



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PAULO ROSSY FORTE MAGALHÃES**

**CARACTERIZAÇÃO DE ARGILAS PARA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE  
IMPERMEABILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COBERTURA DE ATERROS  
SANITÁRIOS NO SEMIÁRIDO**

**FORTALEZA**  
**2019**

PAULO ROSSY FORTE MAGALHÃES

CARACTERIZAÇÃO DE ARGILAS PARA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE  
IMPERMEABILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS  
NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M168c Magalhães, Paulo Rossy Forte.  
Caracterização de Argilas para Utilização em Camadas de Impermeabilização em Sistemas de Cobertura de Aterros Sanitários no Semiárido / Paulo Rossy Forte Magalhães. – 2019.  
80 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.
1. Aterros sanitários. 2. Camada de cobertura final. 3. Camada de impermeabilização. 4. Argilas compactadas. 5. Desempenho. I. Título.

CDD 624.15

---

PAULO ROSSY FORTE MAGALHÃES

CARACTERIZAÇÃO DE ARGILAS PARA UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE  
IMPERMEABILIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS  
NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 27/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

À Flor.

## AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Valda e Roci, que não mediram esforços para proporcionar educação adequada aos filhos, portanto os principais responsáveis por esta conquista.

À Mariah, minha irmã, por todo apoio.

Aos meus avôs, vovô Gerardo Firmino e vô Sebastião Neto que não puderam estar em vida para viver esse momento, mas sei que estão muito felizes.

À vovó Magelita pelo carinho e orações.

À vó Mariá, pelo apoio incondicional, sempre acreditando no meu potencial.

Aos meus tios, Célia, Regina, Kelsey, Lindsey, Forte, Pereira e Vyvian pelo incentivo.

À Marina, meu amor.

À minha vida, Flor.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação.

Aos meus colegas de laboratório, Ana, Anselmo, Cintia, Ciroca, David, Fabíola, Felipe, Germano, Jeanine, Natalha, Roberto e Prof. Rosiel, pela ajuda na pesquisa e pelo companheirismo.

Aos meus colegas de mestrado, Anderson, Caio, Daniel, David, Edno, Giorgia, Hiago, Konstantinos e Raquel, pelos momentos de descontração, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Ao meu orientador, Prof. Anderson Borghetti Soares, pela excelente orientação, empenho e solicitude.

Aos professores Alfran, Chagas e Silvrano, pela disponibilidade e pelos conhecimentos repassados.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Chagas e Prof. Marcos Porto, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Antes de ler o livro que o guru lhe deu,  
você tem que escrever o seu.”

Raul Santos Seixas

## RESUMO

Os aterros sanitários são obras construídas para o confinamento seguro dos resíduos sólidos urbanos. Dentre seus elementos de projeto destaca-se a camada de impermeabilização da cobertura final, geralmente construída com solos argilosos, que deve minimizar, ao máximo, a infiltração de águas pluviais para o interior do aterro e escape de gases para o meio ambiente. As características físicas, químicas e mineralógicas dos materiais dessa camada, devem ser analisadas para avaliar seu potencial de utilização, além de análises do desempenho da camada de impermeabilização para as condições climáticas locais. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de solos argilosos como material impermeabilizante de sistemas de coberturas de aterros sanitários. Para isso foram selecionadas duas amostras para a realização de ensaios geotécnicos e mineralógicos. Uma das amostras foi escolhida para a construção de uma camada experimental com espessura de 20 cm de argila compactada em um tubo de acrílico com diâmetro de 30 cm. Foram medidas as variações do teor de umidade em diferentes profundidades da camada, utilizando sensores eletrônicos, com o objetivo de monitorar o processo de secagem e a formação de trincas. Um modelo para avaliar a contração volumétrica do material foi adicionado à pesquisa. As amostras estudadas apresentaram características compatíveis com os requisitos das normas consultadas. Quanto à camada experimental, a formação de trincas limitou-se à superfície. Após o período de evaporação foi aplicada uma carga hidráulica na superfície da camada, ocorrendo o fechamento das trincas e recuperando a estanqueidade do sistema. Embora as trincas não tenham atingido toda a profundidade da camada experimental, há a necessidade de verificar o desempenho da camada argilosa através de um modelo experimental de campo, sujeito as condições climáticas do semiárido nordestino.

**Palavras-chave:** Aterros sanitários, camada de cobertura final, camada de impermeabilização, argilas compactadas, desempenho.

## ABSTRACT

Landfills sites are built for the safe containment of municipal solid waste. Among its design elements, there is the waterproofing layer of the final cover, usually built with clay soils, which should minimize the infiltration of rainwater into the landfill and the escape of gases into the environment. The physical, chemical and mineralogical characteristics of the materials of this layer should be analyzed to evaluate their potential use, as well as analysis of the performance of the waterproofing layer for local climatic conditions. The present study aims to evaluate the performance of clay soils in the State of Ceará as a waterproofing material of landfill cover systems. In this regard, two samples were selected for geotechnical and mineralogical tests. A sample selected for the construction of a 20 cm thick experimental layer of compacted clay in a 30 cm diameter acrylic tube. Variations in water content at different depths of the layer were measured using electronic sensors for monitoring the drying process and crack formation. A model to evaluate the volumetric contraction of the material was added to the research. The studied samples presented characteristics compatible with the requirements of the consulted standards. As for the experimental layer, crack formation was limited to the surface. After the evaporation period, a hydraulic load was applied to the surface of the layer, closing the cracks and recovering the system tightness. Although the cracks did not reach the full depth of the experimental layer, it is necessary to verify the performance of the clay layer throughout an experimental field model, which is subject to the climatic conditions of the northeastern semiarid.

**Keywords:** Solid waste landfill, final cover layer, compacted clay liners, performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Principais elementos de projeto de um aterro de resíduos sólidos. ....	20
Figura 2	- Configuração de cobertura com múltiplas camadas. ....	21
Figura 3	- Sequência dos ensaios utilizados na pesquisa.....	34
Figura 4	- Mapa de localização das amostras. ....	35
Figura 5	- Metodologia para identificação dos argilominerais por DRX. ....	43
Figura 6	- Esquema da camada de argila experimental. ....	44
Figura 7	- Modelo experimental de secagem.....	46
Figura 8	- Modelo experimental durante o processo de umedecimento.....	63
Figura 9	- Expansão no corpo de prova devido à etapa de umedecimento. ....	65
Figura 10	- Fotografia da superfície da camada experimental após a etapa de secagem. ....	68
Figura 11	-Superfície da camada experimental após a aplicação da carga hidráulica.....	69

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Participação das regiões do Brasil no total de RSU coletado. ....	18
Gráfico 2 - Disposição final do RSU coletados no Brasil e no estado do Ceará. ....	19
Gráfico 3 - Relação entre índice de vazios e coeficiente de permeabilidade para três tipos de argila. ....	24
Gráfico 4 - Influência da umidade de compactação na estrutura do solo. ....	25
Gráfico 5 - Variação da permeabilidade com a umidade de compactação. ....	26
Gráfico 6 - Variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade e energia de compactação. ....	26
Gráfico 7 - Efeito do grau de saturação na condutividade hidráulica de uma argila compactada. ....	28
Gráfico 8 - Influência da saturação no coeficiente de permeabilidade ao ar. ....	29
Gráfico 9 - Equações para a determinação da sucção através da umidade do papel filtro. ....	41
Gráfico 10 - Curvas granulométricas das amostras. ....	49
Gráfico 11 - Curvas de fluidez das amostras. ....	50
Gráfico 12 - Posição das amostras na carta de plasticidade. ....	51
Gráfico 13 - Curvas de compactação das amostras. ....	52
Gráfico 14 - Curvas de expansão das amostras. ....	53
Gráfico 15 - Curvas de adensamento das amostras. ....	54
Gráfico 16 - Curvas de retenção ajustadas e dados experimentais. ....	55
Gráfico 17 - Variação da condutividade hidráulica não saturada com a sucção. ....	56
Gráfico 18 - Difratoogramas da AM-ITA pelo método do pó. ....	58
Gráfico 19 - Difratoogramas da AM-CAS pelo método do pó. ....	58
Gráfico 20 - Difratoogramas da AM-ITA após orientação das partículas. ....	59
Gráfico 21 - Difratoogramas da AM-CAS após a orientação das partículas. ....	60
Gráfico 22 - Relação entre a permissividade elétrica aparente e a umidade volumétrica. ....	62
Gráfico 23 - Variação da umidade volumétrica ao longo da profundidade. ....	64
Gráfico 24 - Perfil de umidade volumétrica em função do tempo de umedecimento. ....	65
Gráfico 25 - Variações das sucções ao longo do corpo de prova durante o processo de umedecimento. ....	66
Gráfico 26 - Perfil de umidade volumétrica em função do tempo de secagem. ....	67
Gráfico 27 - Variações das sucções ao longo do corpo de prova durante o processo de secagem. ....	67
Gráfico 28 - Variação da permeabilidade com o tempo. ....	68
Gráfico 29 - Variação da umidade volumétrica, temperatura e umidade relativa do ar com o tempo de ensaio. ....	70
Gráfico 30 - Variação da sucção e grau de contração com o tempo. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos para camada de impermeabilização. ....	31
Tabela 2 - Coordenadas dos locais de retirada das amostras. ....	35
Tabela 3 - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização geotécnica. ....	36
Tabela 4 - Poderes reflectores dos principais argilominerais ....	43
Tabela 5 - Umidade natural e teor de matéria orgânica das amostras. ....	48
Tabela 6 - Composição granulométrica das amostras.....	49
Tabela 7 - Limites de consistência, índice de plasticidade e índice de atividade das amostras. .....	50
Tabela 8 - Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.....	52
Tabela 9 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios de permeabilidade.....	55
Tabela 10 - Valores de entrada de ar e umidade residual.....	56
Tabela 11 - Distâncias interplanares dos principais argilominerais encontrados no Brasil. ....	57
Tabela 12 - Composição mineralógica das amostras.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASTM	American Society for Testing and Materials
CETESB	Compania Ambiental do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios X
e	Índice de Vazios
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
h	Umidade gravimétrica
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
USEPA	United States Environmental Protection Agency

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{\AA}$	Angstrom
%	Porcentagem
$\sqrt{\epsilon}$	Permissividade elétrica aparente
$\theta$	Umidade volumétrica
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual
$\theta_s$	Umidade volumétrica de saturação
$\Theta$	Saturação normalizada do solo
$\psi$	Sucção matricial
$\psi_{EA}$	Sucção de entrada de ar
$\psi_{RES}$	Sucção residual
k	Coefficiente de permeabilidade
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\rho_d$	Massa específica aparente seca
m, n	Parâmetros adimensionais de Mualem
$a_0$	Coefficiente linear da curva de calibração
$a_1$	Coefficiente angular da curva de calibração
HR	Umidade relativa do ar
h	Umidade gravimétrica
h <sub>ót</sub>	Umidade ótima de compactação
n	Porosidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	<i>17</i>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>ATERROS SANITÁRIOS</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>SISTEMAS DE COBERTURAS DE ATERROS</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>TIPOS DE COBERTURAS DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>FATORES QUE INFLUENCIAM A PERMEABILIDADE DOS SOLOS ARGILOSOS COMPACTADOS</b> .....	<b>23</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Composição mineralógica</i> .....	<i>23</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Estrutura das partículas</i> .....	<i>25</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Grau de saturação</i> .....	<i>27</i>
<b>2.6</b>	<b>RESSECAMENTO DOS SOLOS ARGILOSOS COMPACTADOS</b> .....	<b>29</b>
<b>2.7</b>	<b>REQUISITOS PARA CAMADA DE IMPERMEABILIZAÇÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>ENSAIOS GEOTÉCNICOS</b> .....	<b>36</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Análise granulométrica</i> .....	<i>36</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Limites de consistência</i> .....	<i>37</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Densidade real</i> .....	<i>37</i>
<i>3.2.4</i>	<i>pH</i> .....	<i>38</i>
<i>3.2.5</i>	<i>Ensaio de compactação</i> .....	<i>38</i>
<i>3.2.6</i>	<i>Ensaio de expansão livre</i> .....	<i>38</i>
<i>3.2.7</i>	<i>Ensaio edométrico</i> .....	<i>39</i>
<i>3.2.8</i>	<i>Ensaio de permeabilidade</i> .....	<i>39</i>
<i>3.2.9</i>	<i>Curvas de retenção</i> .....	<i>40</i>
<b>3.3</b>	<b>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA</b> .....	<b>42</b>
<i>3.3.1</i>	<i>Difração de Raio X</i> .....	<i>42</i>
<b>3.4</b>	<b>MODELOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>44</b>
<i>3.4.1</i>	<i>Camada experimental de argila compactada</i> .....	<i>44</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Calibração do sensor de umidade</i> .....	<i>45</i>
<i>3.4.3</i>	<i>Modelo experimental de secagem</i> .....	<i>46</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>ENSAIOS GEOTÉCNICOS</b> .....	<b>48</b>
<i>4.1.1</i>	<i>Umidade natural, teor de matéria orgânica, densidade real dos grãos e pH</i> .....	<i>48</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Análise granulométrica</i> .....	<i>48</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Limites de consistência</i> .....	<i>50</i>
<i>4.1.4</i>	<i>Classificação pelo sistema de classificação unificada dos solos (SUCS)</i> .....	<i>51</i>
<i>4.1.5</i>	<i>Ensaio de compactação</i> .....	<i>51</i>
<i>4.1.6</i>	<i>Expansão livre</i> .....	<i>53</i>
<i>4.1.7</i>	<i>Ensaio edométrico</i> .....	<i>53</i>
<i>4.1.8</i>	<i>Permeabilidade</i> .....	<i>54</i>

<b>4.1.9</b>	<b><i>Curva de retenção</i></b> .....	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA</b> .....	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>MODELOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>61</b>
<b>4.3.1</b>	<b><i>Camada experimental de argila compactada</i></b> .....	<b>61</b>
<b>4.3.2</b>	<b><i>Modelo de ressecamento do solo</i></b> .....	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente produção de resíduos sólidos provenientes de diferentes atividades humanas, há a necessidade de se definir uma correta destinação para os mesmos, a fim de se evitar contaminações ao meio ambiente. A educação ambiental é fundamental para redução, reutilização e reciclagem (3R) destes materiais (SAKAI et al, 2009; MACEDO e RAMOS, 2015). A disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários é o método de disposição final mais utilizado no Brasil (ABRELPE. 2017).

Os aterros de resíduos sólidos são estruturas construídas para confinar estes materiais e evitar qualquer interação entre estes e o meio ambiente, devendo ser constituídos por camada de drenagem e impermeabilização de fundo, células de resíduos, camadas de drenagem e camada de cobertura. O dimensionamento de cada elemento deve ser baseado em critérios de engenharia.

Uma das estruturas de grande importância em um aterro de resíduos sólidos urbanos é a camada de impermeabilização da cobertura final, que serve para limitar a entrada de águas pluviais, como também o escape ou entrada de gases, quando houver.

A cobertura final é formada por um conjunto de camadas e dentre elas destaca-se a camada impermeabilizante, que pode ser construída com materiais argilosos, misturas solo-bentonita ou geossintéticos e é de fundamental importância para o desempenho da cobertura.

Os materiais a serem utilizados como camada impermeabilizante devem possuir características físicas, químicas e mineralógica desejáveis para este fim. Sendo, portanto, essencial a etapa de caracterização na seleção dos materiais impermeabilizantes.

A NBR 15849 (ABNT, 2010), o manual da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993) e o guia da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA, 2004) dispõem sobre os requisitos mínimos para aceitação de materiais para construção de aterros sanitários.

A camada de impermeabilização, também, deve ser analisada quanto ao seu desempenho, levando em consideração as condições climáticas locais. O semiárido brasileiro apresenta longos períodos de estiagem e de altas temperaturas, fazendo com que haja uma grande variação na umidade da camada, podendo causar trincas e comprometer a eficiência da estrutura.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Caracterizar solos argilosos para avaliar, através de ensaios de laboratório, a adequabilidade para a utilização em camadas de impermeabilização de aterros de resíduos sólidos no semiárido nordestino.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- Realizar caracterização geotécnica e mineralógica de amostras argilosas, além de ensaios de permeabilidade, potencial de expansão e curvas de retenção.
- Avaliar o desempenho de uma camada de impermeabilização experimental sob condições de secagem e do potencial de trincagem da camada através de um modelo experimental para relacionar a retração volumétrica com variação da sucção.

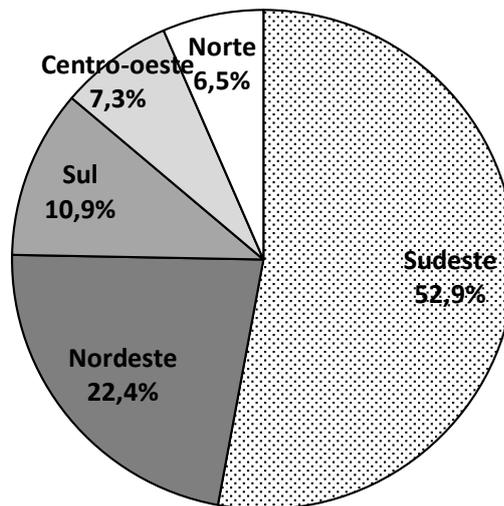
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo a apresentação de uma revisão bibliográfica sobre assuntos mais relevantes para a compreensão da pesquisa.

### 2.1 Geração de resíduos sólidos

Um dos principais problemas ambientais da atualidade é a geração de resíduos sólidos, os quais podem ser de vários tipos, como os resíduos de mineração, material hospitalar, radioativo, industrial, entre outros, sendo o principal deles o Resíduo Sólido Urbano (RSU). No Brasil, são gerados cerca de 196.050 toneladas de RSU por dia, havendo diferença na quantidade produzida por cada região do país (ABRELPE, 2017), conforme pode ser visualizado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Participação das regiões do Brasil no total de RSU coletado.



Fonte: ABRELPE (2017).

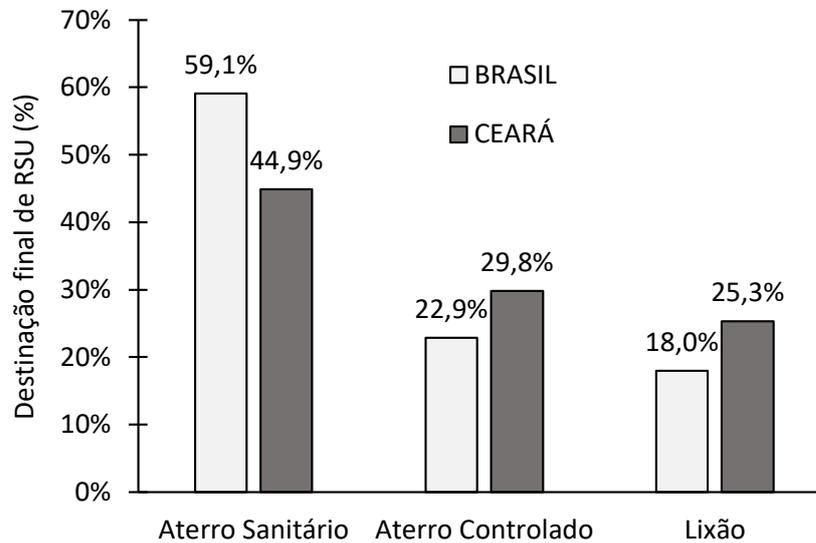
A região do Brasil com a maior parcela na geração de RSU é a região sudeste com 52,9%, enquanto a região norte é a que apresenta menor parcela, com 6,5%. Essa diferença é explicada, principalmente, pela densidade demográfica e nível de industrialização de cada região.

No Brasil, 59% dos RSU coletados são dispostos em aterros sanitários. Cerca de 23% têm como destino os aterros controlados, aqueles que não possuem cuidados com a

impermeabilização de fundo, e o restante vão para os lixões à céu aberto, que, ainda, recebem 18% do total do RSU coletado no país (ABRELPE, 2017).

Por meio do Gráfico 2, pode-se comparar a destinação final do RSU no Brasil com o estado do Ceará.

Gráfico 2 - Disposição final do RSU coletados no Brasil e no estado do Ceará.



Fonte: ABRELPE (2017).

Pode-se observar que o Ceará está abaixo da média nacional, em termos de disposição adequada do RSU, com, cerca de 55%, dispostos em aterros controlados ou lixões, indicando a urgente necessidade de investimentos em aterros sanitários no estado.

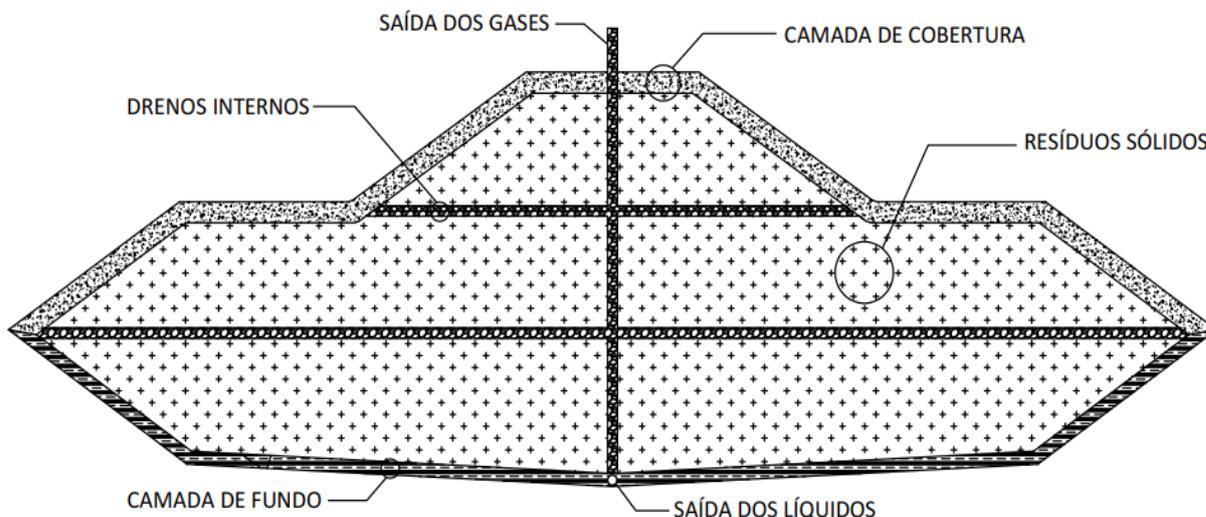
## 2.2 Aterros sanitários

Um aterro sanitário é uma obra de engenharia, projetada a partir de critérios técnicos, com o objetivo de garantir a disposição dos resíduos sem que haja danos à saúde pública e ao meio ambiente (MEEGODA et al, 2016).

Segundo Boscov (2008), os aterros de resíduos sólidos têm uma particularidade em relação às outras obras de engenharia. Nessas, é necessário a conclusão da obra para desempenhar sua função, já nos aterros, a função acaba com o término da obra. No entanto, o monitoramento dos aterros se faz necessário após sua conclusão, uma vez que a produção de chorume e gases se prolonga após o fechamento do aterro.

Basicamente, os aterros são construídos com solos e resíduos. Os principais elementos de projetos para aterros podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 - Principais elementos de projeto de um aterro de resíduos sólidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A camada de fundo é composta por um sistema de impermeabilização e de drenagem, sendo que o primeiro tem como objetivo de minimizar, ao máximo, a percolação do lixiviado, e o sistema de drenagem, direcionar o chorume para tratamento adequado.

Os resíduos são dispostos em células, com camadas drenantes entre elas. O sistema de drenagem do interior do aterro deve direcionar o lixiviado para a drenagem de fundo e encaminhar para o tratamento. Os gases gerados na decomposição da matéria orgânica ou volatilização de produtos químicos são direcionados para a queima ou aproveitamento na geração de energia, por meio de sistemas de drenagem de gás.

O fechamento do aterro é feito através de um sistema de cobertura, que podem ser de vários tipos, composto por uma camada ou um conjunto de camadas, com o objetivo de isolar os resíduos do meio ambiente, o controlar o fluxo de gases e a limitar a infiltração de água para o interior dos resíduos (BOSCOV, 2008).

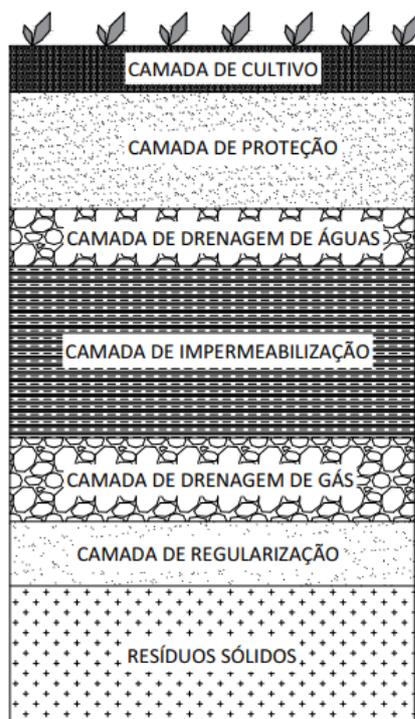
### 2.3 Sistemas de coberturas de aterros

O uso de um sistema de cobertura é essencial para que o desempenho de um aterro de resíduos seja satisfatório, sendo, portanto, imprescindível a realização de um projeto

adequado. O padrão de cobertura de aterros varia para cada localidade, pois depende dos materiais disponíveis e das condições climáticas locais (USEPA, 2004).

Um sistema de cobertura convencional pode conter as seguintes camadas: camada de solo de cultivo e proteção, camada de drenagem de águas pluviais, de impermeabilização, de drenagem dos gases e camada de regularização (USEPA, 2004). A Figura 2 apresenta os componentes típicos de um sistema de cobertura final.

Figura 2 - Configuração de cobertura com múltiplas camadas.



Fonte: Modificado de USEPA (2004).

A camada de solo de cultivo é responsável por proteger as camadas inferiores contra a erosão e reter umidade, devendo ser favorável ao estabelecimento de vegetação. Segundo Araújo (2014), a vegetação deve ser planejada e controlada, já que as espécies de plantas influenciam na definição da espessura dessa camada.

A camada drenante tem a função de direcionar o fluxo de águas pluviais e reduzir a carga hidráulica na camada subjacente. A camada de impermeabilização impede a percolação de água e fluxo de gases. A camada de coleta de gás direciona os gases para o sistema de tratamento e a camada de regularização tem como função, preparar a superfície para receber a camada coletora de gases.

O material mais utilizado na execução das camadas do sistema de cobertura são solos compactados, mas há um crescimento no uso de geossintéticos (HUSE, 2007).

## 2.4 Tipos de coberturas de aterros de resíduos sólidos

Os tipos de coberturas para aterros sanitários podem ser classificados quanto ao sistema de impermeabilização em dois grupos: os convencionais e os alternativos.

As mais utilizadas são as coberturas convencionais, que fazem uso de barreiras resistivas para impermeabilização, ou seja, materiais de baixa permeabilidade para minimizar a entrada de águas pluviais e o fluxo de gases entre o interior do aterro e o meio ambiente. Podem ser construídas com uma camada de solo fino compactado ou uma combinação de solo compactado e geossintéticos. O coeficiente de permeabilidade deve ser igual ou inferior a  $10^{-9}$  m/s. (CETESB, 1993; USEPA, 2004; ABNT, 2010)

As coberturas convencionais apresentam bons resultados para regiões com climas úmidos, porém em climas áridos é possível que o ressecamento do solo prejudique o desempenho da cobertura (DANIEL e WU, 1993; USEPA, 2004; CATAPRETA, 2008; ROSE, 2009).

As coberturas alternativas utilizam os princípios de armazenamento de água nas próprias camadas para minimizar a percolação, sendo necessário o conhecimento do balanço hídrico local. As barreiras evapotranspirativas armazenam água em seus poros em época de altas precipitações, funcionando como uma “esponja”, e, em períodos de baixas precipitações, há a evaporação gradual dessa umidade (ZORNBERG et al, 2003).

Para o projeto de uma cobertura evapotranspirativa é necessário que se determine: a capacidade de retenção de água do solo, a quantidade de água que deve ser acumulada em períodos que as precipitações excedam a taxa de evapotranspiração, e a espessura de solo necessária para o acúmulo da água (BARROSO, 2008).

Uma camada de solo granular pode ser adicionada abaixo da barreira evapotranspirativa com o objetivo de aumentar a capacidade de armazenamento de água através de uma ruptura capilar. Nesse caso, o sistema de impermeabilização é chamado de barreira capilar. A diferença das propriedades hidráulicas das duas camadas promove a retenção da água na camada de solo pelo efeito da sucção, minimizando a percolação de água e o fluxo de gás entre o aterro e a atmosfera (SOARES, 2011).

Há, ainda, as coberturas oxidativas, que são constituídas de solo e materiais orgânicos que favorecem o desenvolvimento de bactérias metanotróficas. O metano gerado no

aterro é consumido pelos microrganismos liberando água e dióxido de carbono (ARAÚJO, 2014).

## **2.5 Fatores que influenciam a permeabilidade dos solos argilosos compactados**

A infiltração de água para o interior do aterro é indesejável, pois aumenta o volume de lixiviado a ser tratado. Os líquidos gerados na decomposição química ou orgânica dos resíduos são de difícil tratamento, devido a composição do material que, comumente, contam com elevado teor de substâncias tóxicas.

Como a entrada de águas pluviais é o principal fator na produção do lixiviado, o estudo da permeabilidade hidráulica dos materiais utilizados na impermeabilização de coberturas é de fundamental importância para a minimização do problema.

Os principais fatores que influenciam a permeabilidade dos solos finos compactados são: o tamanho e forma das partículas, volume de vazios, composição mineralógica, estrutura e grau de saturação. A formação de trincas nas camadas de impermeabilização de cobertura, também, é um fator a ser considerado, uma vez que o desempenho da camada pode ser afetado significativamente.

A permeabilidade aos gases, também, é importante na escolha dos materiais para utilização em camadas de impermeabilização. Nos aterros sanitários há produção de biogás composto, basicamente, por 50 % de metano ( $\text{CH}_4$ ), gás potencialmente poluidor, 40 % de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases com menor representação (SILVA e CAMPOS, 2008).

A produção de gás nos aterros sanitários se dá em duas fases de decomposição dos resíduos: a fases aeróbica e anaeróbica. Na primeira fase, há pouca produção de metano, que é mais significativa na segunda fase. Após a construção da camada de cobertura e escassez do oxigênio livre, as bactérias anaeróbicas predominam e há um aumento na produção de metano (AUGENSTEIN e PACEY, 1991).

### ***2.5.1 Composição mineralógica***

Os argilominerais podem ser divididos, basicamente, em dois tipos, de acordo com sua estrutura molecular: camadas 1:1 ou difórmicos e camadas 2:1 ou trifórmicos. Essa denominação é referente ao número de camadas de tetraedro de sílica e octaedro de hidróxidos, nessa ordem, que entram em sua cela unitária (WHITMAN E LAMBE, 1969).

Segundo Albers et al (2002), os principais argilominerais existentes nos solos brasileiros são: a caulinita, illita, montmorilonita, clorita e vermiculita.

A composição e proporção dos argilominerais no solo influencia diretamente suas propriedades físicas, sendo as principais: retenção de água, consistência, resistência, condutividade hidráulica e susceptibilidade à expansão e contração (VIEIRA, 1988).

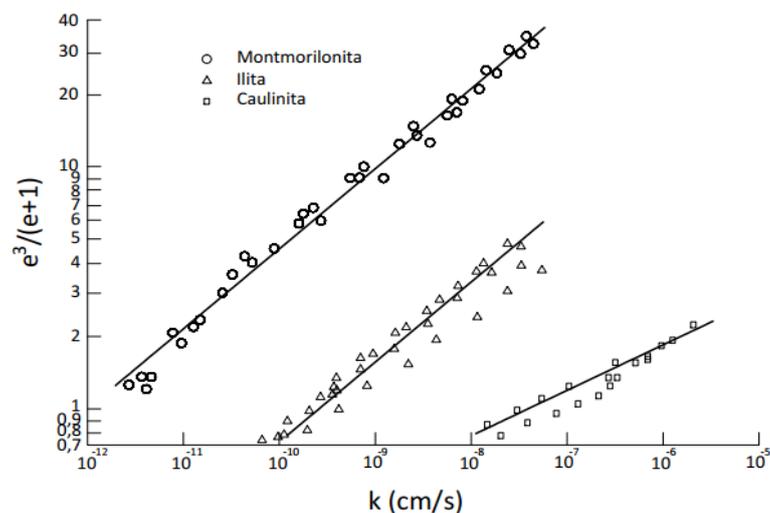
A estrutura típica da caulinita é formada por repetição de camadas de lâminas de tetraedros e lâminas de octaedros, intercaladas. As camadas são mantidas unidas através de pontes de hidrogênio e possuem distância interplanar, ou espessura entre camadas, de 7,2 Å. A superfície específica de caulinita é, em média, 15 m<sup>2</sup>/g.

A illita é um argilomineral do tipo 2:1, isto é, possui duas lâminas de sílica ligadas a uma lâmina de gipsita por ions de potássio. A presença de ions de potássio impede a expansão das camadas na presença de água. A superfície específica é, em média, 80 m<sup>2</sup>/g.

A montmorilonita também é do tipo 2:1, porém o alumínio das lâminas octaédricas é substituído por magnésio ou ferro. Nesse tipo de argilomineral a água é atraída para os espaços entre as camadas, causando a expansão da sua estrutura. A superfície específica da montmorilonita é de, aproximadamente, 800 m<sup>2</sup>/g. A espessura entre camadas pode variar de acordo com a quantidade de água, na forma anidra essa espessura é de cerca de 10 Å, quando hidratado a distância pode chegar a 50 Å (DAS, 2007).

A influência da composição mineralógica na permeabilidade das argilas pode ser observada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Relação entre índice de vazios e coeficiente de permeabilidade para três tipos de argila.



Fonte: Modificado de Mesri e Olson, 1971.

As montmorilonitas apresentam os menores coeficientes de permeabilidade, seguido pelas ilitas e caulinitas, que são os argilominerais mais permeáveis.

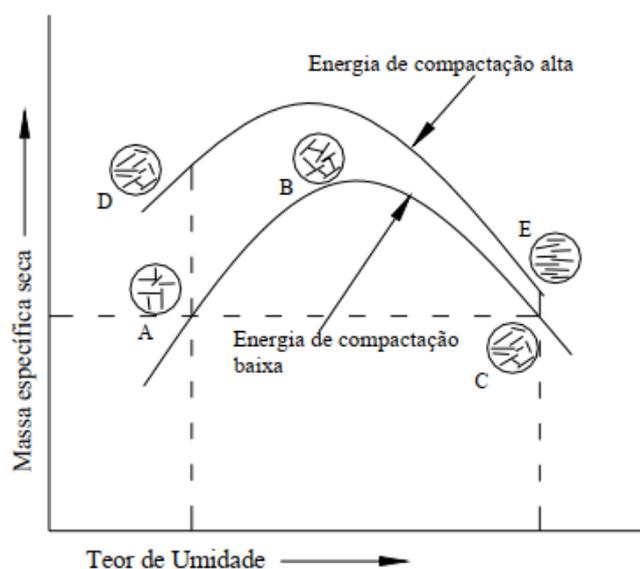
Para a identificação dos argilominerais são utilizados métodos de análise química, determinação da capacidade de troca catiônica, análise térmica diferencial, difração de raios X, microscopia eletrônica e espectroscopia no infravermelho. No entanto, a análise por difração de raios X é o método mais utilizado para a identificação dos argilominerais (SANTOS, 1989).

A análise de difração de raio X fornece dois parâmetros: a distância entre os planos de átomos, ou distância interplanar basal, e a intensidade das reflexões dos raios X. Através da determinação desses parâmetros é possível identificar os argilominerais de uma amostra. Geralmente a análise através de difração de raios X é qualitativa e pouco quantitativa (RESENDE et al, 2005).

### 2.5.2 Estrutura das partículas

A literatura mostra que solos compactados com umidades abaixo da ótima apresentam a estrutura floculada com maior coeficiente de permeabilidade que aqueles compactados no ramo úmido, onde há uma tendência ao paralelismo das partículas (MITCHELL et al, 1965; LAMBE e WHITMAN,1969). Esse comportamento pode ser observado no Gráfico 4.

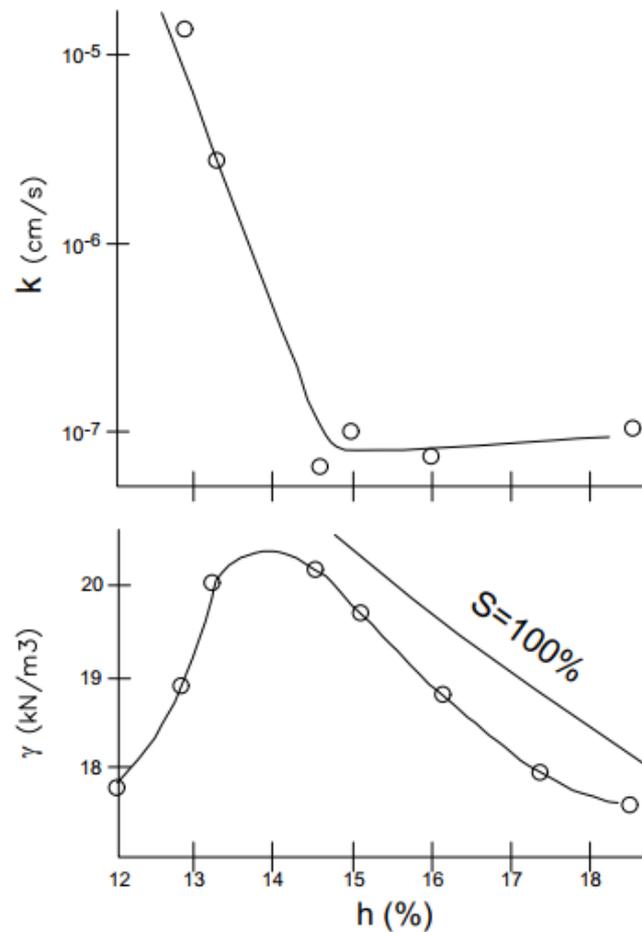
Gráfico 4 - Influência da umidade de compactação na estrutura do solo.



Fonte: Modificado de Lambe e Whitman (1969)

Os solos finos compactados no ramo seco apresentam maior permeabilidade que aqueles compactados próximo à umidade ótima ou no ramo úmido da curva de compactação. Esse comportamento pode ser observado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Variação da permeabilidade com a umidade de compactação.

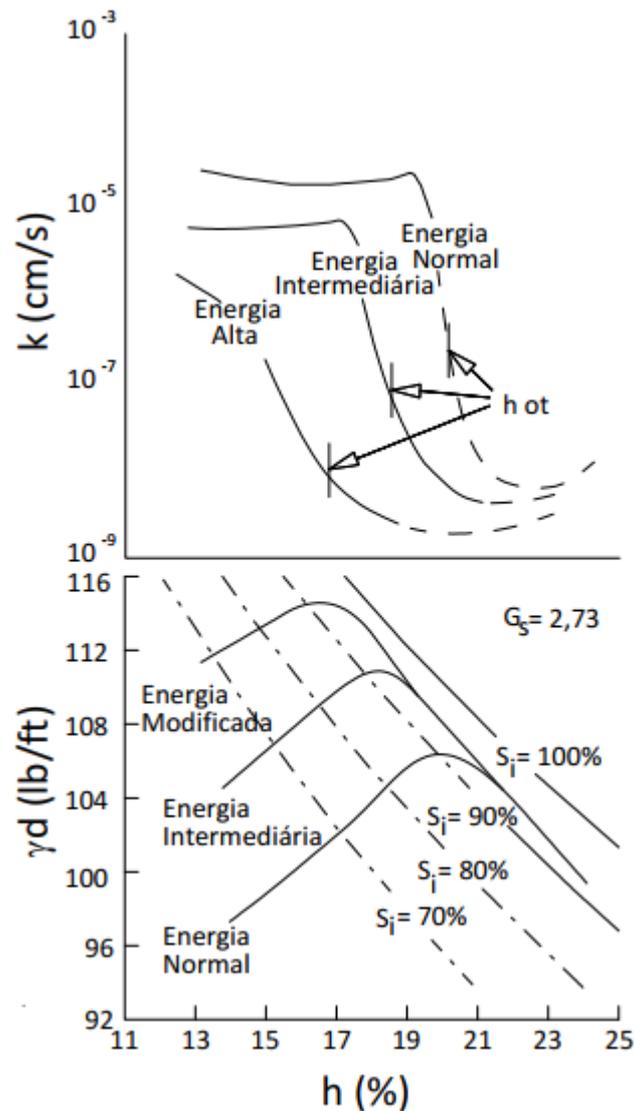


Fonte: Modificado de Lambe e Whitman (1969)

A permeabilidade também diminui com o aumento da energia de compactação, uma vez que há diminuição no índice de vazios. Esse comportamento, também, pode ser observado na pesquisa de Mitchell et al. (1965), que realizaram ensaios de permeabilidade com corpos de provas moldados com diferentes umidades de compactação. Os resultados estão apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade e energia de

compactação.



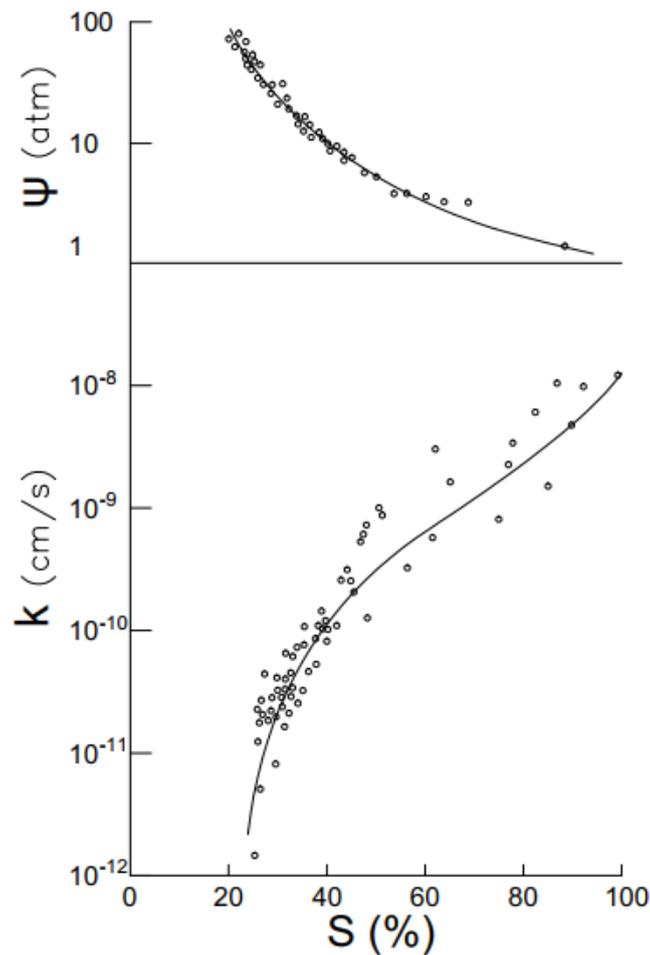
Fonte: Modificado de Mitchell et al. (1965).

Os corpos de prova compactados no ramo seco apresentaram coeficiente de permeabilidade maior que aqueles compactados no ramo úmido numa ordem de grandeza de mais de 1000 vezes. O aumento da energia de compactação de Proctor normal para modificada diminuiu o coeficiente de permeabilidade em mais de 10 vezes quando os corpos de prova foram compactados na umidade ótima.

### 2.5.3 Grau de saturação

A condutividade hidráulica aumenta com o grau de saturação. Quando o solo se encontra no estado não saturado, as bolhas oclusas de ar no interior do solo dificulta a passagem de água, como pode ser observado nos estudos de Olson e Daniel (1981) apresentados no Gráfico 7.

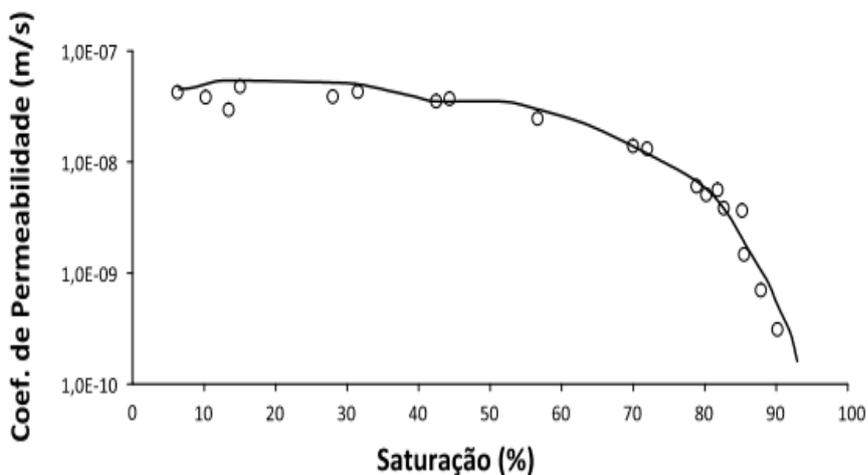
Gráfico 7 - Efeito do grau de saturação na condutividade hidráulica de uma argila compactada.



Fonte: Modificado de Olson e Daniel (1981)

Os fatores que influenciam a permeabilidade ao gás são os mesmos que os da permeabilidade à água, porém, diferentemente desta última, a permeabilidade ao gás decresce com o grau de saturação. Este comportamento pode ser observado nos ensaios de permeabilidade ao ar de uma amostra de solo (SC) utilizada na cobertura de um aterro em Oinda-Pe (JUCÁ e MACIEL, 1999). Os pesquisadores realizaram ensaios de permeabilidade variando o grau de saturação da amostra. Os resultados podem ser observados no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Influência da saturação no coeficiente de permeabilidade ao ar.



Fonte: Jucá e Maciel (1999).

Os resultados mostraram que a permeabilidade diminuiu, mais significativamente, a partir de 85 % de saturação. Os coeficientes variaram entre valores da ordem de  $10^{-8}$  e  $10^{-10}$  m/s para 5 % e 90 % de grau de saturação, respectivamente. Os pesquisadores realizaram, ainda, ensaios de campo com uma placa de fluxo de gás. A liberação de gás na atmosfera foi cerca de 85 l/dia/m<sup>2</sup>.

Portanto, os estudos de permeabilidade devem considerar o estado não saturado das camadas de impermeabilização. O ensaio de papel filtro é o método mais utilizado na obtenção das curvas de retenção dos solos, devido sua simplicidade e baixo custo. Como resultado tem-se o gráfico que relaciona a sucção com a umidade volumétrica do solo. Através das curvas de retenção é possível obter a relação entre permeabilidade e umidade volumétrica, com base em métodos descritos na literatura.

## 2.6 Ressecamento dos solos argilosos compactados

No semiárido brasileiro as chuvas são irregulares e as maiores precipitações acontecem durante 3 meses do ano. Longos períodos de estiagem podem comprometer a eficiência da camada de impermeabilização.

A exposição dos sistemas de cobertura às variações climáticas leva a variação de umidade do solo acarretadas pelas entradas e saída de água do sistema, decorrentes das precipitações e evapotranspiração. O principal mecanismo de alteração volumétrica de uma argila é a mudança no teor de umidade. O decréscimo do teor de umidade de uma massa de solo

pode resultar no surgimento de trincas, que ocorrem quando as forças de sucção superam a resistência à tração do solo (BERNUCCI, 1987).

. O surgimento de trincas em argilas é influenciado por diversos fatores, entre eles: composição mineralógica, fração de argila no solo, variação da sucção, umidade relativa de ar, temperatura e espessura das camadas (COSTA, 2015).

Estudos indicam que as argilas compactadas apresentam formação de trincas para contrações volumétricas iguais ou superiores a 4% (KLEPPE e OLSON, 1985; TAY et al, 2000).

A formação de trincas na camada de impermeabilização pode aumentar a permeabilidade em 1000 vezes, como pode ser observado nos estudos de Boynton e Daniel (1985).

## **2.7 Requisitos para camada de impermeabilização**

A NBR 15849 (ABNT, 2010), que discorre sobre os critérios de projeto, execução e implantação de aterros, recomenda o coeficiente de permeabilidade saturada máximo de  $10^{-8}$  m/s para camada de impermeabilização, mas não especifica os tipos de solo que podem ser utilizados nem os cuidados com a execução da camada.

Como requisitos mínimos na aceitação de materiais, a presente pesquisa utilizou as recomendações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993) e da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA, 2004) para construção de aterros sanitários.

As camadas de impermeabilização, normalmente, são constituída de solo argiloso compactado. De acordo com CETESB (1993), o solo utilizado em camadas impermeabilizantes pode ser classificado como argila de alta ou baixa plasticidade, siltes argilosos e solos orgânicos. Também considera a porcentagem de finos, limite de liquidez, índice de plasticidade, PH e o coeficiente de permeabilidade.

Segundo a USEPA (2004), a impermeabilização pode ser feita com solos naturais com elevado teor de argila ou solos misturados com bentonita. As recomendações são quanto ao teor de finos, índice de plasticidade, coeficiente de permeabilidade saturada e porcentagem de pedregulho. Os requisitos mínimos que os materiais devem atender estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos para camada de impermeabilização.

<b>REQUISITO</b>	<b>CETESB</b>	<b>USEPA</b>
Classificação segundo o SUCS	CL, CH, SC e OH	-
Material passante na peneira #200 (0,075mm)	≥ 30%	≥ 30%
Material retido na peneira #4 (4,76mm)	-	≤ 20%
Limite de Liquidez	≥ 30%	-
Índice de Plasticidade	≥ 15%	≥ 7%
Coefficiente de Permeabilidade	≤ 10 <sup>-9</sup> m/s	≤ 10 <sup>-9</sup> m/s
pH	≥ 7	-

Fonte: CETESB (1993); USEPA (2004)

Os valores apresentados são requisitos para a escolha do material adequado para a construção da camada de impermeabilização, porém os materiais devem ser analisados quanto ao desempenho.

Segundo O’Kane et al (2002), a elaboração de um projeto de cobertura devem seguir uma sequência básica de etapas, que são: definição dos objetivo da cobertura, escolha e caracterização dos prováveis materiais a serem utilizados na execução, obtenção de parâmetros climáticos locais, classificação do tipo de resíduo a ser confinado, modelagem numérica, modelo experimental e metodologia de monitoramento da cobertura.

Para camada impermeabilizante, o conhecimento do comportamento dos materiais diante dos ciclos de umedecimento e secagem, expansão, contração volumétrica e potencial de trincagem é imprescindível para tomada de decisão na etapa de projeto. Há, ainda, além da necessidade de estimar o fluxo de água para o interior do aterro com os dados climáticos locais (XUE *et al.*, 2014).

Quanto à execução, é necessário a realização de ensaios de compactação e permeabilidade, para a energia normal, intermediária e modificada, para a determinação de uma zona de aceitabilidade no gráfico de compactação. O controle da execução deve considerar a umidade de compactação e o peso específico seco máximo da camada compactada (DANIEL e BENSON, 1990)

Para climas semiáridos, Daniel e Wu (1993) recomendam umidade de compactação abaixo da ótima, solos com o máximo teor de areia para a permeabilidade de 10<sup>-9</sup> m/s e a construção de uma camada de proteção para evitar a formação de trincas.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada na pesquisa consistiu na avaliação do desempenho de materiais argilosos compactados como camadas de impermeabilização em sistemas de cobertura secas de aterros de resíduos sólidos.

Foram selecionadas duas amostras de solos argilosos para realização de ensaios de laboratório. A primeira amostra foi coletada no município de Cascavel, a segunda, no município de Itapajé, ambos no estado do Ceará.

As amostras foram transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará, onde passaram por processos de destorroamento, homogeneização e quarteamento para obtenção de amostras mais representativas. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos e identificadas como AM-ITA para amostra de Itapajé e AM-CAS para a de Cascavel.

Os ensaios foram divididos em ensaios geotécnicos, mineralógicos e modelos experimentais.

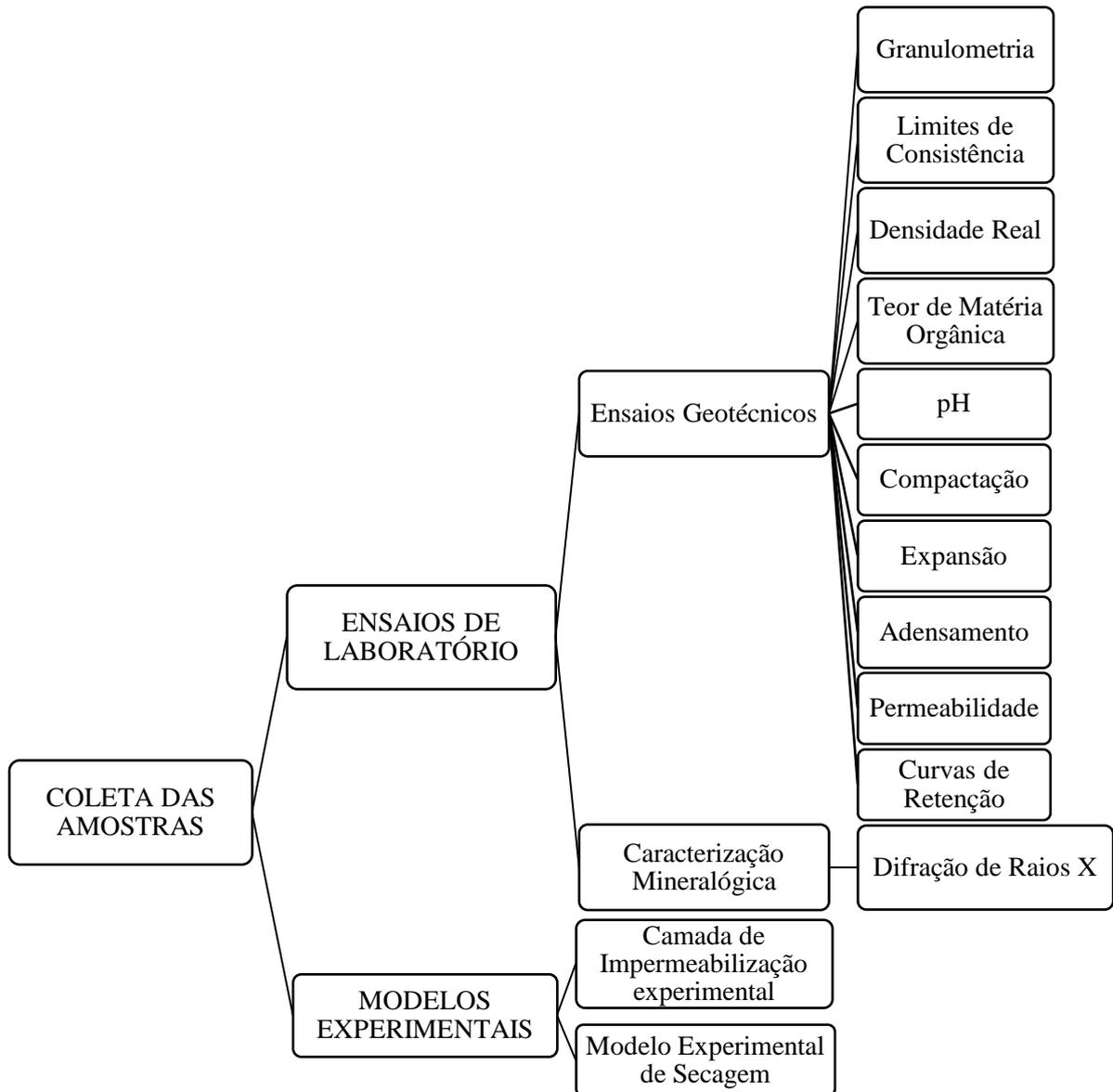
Foram realizados ensaios de granulometria, limites de consistência, densidade real, teor de matéria orgânica, compactação, expansão, adensamento, permeabilidade e curva de retenção para avaliar o comportamento geotécnico das amostras.

Para a caracterização mineralógica foram realizados ensaios de difração de Raios X (DRX).

Para avaliar o desempenho de uma camada de impermeabilização, foi escolhida uma das amostras para a construção de uma camada experimental com o objetivo de observar o comportamento hidráulico do solo compactado diante de secagem, além do potencial de formação de trincas.

Um modelo experimental de secagem para avaliar a relação da sucção com contração volumétrica, também, foi adicionado à pesquisa. Os ensaios realizados na pesquisa estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Sequência dos ensaios utilizados na pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios foram realizados na Universidade Federal do Ceará. Os ensaios geotécnicos e o modelo experimental foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP).

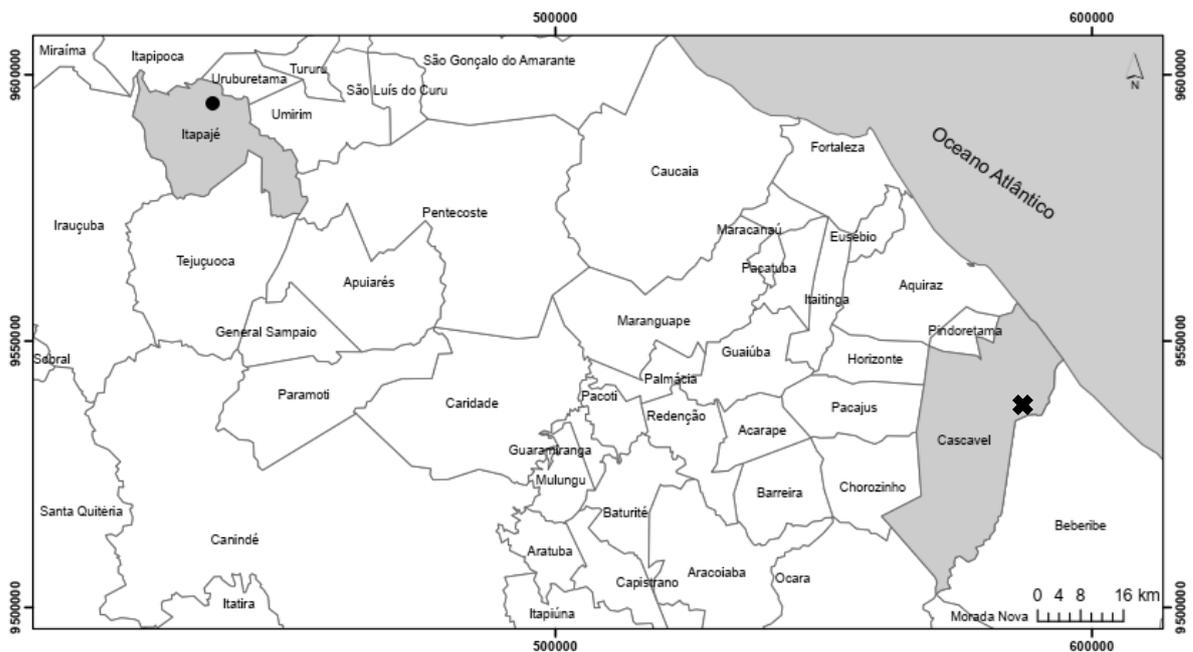
Para a caracterização mineralógica foram realizadas análises de difração de Raios X e imagens aumentadas através de microscópio eletrônico. A difração foi realizada no Laboratório de Raios X no departamento de Física.

As imagens aumentadas foram obtidas através do microscópio óptico do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia Metalúrgica.

### 3.1 Materiais

Foram retiradas duas amostras de solo argiloso com, aproximadamente, 60 kg para a realização dos ensaios. A primeira amostra foi retirada no município de Cascavel, localizada na margem do rio Choró, a segunda foi coletada do município de Itapajé, nas proximidades da barragem Ipuzinho. Na Figura 4 está apresentado o mapa de localização das amostras.

Figura 4 - Mapa de localização das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 2 estão apresentadas as coordenadas geográficas dos locais de retirada das amostras.

Tabela 2 - Coordenadas dos locais de retirada das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Município</b>	<b>Coordenadas</b>
AM-ITA	Itapajé	3°40'04.2"S 39°34'30.4"W
AM-CAS	Cascavel	4°11'06.7"S 38°12'51.9"W

Fonte: Elaborado pelo autor.

A umidade natural das amostras foi determinada através da NBR 6457 (ABNT, 1986). O teor de matéria orgânica foi determinado através de queima a 440 °C seguindo o procedimento da NBR 13600 (ABNT, 1996).

As amostras foram previamente secas ao ar, homogeneizadas, destorroadas e preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

Para a realização dos ensaios de índice de contração, compactação, expansão, permeabilidade, sucção e modelos experimentais, as amostras foram umedecidas com o auxílio de uma pisseta e acondicionadas em sacos plásticos por um período mínimo de 24 horas, com o objetivo de melhorar a homogeneização da umidade nos materiais.

### 3.2 Ensaios geotécnicos

Os ensaios geotécnicos foram realizados seguindo as recomendações das normas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Normas utilizadas nos ensaios de caracterização geotécnica.

Ensaio	Norma	Ano
Teor de matéria orgânica	NBR 13600	1996
Preparação das amostras	NBR 6457	2016
Granulometria por peneiramento e sedimentação	NBR 7181	2016
Limite de plasticidade	NBR 7180	2016
Limite de liquidez	NBR 6459	2016
Limite de contração	ASTM D4943	2018
Densidade real dos grãos	DNER-ME 93	1994
Compactação	NBR 7182	2016
Expansão	ASTM D4829	2011
Permeabilidade	NBR 14545	2000
Curva de retenção	ASTM D 5298	2016

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os índices de vazios e as porosidades foram obtidos a partir das relações entre os índices físicos.

Através dos resultados obtidos nos ensaios foi possível a classificação das amostras segundo o sistema de classificação unificado (SUCS).

#### 3.2.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado através de peneiramento e sedimentação, com o objetivo determinar a curva de distribuição granulométrica de cada amostra. A norma utilizada foi a NBR 7181 (ABNT, 2016).

Para o ensaio de sedimentação, as amostras foram imersas em hexametáfosfato de sódio como defloculante por um período de 48 horas.

Através da curva foi possível determinar a porcentagem de partículas do tamanho de areia, silte e argila. Foi utilizado o sistema de classificação para o tamanho das partículas adotado pela NBR 13441 (ABNT, 1995).

### **3.2.2 Limites de consistência**

Os índices de consistência foram determinados com o intuito de conhecer o comportamento argiloso das amostras.

Através dos ensaios foi possível determinar a umidade correspondente ao limite de liquidez, limite de plasticidade, limite de contração e índice de plasticidade.

A atividade dos solos foi determinada através do Índice de Atividade (A) de Skempton (1953), que indica a influência da composição mineralógica da fração argila nas propriedades dos solos finos, além de identificar o potencial de expansibilidade.

O limite de contração foi determinado pelo ensaio descrito na norma D4943 (ASTM, 2018). Foram moldados 6 corpos de prova para cada amostra. As dimensões dos recipientes utilizados foram de 50 mm de diâmetro e 8 mm de altura. A umidade utilizada foi obtida através das curvas de fluidez do ensaio de limite de liquidez e correspondente a 10 golpes.

Os corpos de prova ficaram secando em uma caixa térmica por um período de 07 dias, com o objetivo de desacelerar a taxa de perda de umidade e evitar trincas no solo. As amostras não sofreram variações de temperatura maiores que 3%. Após o tempo de secagem em temperatura constante, as amostras foram levadas para estufa com temperatura de 110 °C por 24 horas. Os corpos de prova secos foram revestidos com parafinas, suas massas submersas foram determinadas e os volumes finais foram determinados através da massa de água deslocada.

### **3.2.3 Densidade real**

O peso específico dos sólidos foi determinado pelo método do picnômetro, de acordo com a norma DNER ME 93 (DNER, 1994).

A classificação dos solos estudados foi realizada de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) com os procedimentos descritos na D2487 (ASTM, 2017). Para a classificação foram utilizadas as informações obtidas nos ensaios de granulometria, limites de consistência e teor de matéria orgânica dos solos.

#### **3.2.4 pH**

Para a determinação do pH das amostras foi utilizado a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997).

Foram pesadas 15 g dos solos destorroados sem nenhuma preparação prévia e adicionados 25 ml de água destilada e as soluções foram deixadas em repouso por 1 hora. Posteriormente, os valores de pH foram determinados através de um potenciômetro com eletrodo combinado.

#### **3.2.5 Ensaio de compactação**

Os ensaios de compactação foram realizados para determinar o peso específico seco máximo e a umidade ótima de compactação para a energia normal. Através dos resultados dos ensaios de compactação foi possível a elaboração das curvas de compactação para as amostras e as respectivas curvas de saturação.

Os ensaios seguiram as orientações da norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Os corpos de provas foram moldados no cilindro pequeno, uma vez que o material retido na peneira de abertura de 4,8 mm é inferior a 7%. Foi utilizada a energia de compactação Proctor normal e os ensaios foram realizados sem reuso de material.

A peso específico aparente, a saturação, o índice de vazios e a porosidade foram determinadas para os corpos de prova compactados na umidade ótima e com a energia Proctor normal.

#### **3.2.6 Ensaio de expansão livre**

Para analisar o potencial expansivo das amostras, foram realizados ensaios de expansão livre. Os ensaios seguiram as recomendações da norma D4829 (ASTM, 2011).

Os ensaios foram executados na prensa de adensamento e consistem na moldagem de corpos de prova compactados com a umidade correspondente a 50 % da saturação, com variação máxima de 2 % na umidade gravimetria.

Os corpos de provas, com diâmetro de 11,3 cm e 2,5 cm de altura, foram submetidos a uma carga de 2 kPa por 15 minutos com a célula de adensamento seca. Em seguida os corpos de provas foram inundados e a expansão foi monitorada por 24 horas.

Através dos dados obtidos nos ensaios foram confeccionados gráficos da expansão em função do tempo, onde foi possível analisar os potenciais expansivos das amostras.

### **3.2.7 Ensaios edométricos**

Para avaliar o comportamento da camada de impermeabilização ao adensamento provocado por camadas de solo sobrejacentes, foram realizados ensaios de adensamento.

Os ensaios edométricos foram realizados após os ensaios de expansão livre, de modo continuado. O adensamento foi feito por incrementos de cargas, que foram aplicadas em estágios de 24 horas e seguiram as recomendações da norma D4186 (ASTM, 2012).

### **3.2.8 Ensaios de permeabilidade**

Os coeficientes de permeabilidade para as amostras saturadas, na temperatura de 20°C, foram determinados através do Método B do ensaio de permeabilidade de solos argilosos com carga variável de acordo com 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.

As amostras foram submetidas a um fluxo de água ascendente por um período de 48 horas, com o objetivo de saturar o corpo de prova. O gradiente hidráulico utilizado foi de 70, com o objetivo de diminuir o tempo de ensaio.

Posteriormente, foi aplicado fluxo descendente com a mesmo gradiente hidráulico durante o período necessário para que o coeficiente de permeabilidade apresentassem resultados da mesma ordem de valores.

### 3.2.9 *Curvas de retenção*

Os pontos experimentais para a curva de retenção das amostras foram obtidos através do ensaio de papel filtro, seguindo as orientações da norma D5298 (ASTM, 2016). Apenas as sucções matriciais foram determinadas.

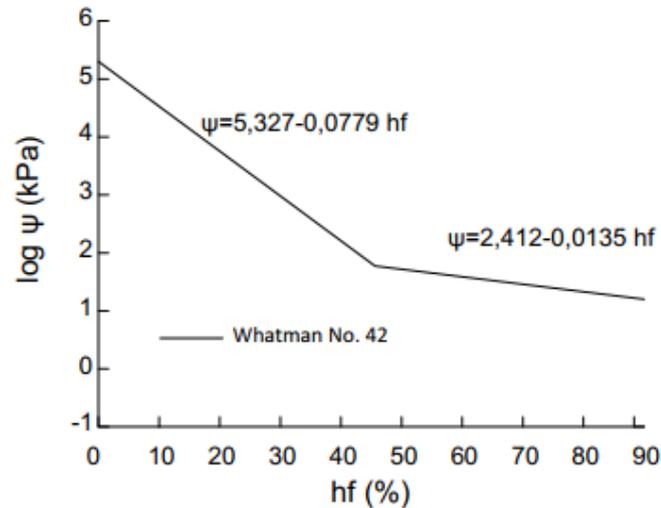
Foram moldados 25 corpos de prova em anéis cilíndricos com diâmetro de 5,0 cm e altura de 2,0 cm. As amostras foram compactadas em duas camadas com o teor da umidade ótima. As densidades foram analisadas e comparadas com a densidade máxima obtida no ensaio de compactação, determinando o grau de compactação de cada amostra. Foram admitidas as amostras que apresentaram variação de até 3% no grau de compactação.

Os corpos de prova foram secos ao ar até a umidade desejada. Após esse período, as amostras foram colocadas em contato com dois discos de papel filtro Whatman N° 42, de forma que um dos papéis não estivesse em contato direto com o solo. Os corpos de prova foram envoltos em plástico filme e papel alumínio. Foram armazenados em uma caixa de isopor por um período de 10 dias para equalização das umidades entre as amostras e os papéis.

Passado o período de equalização, os papéis filtro foram transferidos para cápsulas enumeradas de massa conhecida e o conjunto foi pesado em uma balança com precisão de quatro casas decimais. Esta operação foi realizada com o cuidado de não expor os papéis ao ar por um período maior que 5 segundos. Depois de pesadas, as cápsulas foram levadas à estufa à 100 °C por um período de 2 horas, posteriormente foram tampadas e mantidas na estufa por mais 15 minutos para permitir o equilíbrio da temperatura dentro da cápsula.

Para a determinação das sucções foram utilizadas as umidades dos papéis filtros nas equações sugeridas pela norma D5298 (ASTM, 2016), que podem ser observadas no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Equações para a determinação da sucção através da umidade do papel filtro.



Fonte: Norma D5298 (ASTM, 2016).

Os ajustes das curvas de retenção foram realizados através do modelo proposto por Van Genuchten (1980) apresentado na Equação 1.

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m \quad (1)$$

Onde  $a$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros de ajuste da curva,  $\Psi$  é a sucção e  $\Theta$  é saturação normalizada do solo, apresentada na Equação 2.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

Onde  $\theta$  é a umidade volumétrica do corpo de prova,  $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual e  $\theta_s$  é a umidade volumétrica de saturação.

As condutividades hidráulica não saturada foram determinadas de acordo com a equação proposta pelo modelo Mualem (1976) e está apresentado na Equação 3.

$$K(\Psi) = \frac{\{1 - (\alpha\Psi)^{n-1} [1 + (\alpha\Psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

Os parâmetros de ajuste das curvas de sucção, umidades residuais e as condutividades hidráulicas não saturadas foram obtidas com o auxílio do software RETC da

Scientific Software Group (VAN GENUCHTEN, 1991). Os valores de sucção de entrada de ar através do método proposto por Fredlund e Xing (1994).

A partir dos parâmetros de ajuste, umidades de saturação e umidades residuais, foi possível a determinação das pressões de sucção nos modelos experimentais.

### **3.3 Ensaio de caracterização mineralógica**

A caracterização mineralógica foi realizada com o intuito de conhecer os argilominerais presentes nas amostras.

#### **3.3.1 Difração de Raio X**

A caracterização foi feita a partir da difração de raios-x (DRX) realizada em no difratômetro de modelo Xpert Pro MPD da empresa Panalytical. As difrações foram realizadas no Laboratório de Raios X do departamento de Física.

A metodologia utilizada para a identificação dos argilominerais foi proposta por Santos (1989) com as modificações propostas por Albers *et al.* (2002).

Foram realizadas 5 difratometrias com preparações distintas para cada amostra. A primeira etapa de análise foi realizada através do método do pó, onde as partículas são dispostas aleatoriamente no amostrador do difratômetro. A seleção da fração argilosa foi feita através de peneiramento e sedimentação.

A segunda etapa foi realizada através da orientação das partículas em lâminas de vidro, com posterior secagem, hidratação com etilenoglicol e queima à 440 °C.

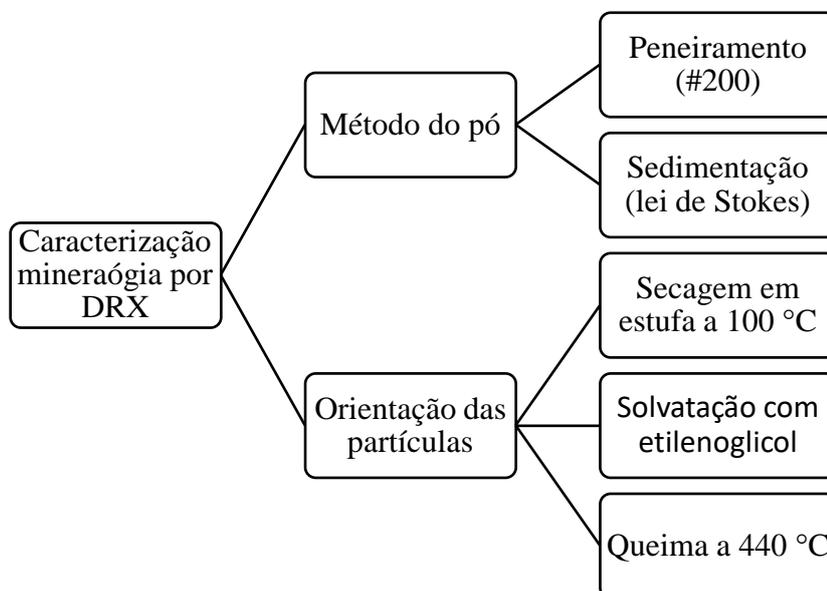
As partículas foram selecionadas por sedimentação e uma solução de 60 mg de argila para 1 cm<sup>3</sup> de água destilada foi preparada. Foram retirados 3 ml da solução com o auxílio de uma pipeta e depositado cuidadosamente em uma lâmina de vidro. O objetivo desse procedimento é a intensificação dos picos no difratograma. As lâminas foram secas em estufa com 100 °C por 2 horas e levadas para o difratômetro.

Para avaliar a presença de argilominerais expansivos, as lâminas foram expostas ao vapor de etilenoglicol por 5 horas e a difratometria foi repetida para que se observasse a ocorrência de expansão basal, típico de solos de estrutura montmorilonítica.

Por fim, as lâminas foram levadas para uma mufla onde ficaram por 2 horas com 440 °C de temperatura e mais uma difratometria foi realizada com o intuito de analisar o

comportamento da amostra após a queima. Após esse procedimento a distância interplanar de argilominerais expansivos diminuem e os picos característicos de argilominerais do tipo 1:1 desaparecem. Na Figura 5 está apresentado o resumo da metodologia utilizada na pesquisa.

Figura 5 - Metodologia para identificação dos argilominerais por DRX.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do tratamento de dados foi possível elaborar os difratogramas com as distâncias basais detectadas no ensaio. A identificação dos argilominerais foi realizada através da comparação com as distâncias basais dos principais argilominerais encontrados no Brasil (SANTOS, 1989; ALBERS et al, 2002; RESENDE et al. 2011).

Foi realizada uma análise semiquantitativa da fração argilosa baseada no método relatado por Gomes (1988), onde a área de cada pico principal do difratograma das amostras orientadas com tratamento em etilenoglicol é dividida pelos poderes reflectores apresentados na Tabela 4. Os quocientes são convertidos em porcentagem considerando a soma igual a 100%.

Tabela 4 - Poderes reflectores dos principais argilominerais

<b>Argilomineral</b>	<b>Poder reflector</b>
MONTMORILONITA	2
ILITA	0,5
CAULINITA	1

Fonte: Gomes (1988).

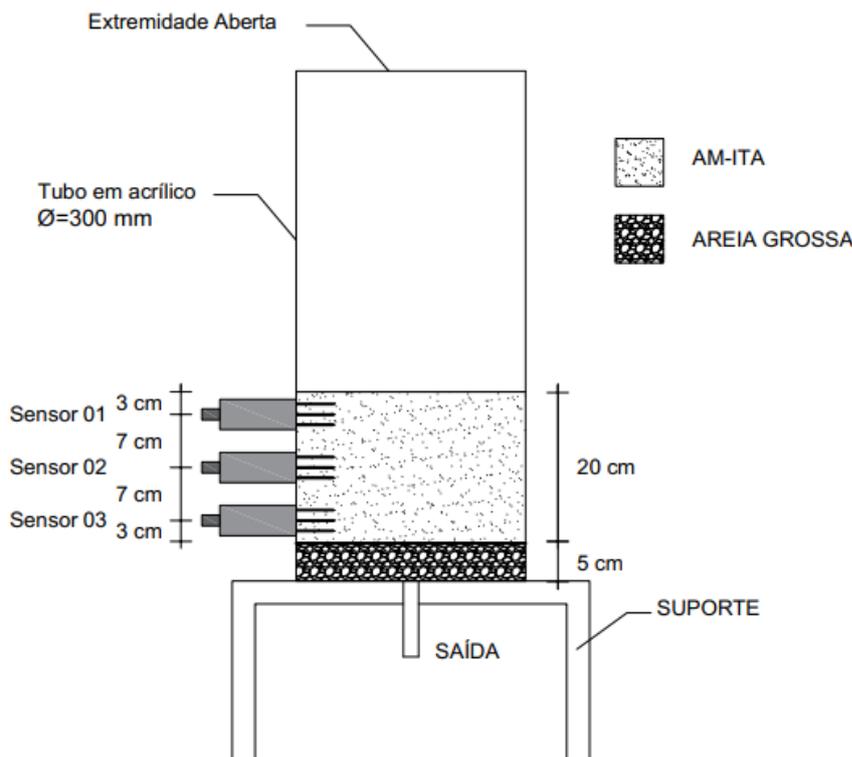
Para o cálculo dos espaçamentos interplanares foi utilizado o software X'pert HighScore Plus versão 3.0. Os argilominearais foram classificados segundo a classificação simplificada de Grim (1968).

### 3.4 Modelos experimentais

#### 3.4.1 Camada experimental de argila compactada

Para analisar o comportamento de uma camada de argila compactada sob processo de secagem quanto à formação de trincas, foi compactada uma camada com 20 cm de altura. A amostra selecionada foi a AM-ITA devido a sua maior permeabilidade. A amostra foi compactada em um lisímetro de acrílico com 30 cm de diâmetro e paredes de 5 mm. Foram instalados 3 sensores de umidade ao longo da profundidade da camada. O esquema do modelo experimental e os espaçamentos entre os sensores estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Esquema da camada de argila experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente foi aplicada uma carga hidráulica no modelo para simular o umedecimento da camada e posteriormente se observou as variações no teor de umidade da camada ao longo da profundidade durante processo de secagem da camada de solo. As variações do teor de umidade do solo ao longo do tempo foram monitoradas através de leituras obtidas pelos sensores de umidade.

A camada de solo compactado foi submetida a uma carga hidráulica de 40 cm de altura. A etapa de umedecimento foi 18 dias com o objetivo de observar a percolação no corpo de prova. A etapa de secagem durou 90 dias com o intuito de monitorar o processo de evaporação. Após esse período aplicou-se um fluxo de água no corpo de prova para a determinação de um coeficiente de permeabilidade final do solo trincado.

Para a compactação do solo dentro da coluna foi utilizado feita com auxílio de um soquete em concreto com peso de 10 kg e diâmetro de 20 cm. O número de golpes foi calculado para energia equivalente a Proctor normal considerando a altura de queda de 1,0 m. A compactação foi feita em duas camadas de 10 cm e o grau de compactação foi conferido.

Os sensores de umidade utilizados são do modelo ML3, da empresa Delta-T Devices e foram calibrados para o solo analisado de acordo com instruções do fabricante. Para a leitura das umidades foi utilizado o leitor digital HH2 da mesma empresa.

### **3.4.2 Calibração do sensor de umidade**

A calibração dos sensores foi feita de acordo com as instruções do fabricante e, apenas, para a AM-ITA. Foram moldados 6 corpos de prova com o teor de umidade ótima. As amostras foram secas ao ar e obtidas leituras em milivolts (mV) para teores de umidade diferentes.

Com os valores de diferença de potencial foram obtidos os valores de permissividade elétrica aparente através da Equação 3.

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,0 + 6,175V + 6,303V^2 - 73,578V^3 + 183,44V^4 - 184,78V^5 + 68,01V^6 \quad (3)$$

Onde V é a diferença de potencial em mV medida no sensor HH2.

Em seguida foi desenhado um gráfico que relaciona a permissividade elétrica aparente com umidade volumétrica através do modelo proposto por Whalley (1993) em que a relação se dá através da equação de uma reta, como mostrada na Equação 3.

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1\theta \quad (3)$$

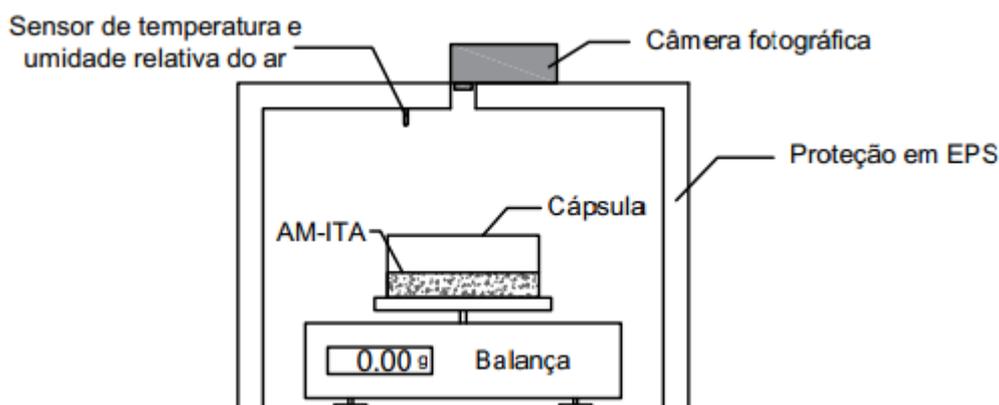
Onde  $a_1$  é o coeficiente angular e  $a_0$ , o coeficiente linear

A configuração do leitor digital, HH2, foi alterada para os coeficientes obtidos no ensaio de calibração, para que os dados de saída fossem, diretamente, em porcentagem de umidade volumétrica.

### 3.4.3 Modelo experimental de secagem

O modelo experimental foi construído com o objetivo de relacionar a contração volumétrica com a sucção média do corpo de prova compactado. Para o modelo foi utilizada a AM-ITA. O esquema do modelo pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo experimental de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizou-se uma balança protegida, no fundo e nas laterais, por uma estrutura de isopor para minimizar a ação do vento nas leituras da balança. O corpo de prova foi moldado com altura de 2 cm numa cápsula metálica com 12 cm de diâmetro. A amostra foi submetida as ações de temperatura e umidade relativa do ar, que, também, foram monitoradas.

Uma câmera fotográfica no topo da estrutura de proteção foi instalada e programada para que fotos fossem tiradas a cada 1 minuto. O objetivo da câmera é determinar a contração e a umidade do corpo de prova.

A áreas do corpo de prova foram determinadas com auxílio do software Autocad 2019, da Autodesk. As umidades foram determinadas através das medidas obtidas na balança.

Com os dados obtidos no ensaio foram construídos gráficos que relacionam o aumento da sucção média e o índice de contração com o tempo de secagem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo estão os resultados obtidos através dos ensaios de laboratório. Através dos resultados foi possível avaliar a adequabilidade das amostras para uso em camadas de impermeabilização de coberturas.

### 4.1 Ensaio geotécnicos

#### 4.1.1 Umidade natural, teor de matéria orgânica, densidade real dos grãos e pH

As amostras foram retiradas em estado úmido. Os teores de matéria orgânica podem ser considerados baixos e insuficiente para classificá-las como solos orgânicos (ASTM, 2017). A umidade natural e o teor de matéria orgânica das amostras podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Umidade natural e teor de matéria orgânica das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Umidade natural (%)</b>	<b>Matéria orgânica (%)</b>
AM-ITA	25,33%	6,21%
AM-CAS	21,01%	7,72%

Fonte: Elaborado pelo autor.

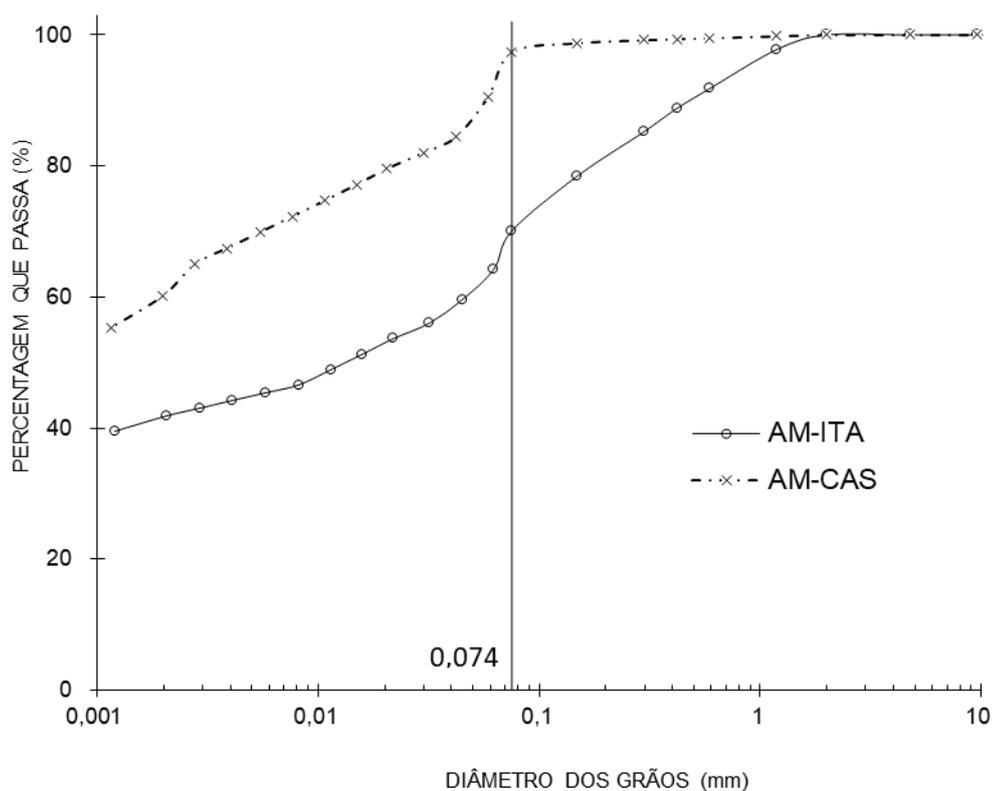
A média do peso específico real dos grãos foi de 2,72 para AM-ITA e 2,70 para AM-CAS. Os valores encontrados foram concordantes com os valores típicos de solos argilosos (DAS, 2008).

Os valores de pH das amostras foram de 6,61 e 7,01 para as amostras AM-ITA e AM-CAS, respectivamente. A CETESB (1993) recomenda pH igual ou superior a 7.

#### 4.1.2 Análise granulométrica

Através da análise granulométrica das amostras AM-ITA e AM-CAS foi possível observar que a maioria dos grãos que compõem as amostras possuem diâmetros menores que 0,074 mm, pois apresentaram 70% e 97% de finos, respectivamente. O Gráfico 10 apresenta as curvas granulométricas das amostras analisadas.

Gráfico 10 - Curvas granulométricas das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resumo da composição granulométrica das amostras pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição granulométrica das amostras.

<b>FAIXA GRANULOMÉTRICA</b>	<b>AM-ITA</b>	<b>AM-CAS</b>
Areia grossa (4,8 - 2,00 mm)	0 %	0 %
Areia média (2,00 - 0,42 mm)	11 %	1 %
Areia fina (0,42 - 0,074)	19 %	2 %
Silte (0,074 - 0,002 mm)	28 %	37 %
Argila (< 0,002 mm)	42 %	60 %

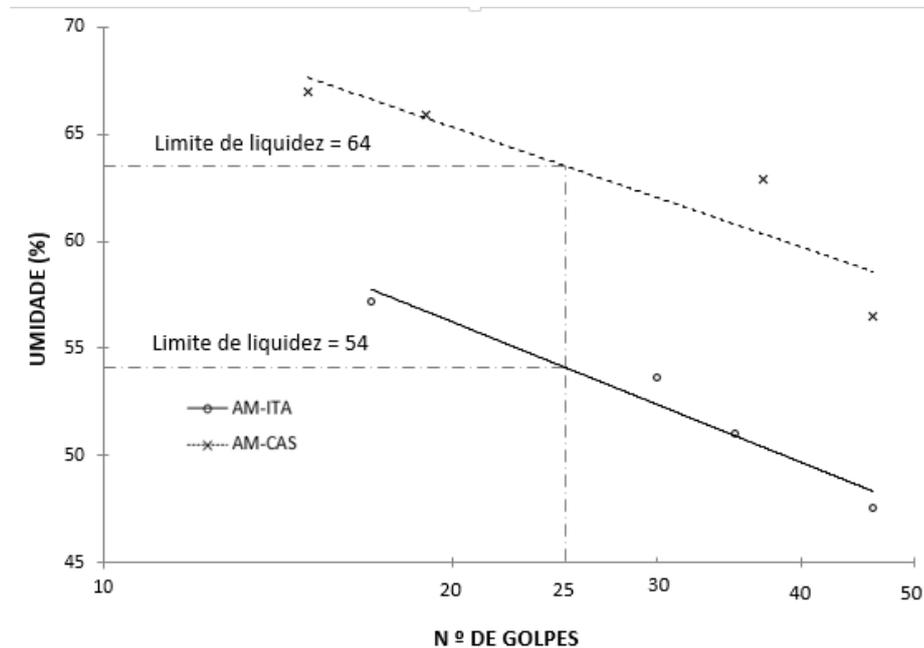
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria foi possível perceber que ambas as amostras apresentaram o teor de finos adequado de acordo com as normas americana e brasileira (CETESB, 1993; USEPA, 2004).

### 4.1.3 Limites de consistência

Através dos resultados obtidos nos ensaios de LL foram elaborados gráficos com as curvas de fluidez das amostras e podem ser observadas no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Curvas de fluidez das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O índice de atividade e os teores de umidade correspondente ao LL, LP, IP e LC estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Limites de consistência, índice de plasticidade e índice de atividade das amostras.

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	IA
AM-ITA	54	21	33	13,24	0,85
AM-CAS	64	24	39	11,23	0,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do Índice de Plasticidade (IP) as foram classificadas como de alta plasticidade na classificação de Burmister (1949, apud DAS, 2007).

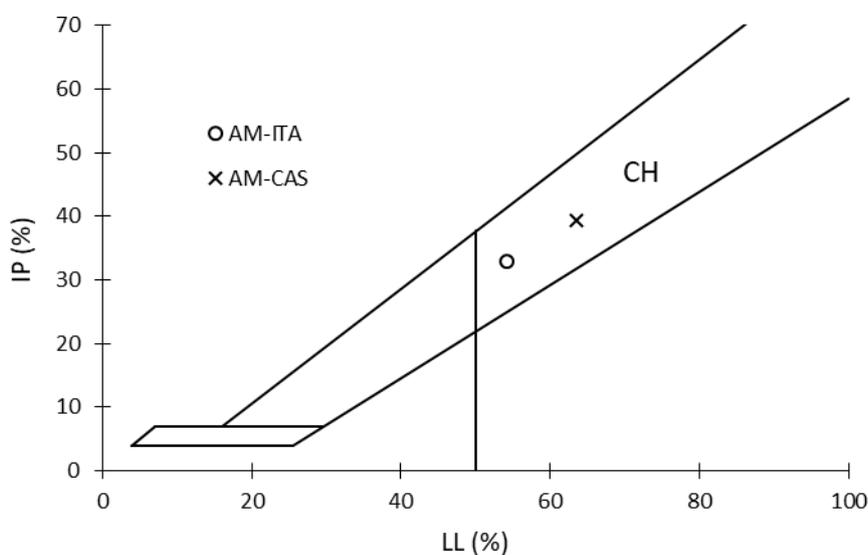
Os Limites de Contração foram próximos aos valores apresentados por Mitchell (1976) para solos com montmorilonita na composição, que variaram entre 9,5 e 15%.

Os valores dos limites de consistência atenderam aos requisitos da CETESB (1993) e USEPA (2004).

#### 4.1.4 Classificação pelo sistema de classificação unificada dos solos (SUCS)

Com os resultados obtidos nas análises granulométricas e nos limites de consistência, foi possível classificar as amostras de acordo com o sistema de classificação unificada (SUCS). Ambas as amostras foram classificadas com CH, ou seja, argilas de alta plasticidade. As amostras atendem ao requisito da CETESB (1993) para a classificação dos solos. Os pontos das amostras posicionados na carta de plasticidade podem ser observados no Gráfico 12.

Gráfico 12 - Posição das amostras na carta de plasticidade.



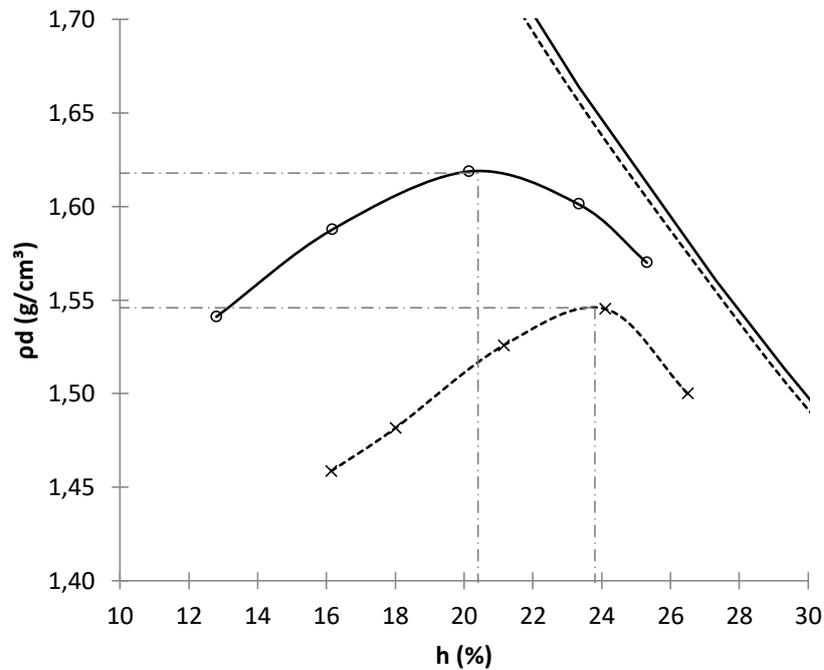
Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a denominação proposta pela ASTM D-2487 (ASTM, 2017), a amostra AM-ITA pode ser denominada de argila arenosa de alta compressibilidade e a AM-CAS de argila de alta compressibilidade.

#### 4.1.5 Ensaios de compactação

A partir dos ensaios de compactação com a energia Proctor Normal foram desenhadas as curvas de compactação e saturação, podendo ser observadas no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Curvas de compactação das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

As umidades ótimas das amostras, pesos específicos aparentes secos máximos, o índice de vazios, a porosidade e o grau de saturação das amostras compactadas estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.

PARÂMETROS	AM-ITA	AM-CAS
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,618	1,546
$h_{ót}$ (%)	20,4	23,8
$h_{sat}$ (%)	24,9	27,5
e	0,68	0,75
n (%)	40,5	42,7
S (%)	81,5	86,1

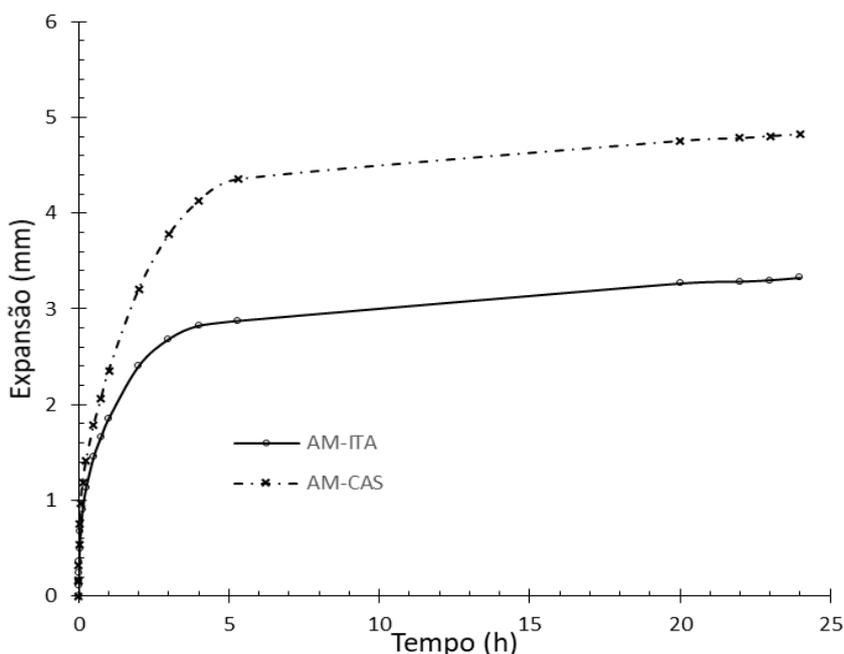
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que a amostra AM-CAS, que contém maior fração de argila, apresentou um maior teor de umidade ótima para um menor peso específico aparente seco máximo quando comparados aos resultados da amostra AM-ITA.

#### 4.1.6 Expansão livre

Os resultados dos ensaios de expansão livre mostraram o grande potencial de expansibilidade das duas amostras. Pode-se observar no Gráfico 14, que a AM-CAS apresentou maior expansão que a AM-ITA.

Gráfico 14 - Curvas de expansão das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

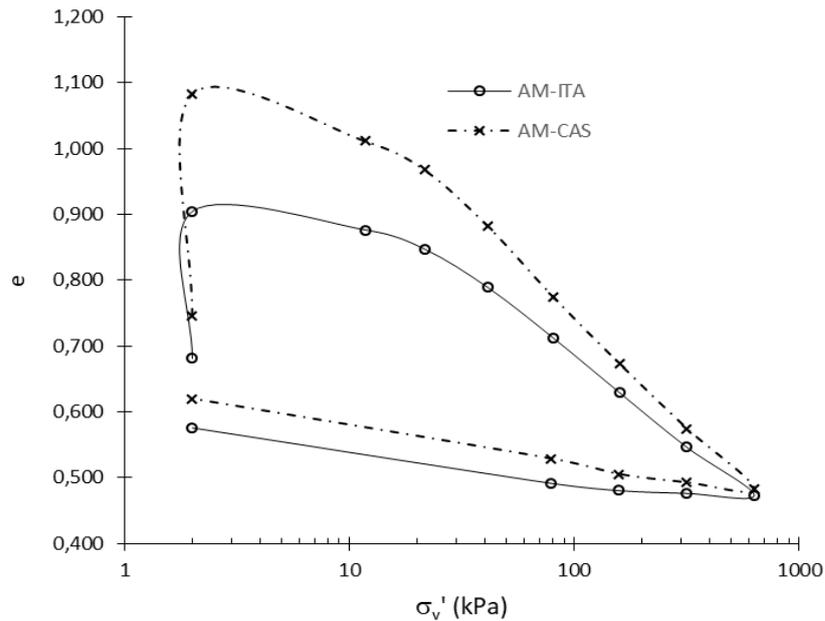
As amostras apresentaram expansões significativas, 13 % para AM-ITA e 19% para AM-CAS, em relação à altura inicial do corpo de prova. A expansibilidade é um indício da presença de argilominerais 2:1, sendo os mais expansivos, os montmoriloníticos.

O comportamento expansivo das amostras pode representar um risco ao desempenho da camada de impermeabilização, uma vez que solos expansivos são mais suscetíveis a retração volumétrica e ao surgimento de trincas (BERNUCCI, 1987).

#### 4.1.7 Ensaios edométrico

Através dos dados obtidos nos ensaios edométricos, foram construídos gráficos relacionando os índices de vazios com as pressões efetivas. As curvas de adensamento estão apresentadas no Gráfico 15.

Gráfico 15 - Curvas de adensamento das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das curvas de adensamento é possível perceber que foi necessário uma tensão superior a 100 kPa para que as amostras retornassem à suas alturas iniciais, indicando que a expansão de uma camada argilosa construída com esses materiais podem causar problemas nas camadas sobrejacentes.

Os Índices de Compressão ( $C_c$ ) foram determinados e os valores foram de 0,2820 e 0,3445 para as AM-ITA e AM-CAS, respectivamente.

#### 4.1.8 Permeabilidade

Os resultados dos ensaios de permeabilidade apresentaram coeficientes de permeabilidade adequados para o uso em camadas de impermeabilização (CETESB, 1993; USEPA, 2004; ABNT 2010).

Os coeficientes de permeabilidade adotados nesta pesquisa, foram a média aritmética dos resultados das cinco últimas leituras.

Para o cálculo dos índices de vazios foram considerados a saturação completa dos corpos de prova e o volume de vazios foi determinado pelo volume de água no corpo de prova. Na Tabela 9 estão apresentados os coeficientes de permeabilidade adotados e os índices de vazios calculados considerando a saturação total dos corpos de prova.

Tabela 9 - Resumo dos dados obtidos nos ensaios de permeabilidade.

AMOSTRA	k sat (cm/s)	e inicial(%)	e final(%)	$\Delta e$ (%)
AM-ITA	2,90E-07	0,685	0,742	+8,98%
AM-CAS	3,87E-08	0,753	0,795	+6,56%

Fonte: Elaborado pelo autor.

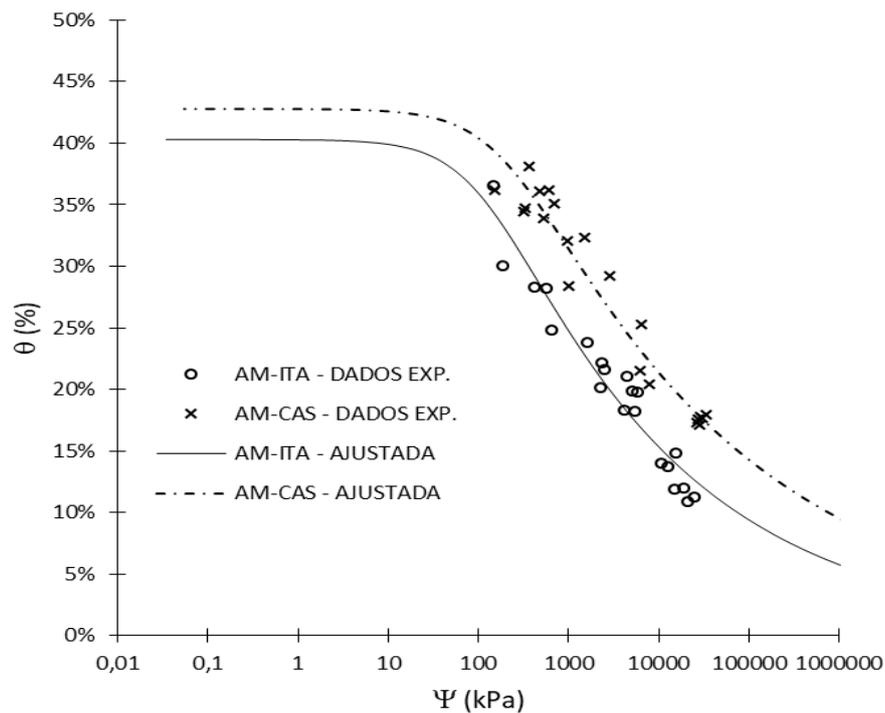
As amostras apresentaram expansão apesar do elevado gradiente hidráulico aplicado, e a AM-ITA apresentou uma expansão maior que a AM-CAS.

#### 4.1.9 Curva de retenção

Para a determinação das curvas de retenção foram obtidos 20 pontos experimentais para cada amostra, os dados de sucção e umidade volumétrica dos corpos de prova foram inseridos no RETC para obtenção dos parâmetros,  $\alpha$ , m e n, correspondentes ao melhor ajuste.

Os resultados dos ensaios estão apresentados no Gráfico 16, onde pode-se observar os pontos experimentais e as curvas de retenção ajustadas pelo modelo de Van Genuchten (1980).

Gráfico 16 - Curvas de retenção ajustadas e dados experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de retenção da amostra mais argilosa apresentou o mesmo formato que a AM-ITA, sendo que, deslocada para a direita e para cima. Os parâmetros obtidos nos ensaios de papel filtro então apresentados na Tabela 10.

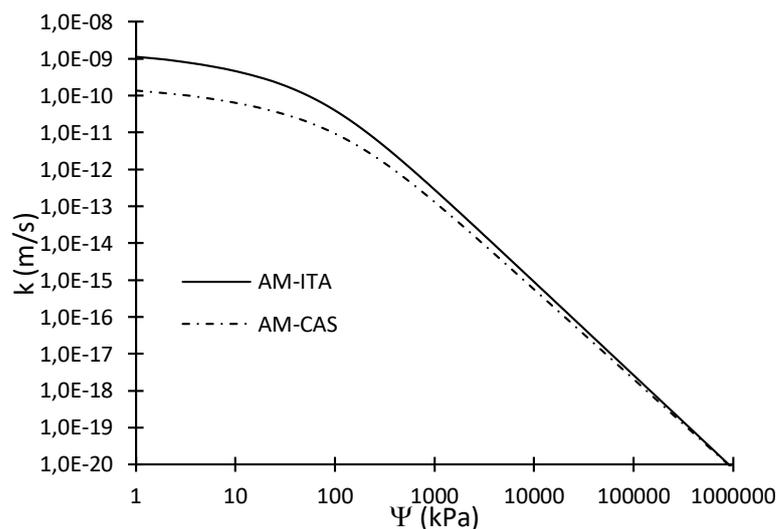
Tabela 10 - Valores de entrada de ar e umidade residual.

PARÂMETRO	AM-ITA	AM-CAS
$\Psi$ EA (kPa)	50	90
$\Psi$ RES (kPa)	$2,05 \times 10^6$	$1,66 \times 10^6$
$\theta_r$ (%)	5	8
$\alpha$	0,09156	0,05028
n	1,21296	1,17555
m	0,17557	0,14933

Fonte: Elaborado pelo autor.

A condutividade hidráulica no estado não saturado foi determinada através do modelo proposto por Mualem (1976). A partir das curvas de retenção foram desenhadas curvas relacionando a condutividade hidráulica com a sucção nas amostras, podendo ser observadas no Gráfico 17.

Gráfico 17 - Variação da condutividade hidráulica não saturada com a sucção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As condutividades hidráulicas diminuíram, mais significativamente, a partir da sucção de 100 kPa, que corresponde a uma umidade volumétrica de 36 % e 40 % para a AM-ITA e AM-CAS, respectivamente.

É importante notar que, para a umidade residual das amostras, a permeabilidade não saturada é inferior a  $10^{-20}$  m/s.

A diferença da condutividade hidráulica entre as duas amostras é maior para valores de sucção menores que 1000 kPa, com umidades volumétricas menores que 25% para AM-ITA e 35% para AM-CAS. Acima desses valores, os coeficientes de permeabilidade foram da mesma ordem de grandeza.

## 4.2 Caracterização mineralógica

Para a identificação dos argilominerais, as distâncias interplanares foram calculadas e comparadas com os valores da Tabela 11.

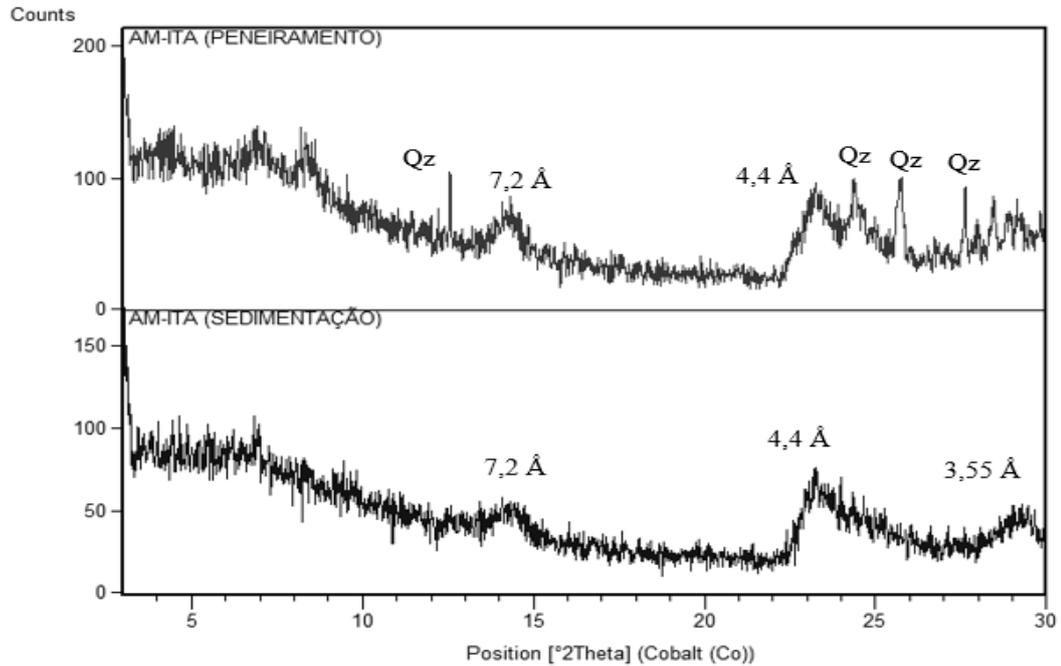
Tabela 11 - Distâncias interplanares dos principais argilominerais encontrados no Brasil.

Tipo de Camada	Argilomineral	Distancias Interplanares (Å)			
		Pico Principal			Picos Secundários
		Seco a 100 °C	Após a glicolagem	Queima a 440 °C	
1:1	Caulinita	7	7	-	4,4; 3,5
	Ilita	10	10	10	5,0; 4,5; 3,5
2:1	Vermiculita	14	14	10	4,5
	Montmorilonita	10	17	10	5,1; 3,5
Mista	Clorita	14	14	14	7,0; 4,7; 3,5
	Corita expansível	14	17	14	7,0; 4,7; 3,5

Fonte: Santos (1989); Albers et al (2002); Resende et al (2005)

A primeira etapa da investigação mineralógica apresentou resultados pouco conclusivos, com picos com baixas intensidades, para as duas amostras. No Gráfico 18 estão apresentados os difratogramas da primeira etapa para AM-ITA.

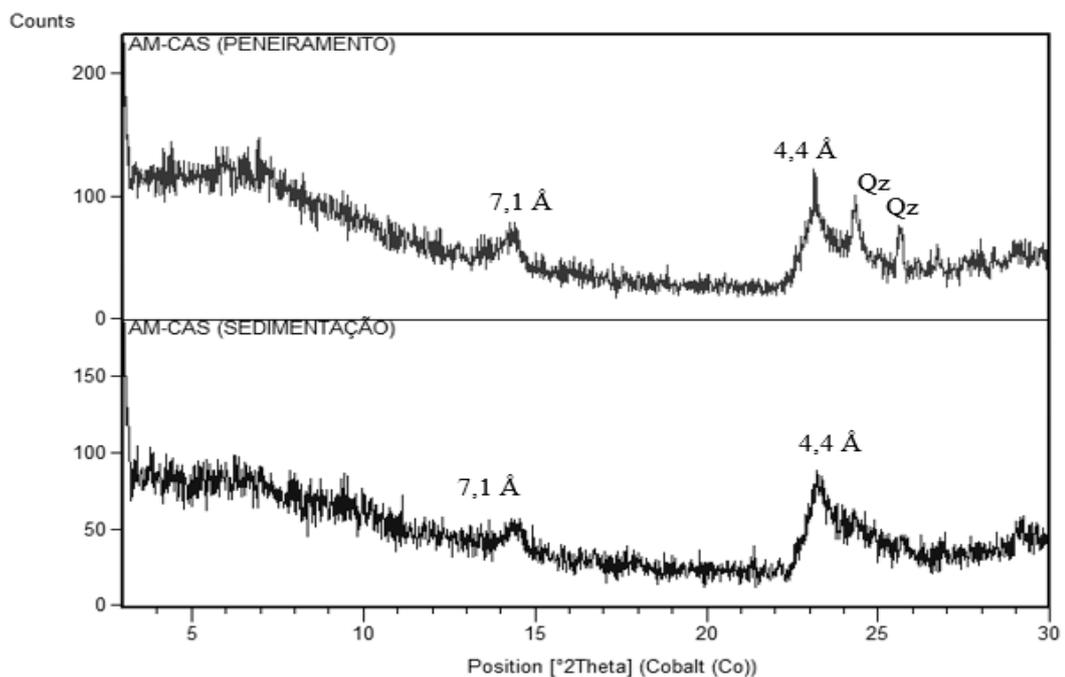
Gráfico 18 - Difratomogramas da AM-ITA pelo método do pó.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se picos principais e secundários característicos dos argilominerais do tipo 1:1, além de picos característicos de quartzo para a amostra peneirada, que desaparecem quando a seleção granulométrica é feita por sedimentação. O mesmo comportamento foi observado para a AM-CAS, apresentado no Gráfico 19.

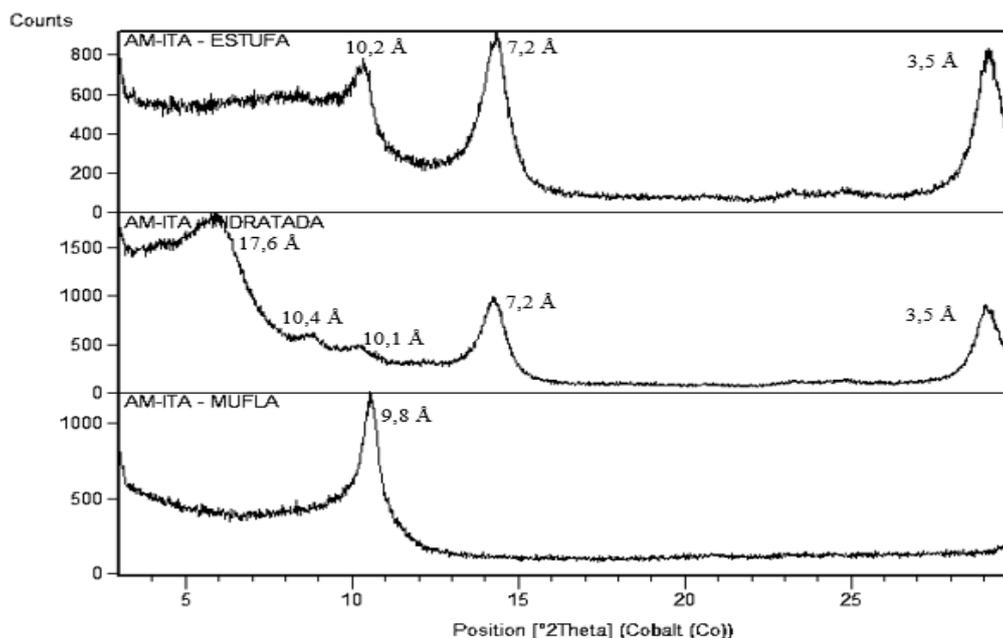
Gráfico 19 - Difratomogramas da AM-CAS pelo método do pó.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os difratogramas obtidos na segunda etapa da investigação mineralógica apresentaram picos bem definidos com altas intensidades de reflexão. Os resultados para AM-ITA estão apresentados no Gráfico 20.

Gráfico 20 - Difratogramas da AM-ITA após orientação das partículas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando a lâmina foi seca em estufa, a amostra apresentou picos característicos dos argilominerais do tipo 2:1 e 1:1, com picos principais com distância interplanar de 10 Å e 7 Å, respectivamente, podendo conter estrutura dos grupos das ilitas, montmorilonitas e caulinitas. No entanto, não é possível identificar a presença de argilominerais expansivos, uma vez que ilitas e montmorilonitas apresentam as mesmas distâncias basais no estado anidro.

Com o tratamento da lâmina com exposição ao vapor de glicerol, a distância interplanar aumentou de 10,2 Å para 17,6 Å, indicando a presença de argilominerais com estruturas montmorioníticas, com pico de alta intensidade. Também é possível observar a presença de argilominerais do grupo das ilitas, com picos de baixas intensidade, e materiais caulínicos, que ocorreram sem mudança significativa na intensidade dos picos.

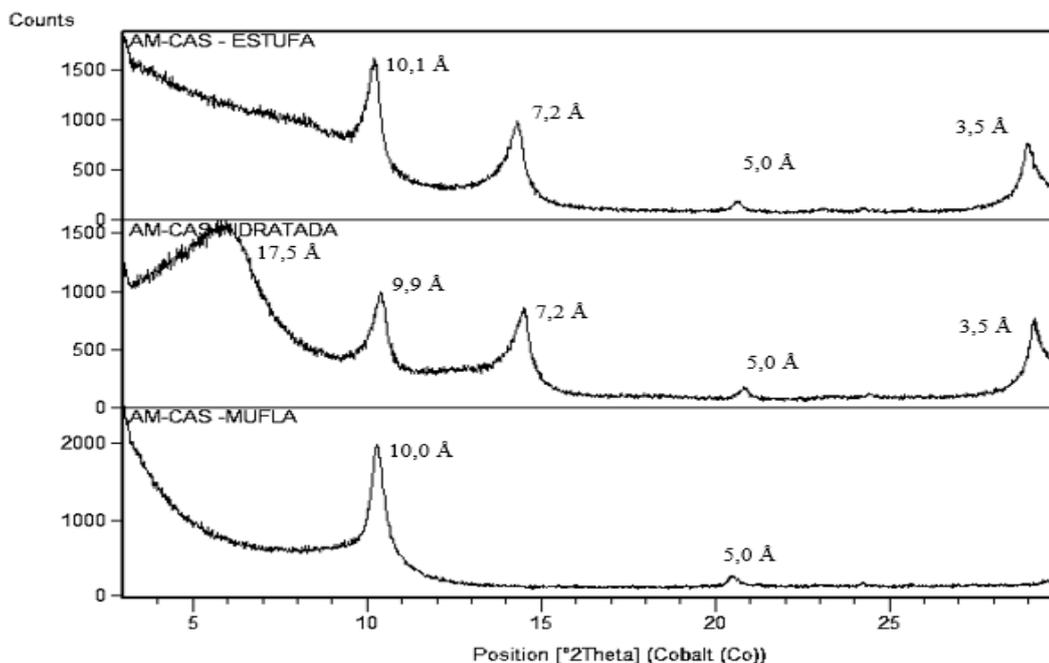
É importante notar o pico secundário típico das caulinitas na amostra seca em estufa e após a glicolagem, com 3,5 Å de espessura basal.

Após a queima das amostras a 440 °C foi possível identificar a presença de argilominerais com espaçamento de 10 Å, típico da família das ilitas e montmorilonitas. Os

argilominerais do grupo das caulinitas não foram identificados. Esse comportamento é característico dos argilominerais 1:1 (SANTOS, 1989).

Os difratogramas da AM-CAS após o tratamento da segunda etapa de ensaios podem ser observados no Gráfico 21.

Gráfico 21 - Difratogramas da AM-CAS após a orientação das partículas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na AM-ITA, foram identificados argilominerais da família das caulinitas, ilitas e montmorilonitas.

Com a lâmina seca em estufa foi possível identificar argilominerais do tipo 1:1 e 2:1. A amostra apresentou picos secundários típicos do grupo das caulinitas e ilitas.

Através da glicolagem da amostra foi possível identificar a presença de estruturas montmoriloníticas, já que a estrutura mineral expandiu quando a amostra foi hidratada. Diferentemente da AM-ITA, o pico principal típico do grupo das ilitas apresentou alta intensidade, indicando maior presença desse argilominerais na AM-CAS.

A presença de materiais expansivos se confirmou após a queima em mufla, onde houve uma redução do espaçamento basal. O pico secundário típico da família das ilitas foi identificada nos três tipos de tratamento, reforçando o indício de maior teor desse tipo de argilomineral na AM-CAS, quando comparada com a AM-ITA.

O resultado da análise semiquantitativa seguindo o método relatado por Gomes (1988) pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição mineralógica das amostras.

<b>ARGILOMINERAL</b>	<b>AM-ITA</b>	<b>AM-CAS</b>
MONTMORILONITA	52,7%	49,9%
ILITA	6,1%	26,8%
CAULINITA	41,2%	23,4%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados da análise é possível observar a presença predominante de montmorilonita, explicando o comportamento expansivo das amostras.

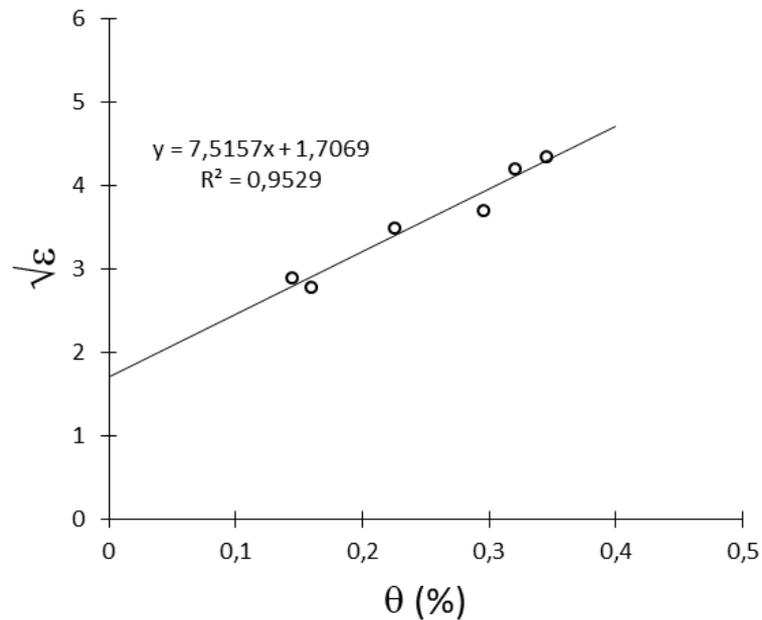
### **4.3 Modelos experimentais**

Através dos modelos experimentais foi possível analisar o comportamento da amostra AM-ITA com relação ao desenvolvimento da sucção na situação de umedecimento e secagem do solo.

#### ***4.3.1 Camada experimental de argila compactada***

Para o monitoramento da umidade ao longo da profundidade do corpo de prova foi necessária a calibração dos sensores de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 3. Os valores de coeficiente linear ( $a_0$ ) e angular ( $a_1$ ) podem ser observados no Gráfico 22.

Gráfico 22 - Relação entre a permissividade elétrica aparente e a umidade volumétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da reta é possível identificar os valores de  $a_0$  e  $a_1$ , que foram de 1,7069 e 7,5157, respectivamente. Os valores estão concordantes com os valores obtidos na pesquisa de Arsoy (2014) para um solo tipo CH.

Na etapa de umedecimento, o corpo de prova foi submetido à uma carga hidráulica de 40 cm por 18 dias. A fotografia do modelo experimental na durante a etapa de umedecimento pode ser observada na Figura 8.

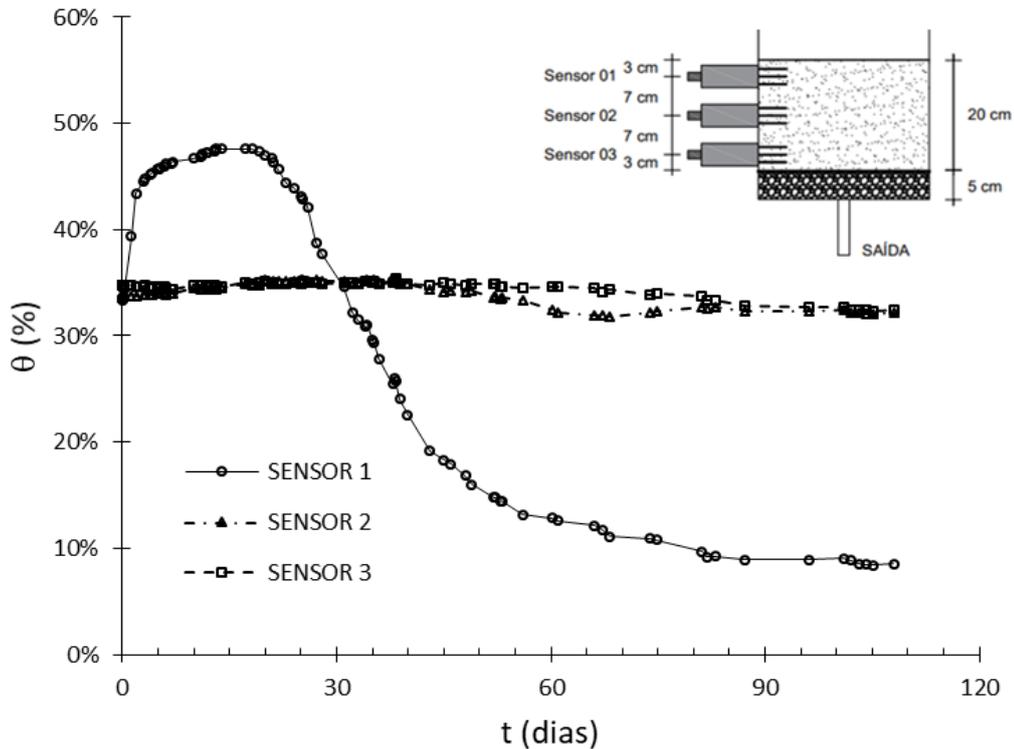
Figura 8 - Modelo experimental durante o processo de umedecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o período de umedecimento a água foi retirada e a secagem do solo por evaporação foi monitorada por 90 dias. A partir das medidas de umidade volumétrica obtidas no monitoramento do modelo experimental foram confeccionados gráficos em relação ao tempo para as profundidades citadas anteriormente. O comportamento da amostra durante as etapas de umedecimento e secagem pode ser observado no Gráfico 23.

Gráfico 23 - Variação da umidade volumétrica ao longo da profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do gráfico é possível notar que as maiores variações de umidade se deram próximo a superfície. Nas profundidades dos sensores 2 e 3, as umidades apresentaram variações menores e mantiveram-se próximas à umidade de compactação.

Na etapa de umedecimento as umidades do sensor 1 apresentaram variações significativas até o 7º dia, o sensor 2 registrou um aumento de 1% e o sensor 3 manteve-se na umidade de compactação, indicando que durante o período de umedecimento, a água não tinha percolado até a profundidade do sensor 3.

A umidade volumétrica máxima registrada pelo sensor 1 foi de 47,6 %, valores superiores a umidade volumétrica de saturação, que é de 40,5 %, indicando um aumento no volume de vazios devido à 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 expansão pode ser observada na Figura 9.

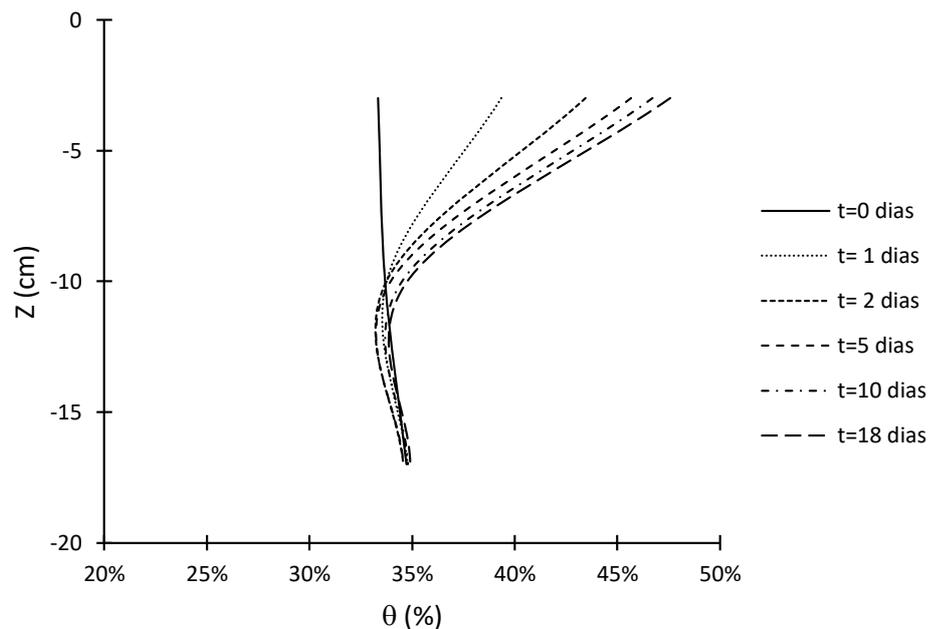
Figura 9 - Expansão no corpo de prova devido à etapa de umedecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 24, a variação da umidade com a profundidade e com o tempo pode ser observada ao longo da camada de argila compactada durante a etapa de umedecimento.

Gráfico 24 - Perfil de umidade volumétrica em função do tempo de umedecimento.

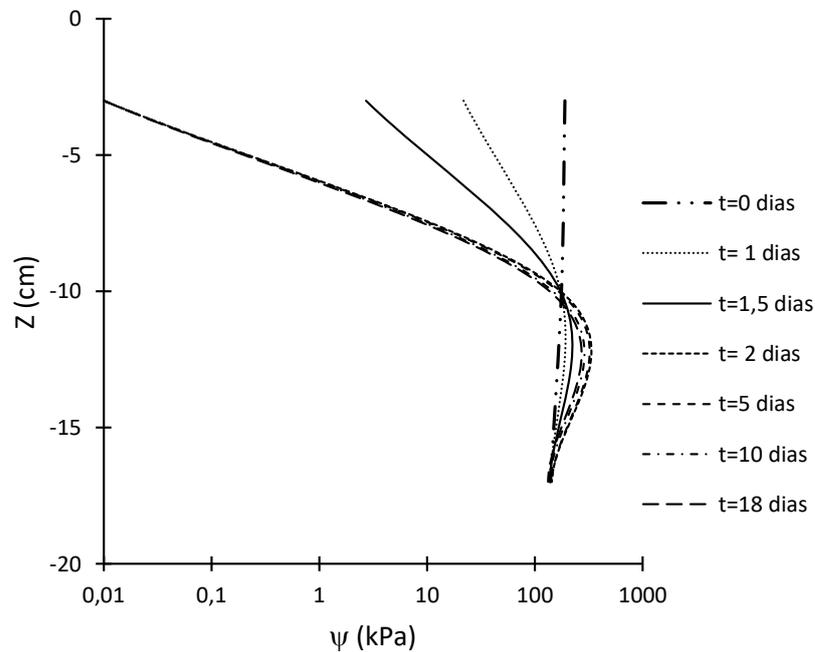


Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das umidades volumétricas foram determinadas as sucções a partir das equações propostas por Van Genuchten (1980), cujos pontos experimentais foram obtidos no ensaio de papel filtro. Nos sensores 2 e 3, as sucções ficaram entre 100 e 200 kPa. A partir do

segundo dia, as sucções foram, praticamente, nulas no sensor mais próximo a superfície. No Gráfico 25 estão apresentadas as variações das sucções ao longo do corpo de prova durante o processo de umedecimento.

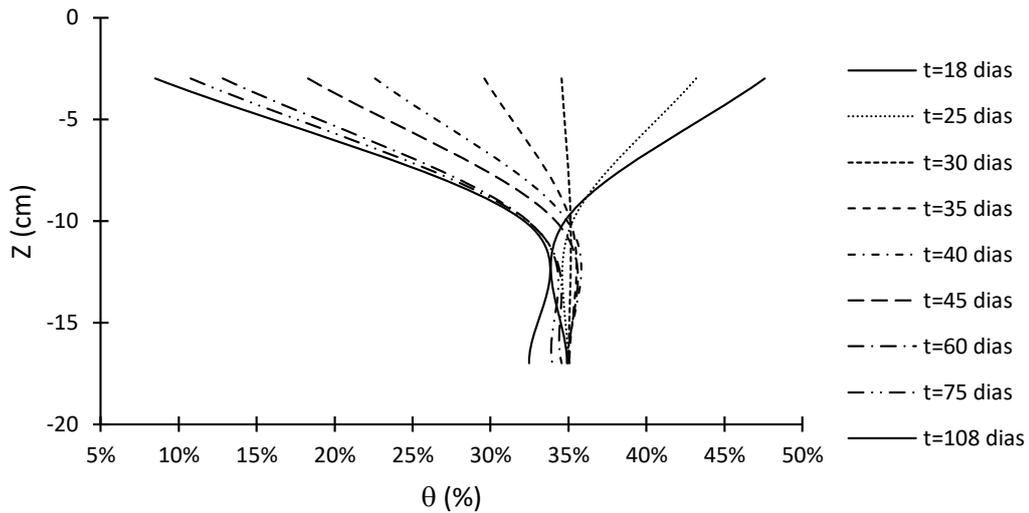
Gráfico 25 - Variações das sucções ao longo do corpo de prova durante o processo de umedecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

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 de 2,5 % para as umidades nas respectivas profundidades. No Gráfico 26 estão apresentados os resultados para a etapa de secagem.

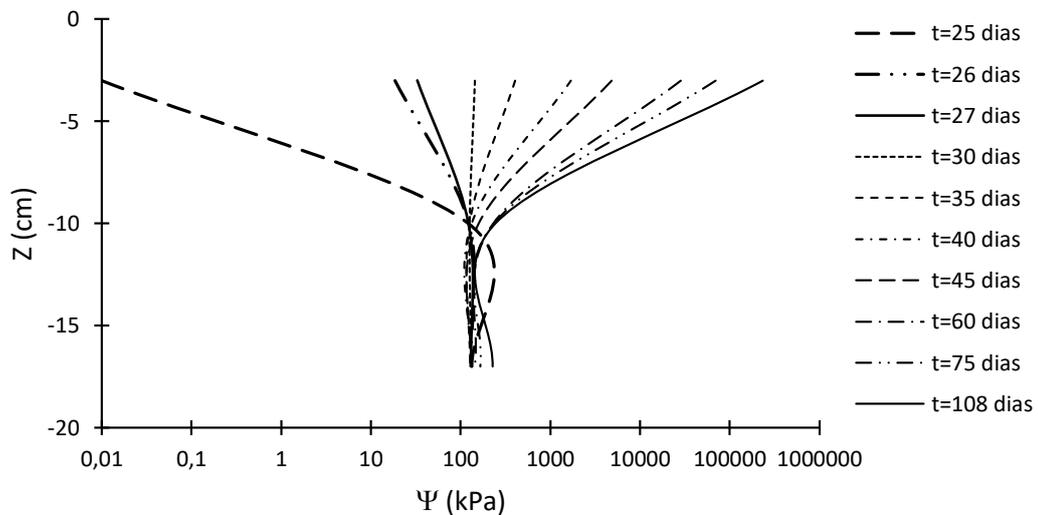
Gráfico 26 - Perfil de umidade volumétrica em função do tempo de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foram desenhados gráficos relacionando a sucção com a profundidade em função do tempo. No Gráfico 27 estão apresentados os dados da etapa de secagem.

Gráfico 27 - Variações das sucções ao longo do corpo de prova durante o processo de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A variação de sucção no sensor de profundidade próximo à superfície foi da ordem de 230.000 kPa, enquanto que nos demais sensores as sucções variaram de 100 a 300 kPa durante todo o período da etapa de secagem.

Durante o período de secagem foram observados o surgimento de trincas na superfície da camada experimental. As trincas apresentaram profundidade máxima de 3 cm. A Figura 10 apresenta a fotografia do topo do corpo de prova ao final da etapa de umedecimento.

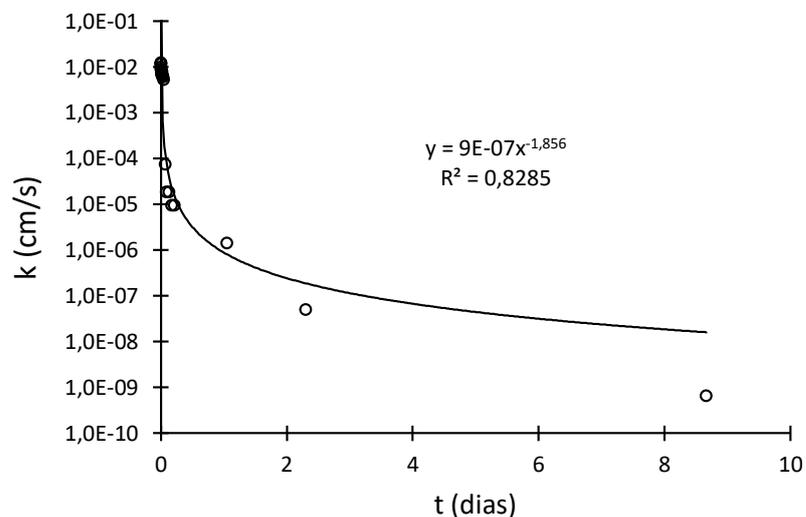
Figura 10 - Fotografia da superfície da camada experimental após a etapa de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a etapa de secagem foi aplicada uma carga hidráulica e os coeficientes de permeabilidade foram determinados de modo semelhante aos ensaios de permeabilidade com carga variável. Observou-se que o fluxo da água se deu entre o lisímetro e o corpo de prova, caminho preferencial de percolação criado pela contração volumétrica da amostra. O comportamento da amostra com relação ao coeficiente de permeabilidade em função do tempo pode ser observado no Gráfico 28.

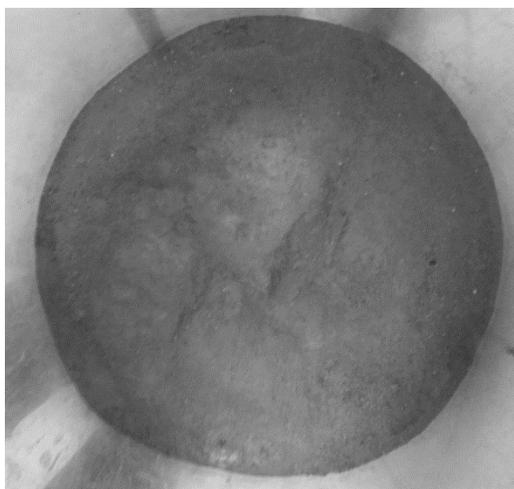
Gráfico 28 - Variação da permeabilidade com o tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento expansivo da AM-ITA pode ser observado através do gráfico. Ao expandir-se, o solo preencheu as trincas e os caminhos preferenciais de percolação e, em menos de 24 horas, o coeficiente de permeabilidade diminuiu em 1000 vezes. A Figura 11 apresenta a fotografia da superfície da camada experimental após a recuperação das trincas.

Figura 11 -Superfície da camada experimental após a aplicação da carga hidráulica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

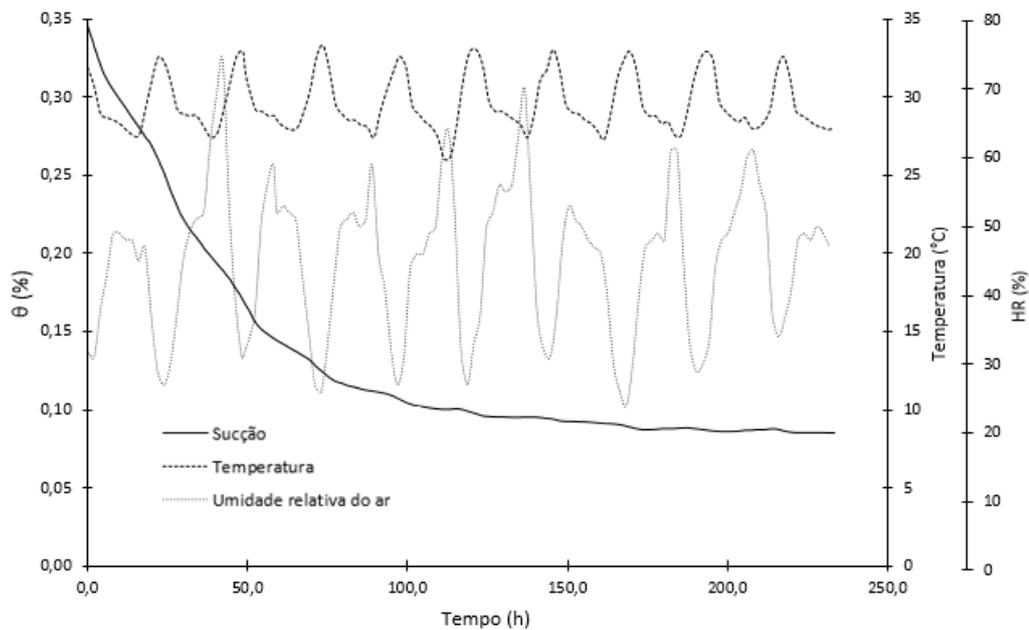
Quanto a permeabilidade à água, pode-se perceber que a amostra apresenta bom desempenho, mesmo considerando as trincas, que são fechadas logo que o solo umedece. No entanto, as trincas podem prejudicar o desempenho da camada quanto à permeabilidade aos gases, principalmente no semiárido nordestino que apresenta um extenso período seco. Há, neste caso, a necessidade de verificar este comportamento em escala campo, sujeito às condições climáticas, em um experimento em escala piloto.

#### **4.3.2 Modelo de ressecamento do solo**

O modelo de ressecamento do solo foi realizado com o objetivo de analisar a contração do corpo de prova a medida que este perdia umidade por evaporação. As umidades volumétricas foram determinadas através da variação do peso das amostras. O grau de contração foi obtido através do tratamento das imagens obtidas nas fotografias. A temperatura e a umidade relativa do ar (HR) foram registradas no sensor.

Os dados de umidade volumétrica do corpo de prova, temperatura ambiente e umidade relativa do ar, obtidos no ensaio de ressecamento foram desenhados em função do tempo. O Gráfico 29 mostra como esses dados variaram durante o ensaio.

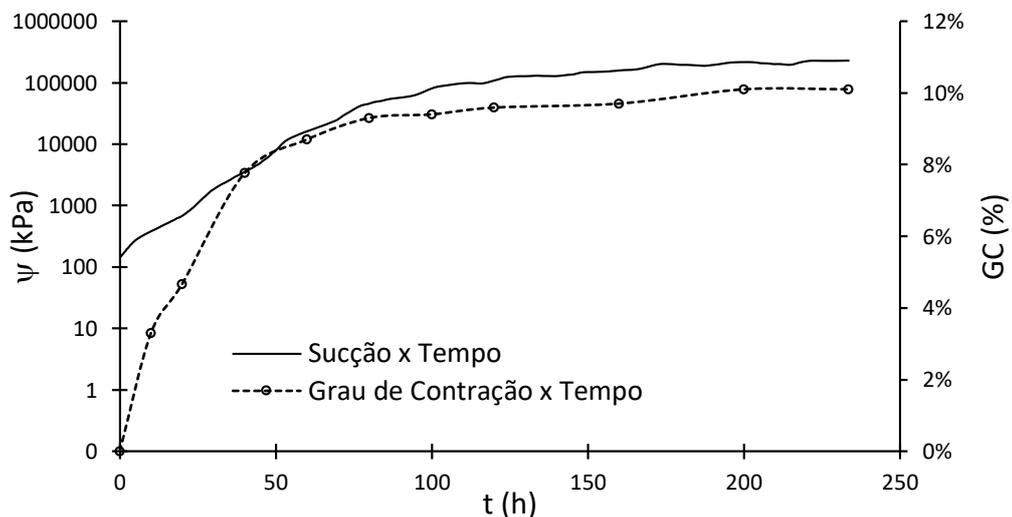
Gráfico 29 - Variação da umidade volumétrica, temperatura e umidade relativa do ar com o tempo de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As maiores temperaturas observadas não ultrapassaram 33° C e as menores ficaram acima de 26°, enquanto que a umidade relativa do ar variou entre 24 % e 74 %. Através do gráfico apresentado é possível notar que a amostra perdeu umidade mais significativamente nas 50 primeiras horas, a partir daí, a perda de umidade foi mais lenta. O Gráfico 30 apresenta a evolução da sucção média no corpo de prova com o tempo de secagem.

Gráfico 30 - Variação da sucção e grau de contração com o tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber que as maiores sucções registradas ficaram na ordem de 230.000 kPa, resultados semelhantes aos obtidos na camada de impermeabilização experimental. Após 24h de ensaio, o corpo de prova já apresentou contrações volumétricas da ordem de 5%, que de acordo com os estudos de Kleppe & Olson (1985), os solos argilosos compactados estão sujeitos ao aparecimento de trincas de, até, 3 cm de profundidade.

As contrações volumétricas atingiram a ordem de 10 % no terceiro dia de ensaio com uma sucção média de, cerca, de 50.000 kPa. A partir desse valor de sucção a variação no volume da amostra foi menos significativo.

Os resultados do ensaio indicam que, para uma situação de campo, o surgimento das trincas se dá nos primeiros dias após a execução da camada de impermeabilização.

## 5 CONCLUSÕES

Através dos ensaios de caracterização geotécnica foi possível classificar as amostras como argilas de alta compressibilidade, sendo que a AM-ITA apresentou menor teor de finos quando comparada a AM-CAS. A caracterização mineralógica mostrou que as amostras eram compostas por caulinitas, ilitas e, predominantemente, por minerais montmoriloníticos.

O teor de finos, os limites de consistência, e os coeficientes de permeabilidade de ambas as amostras apresentaram resultados aceitáveis para a utilização em camadas de impermeabilização.

A partir dos ensaios de expansão livre foi possível concluir que as amostras eram expansivas, portanto, mais suscetíveis ao desenvolvimento de trincas.

As curvas de retenção das amostras apresentaram resultados típicos de solos argilosos e a amostra com maior teor de finos apresentou maior sucção de entrada de ar e maior umidade residual.

As amostras apresentaram características de material adequadas para a utilização em camadas de impermeabilização de cobertura de aterros, de acordo com as normas consultadas.

A camada de impermeabilização experimental, construída com a AM-ITA, permitiu observar o comportamento expansivo e o potencial de formação de trincas na argila. Apesar da formação de trincas na camada experimental, a permeabilidade à água apresentou um bom desempenho, uma vez que a expansão do solo fechou as trincas e os caminhos preferenciais de fluxo. Porém, o desempenho da camada quanto à permeabilidade aos gases pode ter o desempenho prejudicado pelo surgimento de trincas na superfície.

O modelo experimental de secagem para a avaliação da contração volumétrica indicou a formação de trincas na camada de impermeabilização nos primeiros dias de exposição à secagem,

Portanto, quanto ao desempenho, embora as trincas não tenham atingido toda a profundidade da camada experimental e tenham sido fechadas com o umedecimento, há a necessidade de verificar o desempenho da camada argilosa através de um modelo experimental de campo, sujeito as condições climáticas do semiárido nordestino.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Verificar o desempenho em campo de argilas 2:1 e 1:1 no processo de formação de trincas e manutenção da estanqueidade inicial, simulando situações com e sem reforço com materiais geossintéticos.
- Desenvolver metodologias para o dimensionamento de coberturas finais para climas semiáridos.
- Analisar o desempenho de camadas impermeabilizantes com relação a permeabilidade ao gás.

## 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 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7185**: Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016. 8p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – procedimento. Rio de Janeiro, 2016. 9p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9813**: Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016. 5p.
- \_\_\_\_\_. **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.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16434**: Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos - Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 21p
- ABRELPE- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo: [S.n.] 2017.
- ALBERS, A. P. F. et al. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. *Cerâmica*, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002.
- ARAUJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. 12p.

\_\_\_\_\_. **D4829**: Standard test method for expansion index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. 10p.

\_\_\_\_\_. **D5298**: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010. 6p.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. Landfill methane models. In: 29th Annual International Solid Waste Exposition, SWANA, Silver Spring, **Proceedings from the technical sessions**, 1991. p. 87-111.

BARROSO, I. M. **Camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos: estudo preliminar de casos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2008.

BENSON, C.H.; DANIEL, D. E. Influence of clods on the hydraulic conductivity of compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 8, p. 1231-1248, 1990.

BENSON, C. H.; TRAST, J. M. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. **Clays and clay minerals**, v. 43, n. 6, p. 669-681, 1995.

BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG, X.. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. **Journal of geotechnical engineering**, v. 120, n. 2, p. 366-387, 1994.

BERNUCCI, L. L. B. **Expansão e contração de solos tropicais compactados e suas aplicações às obras viárias. Classificação de solos tropicais com base na expansão e contração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. Oficina de textos, 2008.

BOYNTON, S. S.; DANIEL, D. E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 111, n. 4, p. 465-478, 1985.

CATAPRETA, C. A. C. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 316f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos**.

2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

DANIEL, D. E.; BENSON, C. H. Water content-density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1811-1830, 1990.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. 1.ed. Danvers/Massachusetts/USA: John Willey & Sons, 1993. 576p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n.4, p.521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n.3, p.440-448, 1996.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-water characteristic curve equation with independent parameters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v.130, n.2, p.209-212, 2004.

GOMES, C. F. **Argilas - O que são e para que servem**, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1988, 457p.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007

KLEPPE, J. H.; OLSON, Roy E. Desiccation cracking of soil barriers. In: **Hydraulic barriers in soil and rock**. ASTM International, 1985.

LOPES, R. L.; MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. T. F. Avaliação da emissão de metano em aterro experimental de resíduos sólidos na Muribeca/PE – Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v.5, n.1, p.107-116, 2012.

LU, H.; LIU, J.; LI, Y.; DONG, Y. Heat transport and water permeability during cracking of the landfill compacted clay cover. **Journal of Chemistry**, v. 2015, 2015.

MACEDO, M. A. A. P. T. et al. Educação ambiental e resíduos sólidos urbanos: caminho para um futuro sustentável. **EduSer-Revista de educação**, 2015, 7.2: p. 41-57.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases pela camada de cobertura do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, RecifePE, 2003.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 1994, Foz

do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, v.2, p. 515-522.

MEEGODA, J. N.; HETTIARACHCHI, Hiroshan; HETTIARATCHI, Patrick. Landfill design and operation. Sustainable Solid Waste Management; **American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2016, p. 577-604.**

MESRI, G.; OLSON, R. E. Mechanisms controlling the permeability of clays. **Clays and Clay minerals**, v. 19, n. 3, p. 151-158, 1971.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPENELLA, R. G. Permeability of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 91, n. 4, p. 41-66, 1965.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPENELLA, R. G. Permeability of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1965, 91.4: 41-66.  
of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 367p.

ROSE, J. L. **Análise comparative entre as reduces da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SAKAI, S. I., YOSHIDA, H., HIRAI, Y., ASARI, M., TAKIGAMI, H., Takahashi, S., ... & Douvan, A. R. (2011). International comparative study of 3R and waste management policy developments. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 13(2), p. 86-102.

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-PE, 2015.

SANTOS, P. S. **Tecnologia das argilas**. 1. v. São Paulo: Editora Blucher, 1975. 340p.

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. de S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes-SP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 88-96, 2008.

SOARES, A. F. **Cobertura final de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos avaliada sob o enfoque da oxidação microbiológica de metano**. 2011. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers**. Office of solid waste and emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC.: USEPA, 2004. 421p.

VAN ELK, A. G. H. P.; MANAS, L. S.; MATEOS, T. G. **Deformation behaviour of municipal waste landfill**. 2007. International Waste Management Landfill Symposium, 11th. Cagliari, Italy. 10p.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

XUE, Q.; WAN, Y.; CHEN, Y. J.; ZHAO, Y. (2014). Experimental research on the evolution laws of soil fabric of compacted clay liner in a landfill final cover under the dry–wet cycle. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 73(2), p. 517-529.

ZORNBERG, J. G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. In: **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 6, p. 427 - 438, 2003.