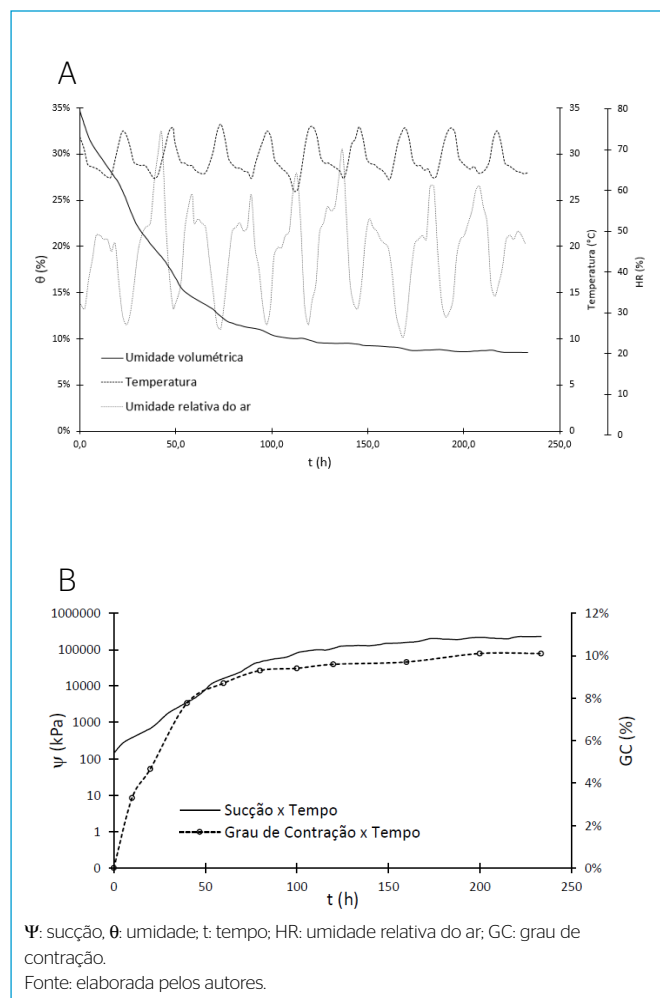


Figura 10 - Variação da permeabilidade com o tempo após a nova carga hidráulica.

foi diminuída até atingir valores próximos à permeabilidade inicial da camada compactada, que confirmam o comportamento expansivo da amostra, que preencheu os caminhos preferenciais de percolação e, em menos de 24 horas, o coeficiente de permeabilidade diminuiu significativamente.

Os resultados obtidos no segundo modelo experimental submetido à secagem são apresentados na Figura 11. Durante o ensaio, a temperatura variou de 27 a 33 °C, enquanto a umidade relativa do ar variou de valores próximos a 30% até cerca de 70%. Os valores finais de teor de umidade volumétrica, sucção, concordaram com os obtidos na camada de 20 cm ensaiada no lisímetro, sugerindo que a contração volumétrica no modelo experimental ocorre até uma umidade volumétrica de cerca de 10%. Ao contrário do modelo no lisímetro, o corpo de prova nesse segundo modelo não apresentou trincas. Esse resultado concorda com os observados por outros autores (CORTE & HIGASHI, 1960; TOLLENAAR, VAN PAASSEN & JOMMI, 2017), que mostraram que a formação da trincas



**Figura 11 – (A) Variação do teor de umidade, temperatura e umidade relativa com o tempo.**

**(B) Variação da sucção e do grau de contração com o tempo.**

depende de diferentes fatores, como a espessura da camada, a umidade inicial, a área da superfície e o tipo de material em que a amostra está sendo confinada.

Quanto à permeabilidade à água, pode-se perceber que a amostra apresentou bom desempenho, mesmo considerando as trincas, que são fechadas logo que o solo umedece. No entanto, as trincas podem prejudicar o desempenho da camada quanto à permeabilidade aos gases, principalmente no semiárido Nordeste, que apresenta um extenso período de estiagem. Há, neste caso, a necessidade de verificar este comportamento em campo, em escala-piloto, em que a cobertura estará sujeita às condições climáticas e a camada argilosa estará protegida por ao

menos uma camada superficial, de controle de erosão e suporte de vegetação. Questões importantes devem ser abordadas, como facilidade ou dificuldade de realizar a compactação propriamente dita, quando o material é expansivo e com presença de matéria orgânica, do grau de expansão máximo em que se consegue executar a compactação de forma eficiente para reproduzir a densidade desejada e o desempenho da cobertura devido à formação das trincas em uma camada de 30 cm.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na pesquisa permitiram verificar o potencial de utilização das amostras de argilas expansivas como camada de impermeabilização de coberturas de aterros de resíduos sólidos. As amostras foram classificadas de acordo com o SUCS como argilas de alta compressibilidade, e a caracterização geotécnica indicou quantidades de finos, limites de liquidez compatíveis e coeficientes de permeabilidade com as normas e os estudos considerados (CETESB, 1993; USEPA, 2004; ABNT, 2010).

O modelo de cobertura de laboratório foi construído para representar a parte superior de uma camada de argila compactada, a qual foi sujeita a processos de secagem e umedecimento. Durante a secagem, verificou-se a formação de trincas na superfície, que começaram a ocorrer para umidades inferiores ao limite de liquidez e superiores ao limite de plasticidade do material. As leituras dos sensores de umidade indicaram que variações mais significativas de umidade ocorreram somente no sensor mais próximo da superfície, posicionado na profundidade máxima em que foram observadas as trincas. Embora tenham sido observadas a formação de trincas e as deformações volumétrica na camada de cobertura, a permeabilidade à água apresentou um bom desempenho, uma vez que ocorreu a expansão do solo durante o umedecimento que fechou as trincas e os caminhos preferenciais de fluxo. Porém, o desempenho da camada quanto à permeabilidade aos gases pode ter o desempenho prejudicado pelas trincas, mas carece de uma investigação desse comportamento em campo, uma vez que as trincas no modelo de laboratório se formaram na parte superficial, que esteve sujeita a taxas de evaporação inferior às de campo. Outra questão a ser abordada é a viabilidade da realização de um processo de compactação em argilas com características expansivas em campo. Sugere-se a investigação desse comportamento a longo prazo em experimento reproduzido em aterro sanitário, em escala-piloto, como monitoramento das condições climáticas, das parcelas do balanço hídrico e da umidade e sucção, nas camadas que compõem a cobertura dimensionada.

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Magalhães, P. R. F.: Conceituação, Metodologia, Realização dos Ensaios, Tratamento e Análise de Dados, Escrita – Primeira Redação. Borghetti Soares, A.: Conceituação, Metodologia, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. *Cerâmica*, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132002000100008>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D5856-15*: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. West Conshohocken: ASTM International, 2015.



- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D5298-16*: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D5298*: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D4829*: Standard test method for expansion index of soils. West Conshohocken: ASTM International, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *D2487*: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 14545*: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15849*: Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7181*: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7180*: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6459*: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7182*: Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016d.
- BOSCOV, M. E. G. *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BOWDERS, J. J.; DANIEL, D. E. Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 113, n. 12, p. 1432-1448, 1987. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:12\(1432\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:12(1432))
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Resíduos sólidos industriais. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993.
- CORTE, A. E.; HIGASHI, A. Experimental research on desiccation cracks in soil. *Research Report 66*, n. 66, 1960.
- DNER-ME 093. Solos - determinação da densidade real. *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*, 1994.
- EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997.
- GOMES, C. F. *Argilas - O que são e para que servem*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.
- JULINA, M.; THYAGARAGY, T. Combined effects of dry-wet cycles and interacting fluid on desiccation cracks and hydraulic conductivity of compacted clays. *Engineering Geology*, v. 267, p. 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105505>
- LI, J. H.; LI, L.; CHEN, R.; LI, D. Q. Cracking and vertical preferential flow through landfill clay liners. *Engineering Geology*, v. 206, p. 33-41, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.03.006>
- MESRI, G.; OLSON, R. E. Mechanisms controlling the permeability clays. *Clays and Clay Mineral*, v. 19, n. 3, p. 151-158, 1971. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1971.0190303>
- SEED, H. B.; WOODWARD JR., R. J.; LUNDGREN, R. Perdition of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of Soil Mechanics*, v. 89, n. 3, p. 143-146, 1962. <https://doi.org/10.1061/jsefaq.0000509>
- SHACKELFORD, C. D.; BENSON, C. H.; KATSUMI, T.; EDIL, T. D.; LIN, L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with no-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 18, n. 2-4, p. 133-161, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(99\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(99)00024-2)
- SOUZA SANTOS, P.; SANTOS, H. S. *Ciência e tecnologia de argilas*. E. Blucher, 1989.
- TANG, C. S.; SHI, B.; LIU, C.; SUO, W. B.; GAO, L. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science*, v. 52, n. 1-2, p. 69-77, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.032>
- TOLLENAAR, R. N.; VAN PAASSEN, L. A.; JOMMI, C. Observation of desiccation and crack of the clay layers. *Engineering Geology*, v. 230, p. 23-31, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.08.022>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers*. Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington: USEPA, 2004.
- 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. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory Office of Research and Development*. U. S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, 1991.