

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DÉBORA GONÇALVES VASCONCELOS**

**ESTUDOS SOBRE A VIABILIDADE GEOTÉCNICA DE CAMADA DE**  
**COBERTURA OXIDATIVA COM USO DE COMPOSTO ORGÂNICO**

**RECIFE, 2017**

---

DÉBORA GONÇALVES VASCONCELOS

**ESTUDOS SOBRE A VIABILIDADE GEOTÉCNICA DE CAMADA DE  
COBERTURA OXIDATIVA COM USO DE COMPOSTO ORGÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos  
requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de  
Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

RECIFE, 2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

V331e Vasconcelos. Débora Gonçalves  
Estudos sobre a viabilidade geotécnica de camada de  
cobertura oxidativa com uso de composto orgânico / Débora Gonçalves  
Vasconcelos. - 2017.  
7folhas, Ils. e Tab.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Graduação em Engenharia Civil, 2017.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Camada oxidativa. 3. Parâmetros geotécnicos.  
4. Composto orgânico. 5. Projeto. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador).  
II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-59



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL**

**CANDIDATO(S): 1 – Débora Gonçalves Vasconcelos**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador: José Fernando Thomé Jucá**

**Examinador 1: Maria Odete Holanda Mariano**

**Examinador 2: Washington Moura de Amorim Jr**

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:**

**ESTUDOS SOBRE A VIABILIDADE GEOTÉCNICA DE CAMADA DE COBERTURA OXIDATIVA COM USO DE COMPOSTO ORGÂNICO**

**LOCAL: Sala Jaime Gusmão - Laboratório de Geotecnia e Instrumentação**

**DATA: 07/02/2017 HORÁRIO DE INÍCIO: 16h.**

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 8,5 (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

**1) (x) aprovado(s) (nota  $\geq 7,0$ ),** pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0  $\leq$  nota  $< 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

**2) ( ) reprovado(s). (nota  $< 3,0$ )**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 07 de Fevereiro de 2016

Orientador: .....

Avaliador 1: .....

Avaliador 2: .....

Candidato 1: .....

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela iluminação e força para seguir adiante com este trabalho e ao longo de todo este curso. Agradeço também a meus pais e familiares, pela paciência e apoio sempre prestados.

Agradeço também a todos os membros do Laboratório de Solos e Instrumentação e todos os seus laboratoristas, pelo apoio nos mais diversos ensaios. Também ao GRS - Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE, pelo apoio didático, pelo acompanhamento constante, além do companheirismo sempre presente.

Agradeço também fortemente ao grupo de Camada de Cobertura pelo apoio constante, seja para elaboração dos ensaios, discussão de resultados ou compartilhamento de ideias.

Por fim, também agradeço a todos os professores que brilhantemente me guiaram ao longo da trajetória deste curso até o presente momento, em especial aos que auxiliaram diretamente neste trabalho, José Fernando Thomé Jucá, Maria Odete Holanda Mariano, Sílvio Romero de Melo Ferreira e Washington Moura de Amorim Júnior.

---

## RESUMO

O Brasil, como país de grandes dimensões e em situação emergente, apresenta disparidades de condições econômicas, sociais, geográficas e climatológicas também em grande escala. Dessa forma, apesar da criação da Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010), que instaurou a Política Nacional de Resíduos Sólidos e exigiu que até 2014 todos os municípios do país tivessem uma destinação adequada dos resíduos, os problemas encontrados inviabilizaram esta previsão, e ainda grande parte dos municípios destina seus resíduos inadequadamente em lixões ao céu aberto ou aterros controlados, acarretando problemas de ordem social, sanitário e ambiental. Uma das dificuldades encontradas é a busca por materiais adequados para as camadas de cobertura, que sejam funcionais e a preços acessíveis, principalmente a municípios de menor porte aquisitivo ou situado em regiões áridas, em que o uso de camadas convencionais apresenta problemas, com ressecamento e abertura de fissuras, que permitem a entrada de água de precipitações e saída de gases de aterro, ricos em  $\text{CH}_4$ , que contribui para carga antrópica de gases de efeito estufa. Dessa forma, procurou-se estudar a viabilidade da associação de solos argilosos (mais adequados usualmente a camadas de aterros sanitários) com material estabilizado de leiras de compostagem (que geralmente se destinam a adubos ou mesmo ao descarte em aterros) para a elaboração de camadas de cobertura oxidativas, ou seja, que além de cumprir com as funções necessárias a uma camada convencional, ainda permitem a oxidação do  $\text{CH}_4$  produzido nos aterros sanitários. Dessa forma, analisando as misturas de composto e argila em proporções volumétricas 1:1 e 2:1, respectivamente de solo:composto, os ensaios geotécnicos preliminares permitiram aferir positivamente a sua utilização, mesmo em proporções mais elevadas (como na proporção 1:1 volumétrica), com boas características de resistência por meio de ensaios de cisalhamento e triaxial, boa absorção de água, analisando curvas de compactação por meio de ensaio Proctor normal, e ainda com bons resultados também no que se refere a permeabilidade, com baixa permeabilidade ao ar e a água, garantindo assim, margens para um uso adequado de material antes descartado e ainda permitindo a adoção de um meio mais sustentável para destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) com o uso de aterros sanitários, sem prejuízo da estabilidade e segurança geotécnica do local.

Palavras-chave: Camada oxidativa. Parâmetros geotécnicos. Composto orgânico.

---

## ABSTRACT

Brazil, as a large and emerging country, also exhibits disparities in economic, social, geographical and climatic conditions, also on a large scale. Thus, despite the creation of Law 12305/2010 (BRAZIL, 2010), which established a National Solid Waste Policy and requires that all municipalities in the country have an adequate disposal of waste by 2014, the problems found made this prediction impossible, and still, most municipalities destine their waste improperly in open-air dumps or controlled landfills, causing social, sanitary and environmental problems. One of the difficulties encountered is a search for suitable materials for the layers of coverage, which are functional and affordable, especially for the municipalities with less purchasing power or located in arid regions, where the use of conventional layers presents problems, with dryness and opening of fissures, which allows an entrance of precipitation water and exit of landfill gases, rich in  $\text{CH}_4$ , which contributes to the anthropogenic charge of greenhouse gases. In this way, this study look up to analyze the feasibility of the association of clayey soils (generally more suitable for use in landfill covers) with stabilized material of composting beds (generally destined to use as fertilizer or even discarded in landfills) for an elaboration of layers of oxidative covering layer, that is, that besides fulfilling the functions of a conventional layer, it still allows an oxidation of the  $\text{CH}_4$  produced in landfills. In this way, by analyzing the mixtures of the composite and clay in volumetric ratios 1:1 and 2:1, respectively of soil:compost, the preliminary geotechnical tests allowed to evaluate positively to its use, even in a more elevated proportion (1:1 volumetric ratio), with good resistance characteristics by means of shear and triaxial tests, good absorption capacity, with Compaction curves analysis by means of Proctor normal test, and still with good results also with respect to the permeability, with little air and water permeability, thus guaranteeing margins for an appropriate use of previously discarded material and still allowing a adoption of a more sustainable mean for the destination of the urban solid waste by using sanitary landfills, without prejudice to the stability and geotechnical safety of the site.

Keywords: Oxidative cover layer. Geotechnical parameters. Organic compound.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Exemplo de camada convencional.....                                                                                                              | 14 |
| Figura 2 - Camada Evapotranspirativa.....                                                                                                                   | 17 |
| Figura 3 - Barreira Capilar.....                                                                                                                            | 17 |
| Figura 4 - Exemplo de camada oxidativa.....                                                                                                                 | 18 |
| Figura 5 - Coleta de composto orgânico.....                                                                                                                 | 20 |
| Figura 6 - Solo a ser destorroado, ao lado da Mão-de-Grau e Almofariz.....                                                                                  | 21 |
| Figura 7 - Lavagem do material grosso e peneiras para peneiramento.....                                                                                     | 21 |
| Figura 8 - Material sendo misturado com o Hexametáfosfato de sódio.....                                                                                     | 22 |
| Figura 9 - Misturador.....                                                                                                                                  | 23 |
| Figura 10 - Limpeza com água destilada para evitar perda de material para o misturador.....                                                                 | 23 |
| Figura 11 - Preenchimento da proveta de 1L e medição com uso do densímetro.....                                                                             | 23 |
| Figura 12 - Ensaio de plasticidade.....                                                                                                                     | 24 |
| Figura 13 - Aparelho de Casa Grande.....                                                                                                                    | 25 |
| Figura 14 - Execução do ensaio de liquidez.....                                                                                                             | 26 |
| Figura 15 - Execução do ensaio proctor.....                                                                                                                 | 27 |
| Figura 16 - Montagem para equipamento de adensamento.....                                                                                                   | 28 |
| Figura 17 - Equipamento TRI-FLEX.....                                                                                                                       | 31 |
| Figura 18 - Escala de permeabilidade a água esperada para tipo de material.....                                                                             | 32 |
| Figura 19 - Montagem do ensaio de cisalhamento.....                                                                                                         | 33 |
| Figura 10 - Moldagem de corpo de prova para ensaio triaxial.....                                                                                            | 35 |
| Figura 11 - Montagem do ensaio triaxial.....                                                                                                                | 35 |
| Figura 12 - Ensaio triaxial montado.....                                                                                                                    | 36 |
| Gráfico 1 - Granulometria do solo utilizado.....                                                                                                            | 38 |
| Gráfico 2 - Granulometria do composto utilizado.....                                                                                                        | 39 |
| Gráfico 3 - Granulometria da mistura de solo e composto em 1:1 (volume) .....                                                                               | 40 |
| Gráfico 4 - Granulometria da mistura de solo e composto em 2:1 (volume) .....                                                                               | 41 |
| Gráfico 5 - Granulometria da mistura de solo e composto em 1:1 (volume) em comparativo com granulometrias de solo e do composto.....                        | 42 |
| Gráfico 6 - Granulometria da mistura de solo e composto em 2:1 (volume) em comparativo com granulometrias de solo e do composto.....                        | 42 |
| Gráfico 7 - Gráficos da compactação do solo puro e das duas misturas.....                                                                                   | 44 |
| Gráfico 8 - Resultado de ensaio de adensamento das misturas e do solo puro.....                                                                             | 45 |
| Gráfico 9 - Resultado de ensaio de adensamento das misturas e do solo puro em situação inundada.....                                                        | 45 |
| Gráfico 10 - Resultado de ensaio de cisalhamento do solo puro compactado em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deslocamento horizontal.....      | 46 |
| Gráfico 11 - Resultado de ensaio de cisalhamento do solo puro compactado em umidade ótima, comparando deslocamento vertical e deslocamento horizontal ..... | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 12 - Resultado de ensaio de cisalhamento do solo puro compactado em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e tensão normal.....                                                                          | 47 |
| Gráfico 13 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deslocamento horizontal.....                           | 48 |
| Gráfico 14 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando deslocamento vertical e deslocamento horizontal.....                       | 48 |
| Gráfico 15 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e tensão normal.....                                     | 49 |
| Gráfico 16 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deslocamento horizontal.....                           | 50 |
| Gráfico 17 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando deslocamento vertical e deslocamento horizontal.....                       | 50 |
| Gráfico 18 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e tensão normal.....                                     | 51 |
| Gráfico 19 - Resultado de ensaio triaxial CIU (material compactado e não drenado) da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deformação axial..... | 52 |
| Gráfico 20 - Resultado de ensaio triaxial CIU da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando poro pressão e deformação axial.....                                          | 52 |
| Gráfico 21 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões totais.....                                  | 53 |
| Gráfico 22 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões efetivas.....                                | 54 |
| Gráfico 23 - Resultado de ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deformação axial.....                                     | 55 |
| Gráfico 24 - Resultado de ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando poro pressão e deformação axial.....                                          | 55 |
| Gráfico 25 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões totais.....                                  | 56 |
| Gráfico 26 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões efetivas.....                                | 57 |
| Gráfico 27 - Permeabilidade ao ar das misturas com variação de umidade.....                                                                                                                                           | 59 |
| Gráfico 28 - Permeabilidade ao ar da mistura 1:1 com variação de umidade e pressão confinante.....                                                                                                                    | 60 |

---

## LISTA DE TABELAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Resumo de ensaios realizados.....                                | 37 |
| Tabela 2 - Granulometria do solo utilizado em porcentagens.....             | 38 |
| Tabela 3 - Resumo dos resultados de granulometria.....                      | 43 |
| Tabela 4 - Resultados da compactação.....                                   | 44 |
| Tabela 5 - Resumo de índices obtidos com ensaio de cisalhamento direto..... | 51 |
| Tabela 6 - Resumo de índices obtidos com ensaios triaxiais.....             | 57 |
| Tabela 7 - Valores de permeabilidade á água obtidos.....                    | 58 |

---

## SUMÁRIO

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                             | <b>10</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa e motivação.....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos gerais e específicos.....</b>                         | <b>12</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Camadas de cobertura.....</b>                                   | <b>13</b> |
| 2.1.1      | Camadas de cobertura convencionais.....                            | 13        |
| 2.1.2      | Camadas de cobertura alternativas.....                             | 15        |
| 2.1.2.1    | <i>Evapotranspirativas.....</i>                                    | <i>16</i> |
| 2.1.2.2    | <i>Barreira capilar.....</i>                                       | <i>17</i> |
| 2.1.2.3    | <i>Oxidativa.....</i>                                              | <i>18</i> |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                    | <b>19</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Estudo dos materiais.....</b>                                   | <b>19</b> |
| 3.1.1      | Análise granulométrica.....                                        | 20        |
| 3.1.2      | Limite de plasticidade.....                                        | 24        |
| 3.1.3      | Limite de liquidez.....                                            | 25        |
| 3.1.4      | Ensaio de compactação.....                                         | 27        |
| 3.1.5      | Ensaio de compressibilidade e expansão.....                        | 28        |
| 3.1.6      | Ensaio de permeabilidade - Uso do aparelho TRI-FLEX.....           | 30        |
| 3.1.7      | Ensaio de cisalhamento direto (saturado e na umidade natural)..... | 33        |
| 3.1.8      | Ensaio triaxial.....                                               | 34        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                 | <b>37</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Granulometria e limites de liquidez e plasticidade.....</b>     | <b>37</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Compactação.....</b>                                            | <b>44</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Adensamento.....</b>                                            | <b>45</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Cisalhamento direto.....</b>                                    | <b>46</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Ensaio triaxial .....</b>                                       | <b>52</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Permeabilidade.....</b>                                         | <b>58</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                             | <b>61</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                           | <b>64</b> |

---

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010) foi implementada a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e dentre suas resoluções, foi exigido que a partir de Agosto de 2014, deveria ser obrigatória a destinação correta dos resíduos por todo o país, de forma que os lixões deveriam ser extinguidos, fomentando assim a busca e estudos por técnicas corretas de destinação, principalmente dos resíduos sólidos urbanos. Uma das opções mais escolhidas dentre os municípios foi o aterro sanitário, considerando o seu custo relativamente inferior a outras formas de tratamento (como a incineração), além de possibilitar sua instalação com tecnologia mais acessível (com o uso de maquinaria já utilizada em outros setores de infraestrutura, como escavadeiras e tratores, por exemplo).

O aterro sanitário é definido pela NBR 8419/1992 (ABNT,1992) como uma obra de engenharia, onde ocorre a disposição final no solo dos resíduos de forma a não causar danos à saúde pública e a segurança da população, minimizando seus impactos ambientais utilizando princípios de engenharia, permitindo confinar os resíduos sólidos à menor área e volume possível, devendo a área das células de resíduos ser coberta diariamente na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário, permitindo, dessa forma, uma destinação correta dos resíduos sem agressão ao meio, desde que quando bem executado, bem gerenciado e com uso das tecnologias de forma correta.

Um dos elementos do aterro que requer principalmente essa correta execução e escolha para o bom funcionamento é a camada de cobertura.

As camadas de cobertura têm basicamente a função de "fechar" o aterro à atividade de intempéries externa, ao mesmo tempo em que evita a saída de determinados elementos resultantes da atividade de degradação do material recolhido. Assim, evita-se a produção excessiva de lixiviados (líquido rico em contaminantes resultantes da degradação da matéria presente no aterro), cria-se o ambiente adequado para a decomposição dos resíduos por microrganismos, sendo (em aterros de maior porte) em sua grande parte anaeróbios (requerem ausência de oxigênio para se desenvolver), ao mesmo tempo em que se evita a saída descontrolada do gás metano (resultante da decomposição e com forte potencial para provocar o chamado Efeito Estufa) e de lixiviados de alta carga poluidora, além de reduzir odores, procriação de vetores de doenças, e permitir melhor recomposição da paisagem após fechamento do aterro, permitindo uma melhor utilização da área após fechamento.

---

Assim, considerando todas as funcionalidades mencionadas da camada de cobertura, destaca-se a importância dos estudos feitos em torno de sua composição e gerenciamento, tal como se pretende apresentar neste trabalho.

### **1.1 Justificativa e motivação**

No Brasil, ainda não se tem uma norma definida de como deve ser construída a camada de cobertura final de aterro de resíduos, existindo apenas as normas NBR 8419/1992 (ABNT,1992) que trata da Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e a NBR 13896/1997 (ABNT,1997) que trata de Aterros – Critérios para projeto, implantação e operação.

Assim, não existe uma exigência ou possibilidade única para a constituição de camadas de cobertura dos aterros, devendo-se considerar as mais diversas possibilidades, desde que garantam o cumprimento das funções apontadas para a camada de cobertura, permitindo o assim bom funcionamento do aterro.

Entretanto, a partir do definido na Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010), todos os municípios, mesmo de menor porte, devem dar a destinação correta aos seus resíduos, e estes procuram cada vez mais a solução dada pelos aterros sanitários, sem, todavia, conseguirem dar a estes aterros estrutura necessária para sua classificação como aterro sanitário propriamente dito, e um dos componentes do aterro que trás preocupação quanto a sua correta estruturação são as camadas de cobertura.

É comum a utilização de solos, preferencialmente argilosos, de baixa permeabilidade a água para as camadas de cobertura, mas a busca por jazidas com material adequado nem sempre é fácil, o que se torna muitas vezes um problema para a instalação correta de aterros sanitários, principalmente em determinadas regiões que não possuem o recurso em local próximo nem podem trazer de regiões mais afastadas por conta do custo. Além disso, por conta também dos poucos recursos apresentados por estes municípios, busca-se cada vez mais a composição de camadas que permitam a reutilização de materiais que outrora seriam descartados, diminuindo assim a necessidade de aquisição de material de jazidas, ao mesmo tempo trazendo soluções positivas no quesito ambiental. Dessa forma, fomenta-se cada vez mais os estudos relativos às chamadas camadas alternativas de aterro sanitário, tal como a camada proposta por este estudo, que visa a utilização de material estabilizado de leiras de compostagem junto ao material das jazidas, visando minimizar os custos de aquisição deste último, ao mesmo tempo em que trás os benefícios da utilização de uma camada oxidativa (camada que permite a oxidação do metano em CO<sub>2</sub> naturalmente por ação de

---

microorganismos), caracterizando uma diminuição do caráter de efeito estufa do aterro, sendo mais uma vantagem ambiental para estes municípios, inclusive no quesito econômico, considerando a venda de créditos de carbono e, em Pernambuco, maior repasse do ICMS aos municípios "[...] que tenham, no mínimo, licença prévia de projeto, junto à CPRH, de Sistemas de Tratamento ou de Destinação Final de Resíduos Sólidos, mediante, respectivamente, Unidade de Compostagem ou de Aterro Sanitário, proporcionalmente à população do Município e ao estágio de evolução do processo de implantação dos sistemas, de acordo com critérios estabelecidos em decreto do Poder Executivo" (PERNAMBUCO, 2009).

Vale ainda o que é afirmado por David (1995), que “cada material ou sistema de cobertura tem seus problemas potenciais. Todos têm vantagens e desvantagens. Para cada aterro em particular, os materiais devem ser selecionados de modo que atendam da melhor forma as funções requeridas”, justificando-se assim, a necessidade dos estudos nos materiais escolhidos, permitindo não somente sua escolha por conta das vantagens apresentadas anteriormente, mas também analisando como estes materiais devem reagir nas condições ambientais regionais e locais, para só então se poder afirmar sua possibilidade ou não de utilização.

## **1.2 Objetivos gerais e específicos**

O trabalho realizado tem como objetivo a análise da viabilidade do uso da camada oxidativa proposta, considerando o estudo de suas características geotécnicas e condições de aplicabilidade locais.

Para isso, deverão ser estudados os seguintes objetivos específicos:

- Levantar as características físicas de cada um dos componentes da mistura proposta e, posteriormente, da própria mistura em si;
- Verificar sua funcionalidade a partir de ensaios que reproduzam condições físicas de campo;
- Fazer comparações para possíveis proporções otimizadas.

---

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Camadas de cobertura

A camada de cobertura, como mencionado anteriormente, corresponde a cobertura final de um aterro sanitário, de forma a isolar o interior de atividades de intempéries, tais como vento, chuvas, ação de catadores, e ao mesmo tempo garantindo a funcionalidade do aterro. O aterro sanitário deve permitir a decomposição do material por microorganismos, produzindo no final material estabilizado (material resultante de difícil degradação que tenderá a se manter naquele estado), além de lixiviado e gases, em especial o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) (em torno de 50-65% dos gases produzidos em aterros sanitários) (SHIN *et al.* 2002; KNAEBEL, REINHOLD, 2002).

Para cumprir com estas funções, diversos tipos de materiais podem ser empregados, considerando ainda a ausência de uma legislação que fixe o tipo de material a ser utilizado, dando margem assim a pesquisas que permitam o desenvolvimento de materiais mais apropriados para cada região.

As camadas de cobertura podem ter denominações diferenciadas quando considerado sua composição e possibilidades de funções extras além das necessárias para uma camada de cobertura. Seguem essas classificações.

#### 2.1.1 Camadas de cobertura convencionais

As camadas convencionais são formadas predominantemente por solos argilosos e malhas geossintéticas, que, baseados na baixa permeabilidade desses dois constituintes, podem fornecer a proteção necessária para o aterro.

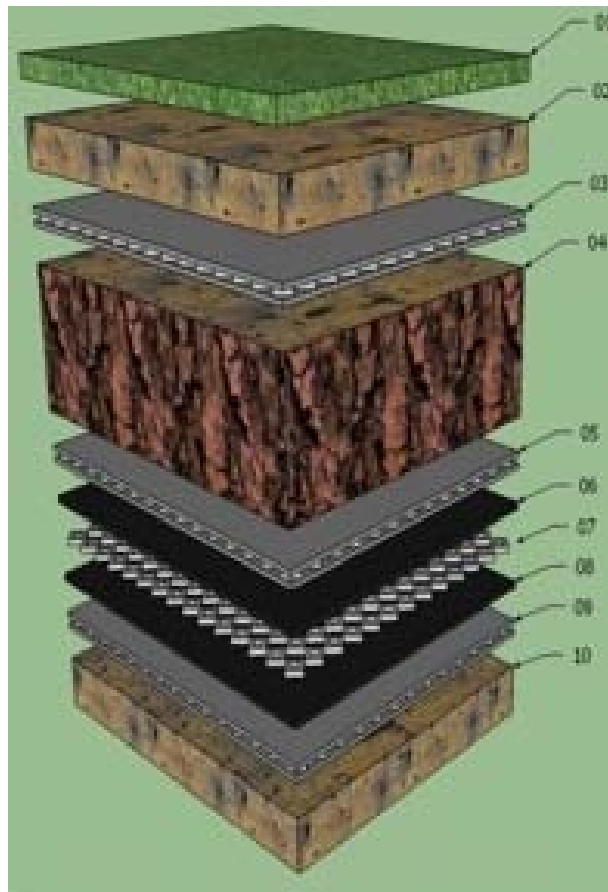
Entretanto, neste tipo de camada a parte de solo argiloso deve ser compactada e mantida a determinada umidade de forma a evitar rachaduras, além de correta manutenção nos geossintéticos, evitando que sejam atacados quimicamente e biologicamente, além de se danificarem por ação mecânica de raízes ou animais, que possam permitir assim entrada de chuvas e saídas dos gases, produzidos pela decomposição, de forma descontrolada (ELSHORBAGY, MOHAMED, 2000). Dessa forma, sua utilização em lugares de clima excessivamente quente e seco, como pode ser encontrado nas regiões mais interioranas do nordeste e regiões do centro-oeste do país, pode vir a ser inviável, requerendo constantes medidas protetivas e de manutenção, que encarecem sua utilização. Considerando ainda a necessidade de se buscar cada vez formas mais baratas e ecológicas que sejam acessíveis aos pequenos municípios (que ainda encontram bastante dificuldade para a destinação correta de resíduos), essa alternativa mostra-se ainda mais problemática.

Além disso, a utilização de geossintéticos que impedem a passagem de água, apesar de impedir a formação de lixiviados danosos ao ambiente e de alto custo de tratamento, também impedem a entrada de um pouco de água a massa de resíduos, dificultando assim a ação dos microorganismos necessária a decomposição do material depositado.

As camadas de tipo convencional ainda requerem a busca por jazidas com material adequado, o que se torna muitas vezes um problema para a instalação correta de aterros sanitários em determinadas regiões que não possuem o recurso em local próximo nem podem trazer de regiões mais afastadas por conta do custo.

Segue um exemplo de camada convencional:

Figura 1 - Exemplo de camada convencional



Fonte: Geofoco Brasil

---

Onde:

- 1- Plantio de vegetação para proteção contra erosão utilizada após a última camada do aterro;
- 2- Recobrimento com camada de terra;
- 3- Sistema de drenagem de gases com Geocomposto Drenante 2GT;
- 4- Depósito de resíduos;
- 5- Sistema de drenagem de chorume e percolados com Geocomposto drenante 2GT;
- 6- Impermeabilização primária com Geomembrana de PEAD;
- 7- Sistema de “Dreno testemunho” para a detecção de vazamentos com Georrede;
- 8- Impermeabilização secundária com Geomembrana de PEAD;
- 9- Sistema de rebaixamento de lençóis freáticos quando necessário com Geocomposto drenante 2GT;
- 10- Solo natural (Geofoco Brasil).

#### 2.1.2 Camadas de cobertura alternativas

As camadas alternativas são camadas formadas por materiais diferenciados da composição de solo argiloso convencional, visando aproveitamento de materiais que apresentam dificuldades no seu descarte correto e a busca por materiais que possam substituir a necessidade do uso de jazidas de argila, ao mesmo tempo que possam trazer propriedades diferenciadas para as camadas de cobertura.

Maciel (2003) citava que as principais razões para a procura de materiais alternativos para uso em sistemas de cobertura são: a melhoria dos aspectos geotécnicos e biológicos da camada, dificuldades de obtenção de material de qualidade próximo ao aterro e necessidade de se desfazer de materiais pouco aproveitáveis ou até potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, entre outros.

Entre os materiais usados como substitutos para os solos argilosos, já foi testado o uso de cinzas volantes, escórias de alto forno, escórias não ferrosas, cinzas de incineradores de resíduos domésticos, resíduos de construção, entre outros. Infelizmente, muitos desses substitutos podem vir a trazer contaminações para o solo, incluindo de metais pesados, principalmente por meio de infiltrações junto com a água, agravando a carga poluente do lixiviado produzido, devendo assim, esses potenciais substitutos para o material argiloso convencional, serem corretamente analisados física, química e biologicamente antes de seu potencial uso em aterros reais (ELSHORBAGY, MOHAMED, 2000).

---

Assim, pela grande quantidade de benefícios envolvidos, busca-se cada vez mais a pesquisa e análise de camadas alternativas de baixo custo que permitam a implantação de aterros sanitários mesmo em regiões afastadas e com poucos recursos, permitindo conseguir alcançar a situação ideal almejada pela Política Nacional de Recursos Sólidos.

Estudos feitos, por exemplo, usando lama do papel no lugar de argila em camadas de cobertura de aterros, resultaram em economias de em torno de (no ano de 1998) 20.000,00 a 50.000,00 dólares por acre (MOO-YOUNG, ZIMMIE, 1998).

Além disso, com uma correta análise, é possível se conseguir camadas que apresentem propriedades "extras" benéficas aos aterros, tal como a obtenção de camadas oxidativas, evapotranspirativas, ou ainda capilares, cujos princípios serão explicitados a seguir.

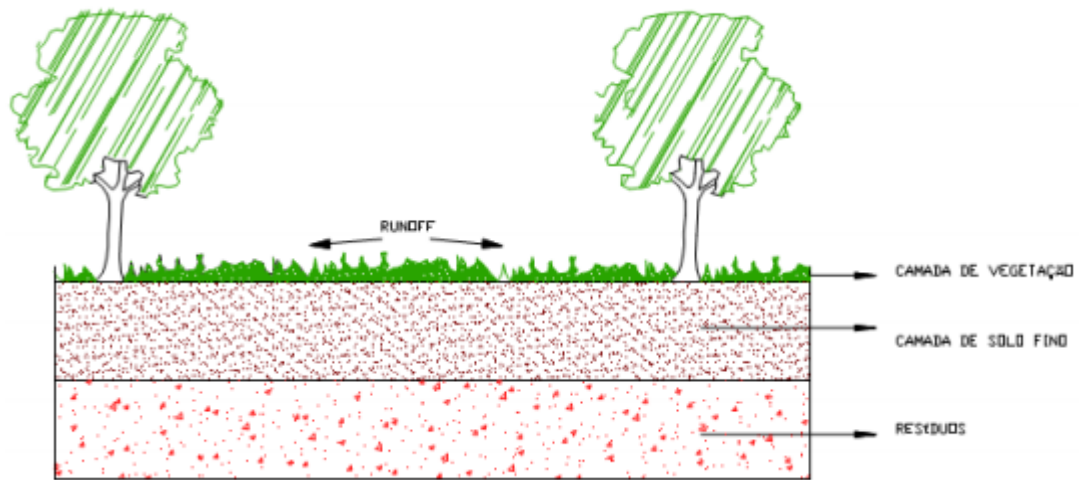
#### 2.1.2.1 *Evapotranspirativas*

Este tipo de camada de cobertura funciona permitindo o armazenamento de uma umidade moderada, ao mesmo tempo barrando certa porção da precipitação recebida, e mandando parte da umidade recebida de volta para a atmosfera nas estações secas por evapotranspiração, evitando, assim, o ressecamento da camada de solo em si, por sua vez impedindo seu desgaste e possíveis rompimentos, além de garantir maior estabilidade mecânica (por impedir o excesso de umidade no solo, e pelas raízes das plantas geralmente associadas a esse tipo de camada) e permitindo a manutenção de uma umidade razoável a atividade microbiológica. Essa camada também possui a vantagem de ter uma construção simplificada associada a um baixo custo de manutenção (CABRAL *et al.*, 2002).

Os sistemas de cobertura evapotranspirativa usam uma ou mais camadas de solos para reter água até que esta é transpirada através da vegetação ou evapotranspirada pela superfície do solo. Em caso do uso de vegetação, esta deve ser corretamente estudada e escolhida, evitando excesso de carga sobre o solo, além de raízes que possam vir a danificar a camada de cobertura e provocar efeitos negativos, como escape de gases para a atmosfera ou entrada direta de chuvas, provocando umidade excessiva nos resíduos. Estes sistemas de cobertura contam com a capacidade de armazenamento da camada de solo, mais do que materiais com baixa condutividade hidráulica, para minimizar a percolação (CATAPRETA, 2008; ABICHOU *et al.*, 2003).

Além disso, por conta da presença de umidade, o solo apresentará menor permeabilidade ao ar, devido a obstrução dos poros, sendo um impedimento a saída de gases produzidos.

Figura 2 - Camada Evapotranspirativa

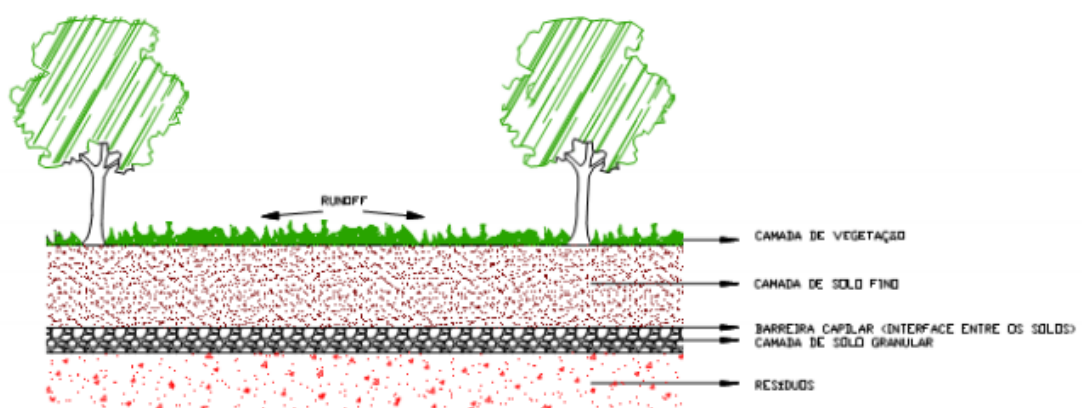


Fonte: Adaptado de CATAPRETA (2008)

#### 2.1.2.2 Barreira capilar

As barreiras capilares funcionam a partir dos conceitos de retenção e evaporação (tal como nas evapotranspirativas), mas ainda associado com o "bloqueio" provocado por diferenças na permeabilidade entre camadas intermediárias (a presença da camada de solo mais grosso aumenta a capacidade de armazenamento de água da camada de solo mais fino), além da utilização de inclinação para a evitar maior entrada de água superficial.

Figura 3 - Barreira Capilar



Fonte: Adaptado de CATAPRETA (2008).

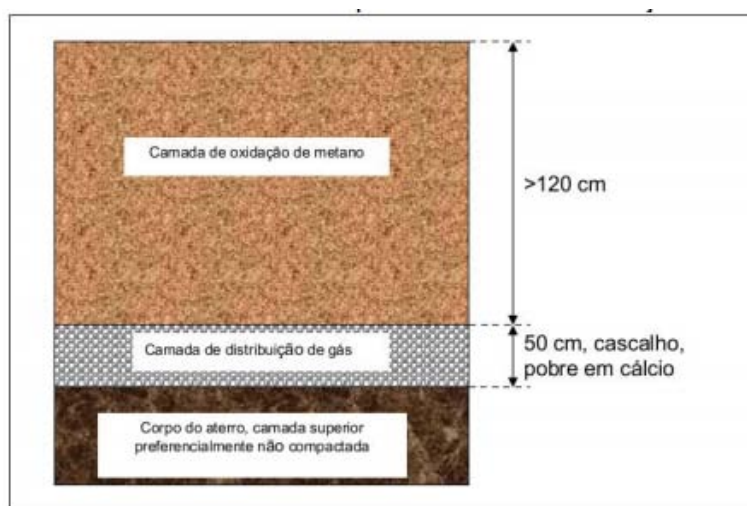
### 2.1.2.3 Oxidativas

As camadas oxidativas (foco do nosso estudo) são camadas obtidas por meio de misturas envolvendo materiais orgânicos, que permitem a presença e desenvolvimento de bactérias metanotróficas, ou seja, consumidoras de metano, evitando a saída deste para atmosfera, e consequentemente diminuindo a potencialidade do aterro como produtor de gases do efeito estufa. Ao mesmo tempo, a presença ainda de gases na camada associada a alta capacidade do material orgânico em retenção de líquido, diminui a permeabilidade da camada a água, mantendo o excesso desta em sua superfície, evitando ressecamento e formação excessiva de lixiviado, apresentando assim, grandes vantagens em relação a convencional.

A instalação de uma camada de distribuição de gás na base da camada de oxidação mostra-se necessária para um amplo fluxo homogêneo de gás de aterro na camada de oxidação de metano. A camada de distribuição de gases deve apresentar uma espessura de aproximadamente 0,50 m e ser composta por cascalho pobre em carbonato (COSTA, 2015).

Esta alternativa se mostra consideravelmente eficaz, além de ser uma alternativa viável para aterros de municípios menores de forma a evitar consumo de argila e ao mesmo tempo aproveitar materiais antes passíveis de descarte, como excesso de material estabilizado de leiras de compostagem, no geral de origem orgânica, permitindo assim a presença das bactérias metanotróficas.

Figura 4 - Exemplo de camada oxidativa



Fonte: Adaptado de HUMER (2004).

Além disso, ainda considerando os municípios de pequeno porte, esta alternativa ainda se torna econômica e ecologicamente mais viável, já que evita o lançamento de  $\text{CH}_4$  na atmosfera em aterros que não possuem condições para elaboração de um sistema de extração

---

de gás de aterro para produção energética adequado, além da existência dos incentivos governamentais existentes no estado, como comentado anteriormente (vide seção 1.1).

A utilização desse tipo de camada ainda pode ser associada a situações de remediações de lixões e aterros mal elaborados antigos (ALBANNA, FERNANDES, WARITH, 2007), podendo assim surtir efeito sobre situações mal planejadas no passado, evitando suas contribuições para o efeito estufa, principalmente considerando que a produção do metano tem seu pico em aproximadamente 10 anos após deposição dos resíduos, com posterior decréscimo na produção de gases produzidos pela decomposição, para encerrar praticamente apenas após 40 anos (lembrando ainda que quando da época de quantidades reduzidas da produção de gás de aterro, a sua utilização para extração do biogás, em caso de aterros que apresentem esta tecnologia, se torna inviável) (SINDERN *et al.*, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando alcançar os objetivos estabelecidos, diversos ensaios e análises são feitas de forma a obter os parâmetros e propriedades físicas dos materiais utilizados.

#### 3.1 Estudo dos materiais

Os materiais utilizados no estudo consistem em:

- Solo, retirado da formação barreiras, coletado por Costa. Este solo foi utilizado no antigo Aterro da Muribeca, inclusive na camada de cobertura da célula experimental da Chesf, também localizada no Aterro da Muribeca, que já foi fonte para muitos trabalhos anteriores realizados pelo GRS (Grupo de Resíduos Sólidos) da UFPE;
- Composto orgânico **estabilizado** advindo de leiras de compostagem (ou seja, quando os microorganismos das leiras de compostagem já efetuaram toda a degradação possível do material, resultando apenas em material inerte ainda rico em determinados nutrientes) de material de poda de árvores, recolhido nas leiras do Jardim Botânico, localizado no Curado, em Recife, Pernambuco. Esse material é geralmente ou utilizado como composto orgânico em plantações ou simplesmente descartado para dentro do próprio aterro sanitário.

Estes materiais foram então estudados separadamente e sob a condição de misturas nas proporções 1:1 e 2:1 (em volume de, respectivamente, solo:composto), onde estas foram consideradas misturas passíveis de utilização como camadas de cobertura oxidativas.

Figura 5 - Coleta de composto orgânico



Fonte: Autora

Na situação estudada, para correta classificação e utilização do material nas camadas de cobertura de aterros, é imprescindível sua correta caracterização, permitindo assim prever que comportamento este material apresentará em campo, e se este comportamento condiz com as necessidades e funções que uma camada de cobertura deverá desempenhar.

Agora, descreve-se os ensaios realizados e a metodologia seguida para executá-los, que permitirão uma razoável caracterização do solo, dando destaque aos procedimentos corretos e formas práticas de execução, permitindo assim que os resultados tragam realmente valores com significado para sua utilização correta.

### 3.1.1 Análise granulométrica

Ao se obter determinado solo, umas das primeiras caracterizações necessárias é a análise granulométrica, que engloba ensaio de peneiramento e sedimentação, regulados pelas normas NBR 7181/1988 (ABNT, 1988) e NBR 7182/1988 (ABNT, 1988).

Anteriormente a aplicação destes, entretanto, deve-se obter uma amostra de tamanho razoável do solo de campo e proceder a sua secagem ao ar livre. É importante frisar que esta secagem ocorra ao ar livre e não em estufa, e se ainda for necessário o uso desta, deve ser utilizada temperatura em torno de 65°C, para evitar assim que se percam as possíveis porcentagens de matéria orgânica presente no solo, que irão contribuir (a depender principalmente da sua porcentagem do total) no comportamento do solo. Após isso, procede-se ao seu destorroamento, por meio do Almofariz e da Mão-de-Grau, que correspondem respectivamente a um grande recipiente de louça, e um pedaço longo de madeira, semelhante aos utilizados em pilões, com diferença a presença de uma cabeça emborrachada na ponta, visando evitar que os grãos de solo se rompam durante o processo. Este destorroamento se faz

necessário para que o solo não se apresente sob forma de torrões, ou seja, material de solo agregado, podendo assim trazer falsos resultados sobre sua real granulometria.

Figura 6 - Solo a ser destorreado, ao lado da Mão-de-Grau e Almofariz



Fonte: Autora

Após isso, finalmente se procede ao peneiramento em si.

Primeiramente, passa-se o material pela peneira 10. O material retido nesta peneira deve ser lavado e secado (em estufa), para depois passar pelo peneiramento de grãos. Nele, o solo deve passar pelas peneiras de 2", 1 ½", 1", ¾", e pela peneira nº4, sendo o total o retido na peneira 10, obtendo-se assim a porcentagem de material retido em cada peneira em relação ao total, e conseqüentemente a granulometria do material estudado.

Figura 7 - Lavagem do material grosso e peneiras para peneiramento



Fonte: Autora

Do material que passar pela peneira 10, deve-se reservar 70g para posterior ensaio de sedimentação, que dará os valores relativos a granulometria mais fina, além de 2 cápsulas para se determinar a umidade do solo no momento do peneiramento. Para esse ensaio, pesam-se as cápsulas que serão utilizadas, anotando suas identificações e pesos, posteriormente pesam-se as cápsulas com as amostras de solo, e por fim, após secagem na estufa (em torno de 105-110°C ou 65° em caso de presença acentuada de matéria orgânica, visando sua

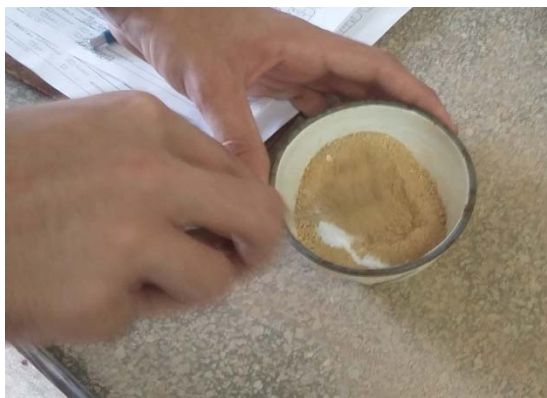
manutenção), se determina o peso novamente, encontrando assim o peso de água do solo natural e sua umidade.

Além disso, após passar pelo ensaio de sedimentação, deve-se lavar as 70g de solo, usando como apoio a peneira de nº200. Este solo, deve então passar pelo peneiramento de solo miúdo, com as peneiras na seguinte ordem: nº 16, 30, 40, 50, 100 e 200, sendo mais uma vez o material comparado com o total retido na peneira 200.

Do que passa pela peneira 10, deve-se peneirar novamente, dessa vez na peneira 40, separando uma quantidade razoável, para permitir os ensaios de plasticidade e liquidez.

Voltando-se agora para o ensaio de sedimentação, com os 70g de solo passantes na peneira 10 separados anteriormente, coloca-se neste água destilada (125mL) e 5,71g de Hexametáfosfato de sódio, misturando bem a solução até que esta se desprenda da espátula. Depois deixa-se a mistura repousar por aproximadamente 12h, permitindo que o sal reaja e assim que os finos se desprendam dos grãos maiores do solo, garantindo uma correta quantificação de finos.

Figura 8 - Material sendo misturado com o Hexametáfosfato de sódio



Fonte: Autora

Após isso, se mistura a solução novamente, com o auxílio de um misturador por aproximadamente 7min. Então, vira-se a mistura em uma proveta com graduação de 1L. Por fim, completa-se a proveta até que esta atinja 1L, e mistura-se todo o seu conteúdo, virando-a para os lados, procurando vedá-la o máximo possível. Imediatamente ao colocar a proveta em sua posição original, se prepara um densímetro, devidamente graduado, tomando cuidado para mantê-lo limpo para as medidas (preferencialmente mantendo-se um recipiente com a água destilada em sua proximidade), que devem ser feitas em períodos pré-determinados.

As leituras serão posteriormente comparadas a tabelas, que poderão assim definir o teor de argilas, siltes, areias e finos na amostra a partir dos valores de densidade do meio líquido com as partículas ainda em suspensão naquele momento.

Figura 9 - Misturador



Fonte: Autora

Figura 10 - Limpeza com água destilada para evitar perda de material para o misturador



Fonte: Autora

É possível também fazer este ensaio sem a utilização do sal (defloculante), para permitir um ensaio comparativo. Sem o sal, os finos ficarão retidos sobre os grãos maiores, e essa diferença poderá registrar também mais claramente a presença de finos no solo.

Figura 11 - Preenchimento da proveta de 1L e medição com uso do densímetro



Fonte: Autora

### 3.1.2 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade de um solo é considerada como a umidade limite onde o solo ainda se apresenta com condições de ser moldado.

Para o ensaio de plasticidade, utiliza-se o estabelecido na norma NBR 7180/2016 (ABNT, 2016).

Toma-se parte do solo que passa na peneira de nº40 e, aos poucos, se coloca água destilada, buscando sempre se misturar bem e manter o solo com umidade uniforme. Quando se observar que o solo apresenta-se em capacidade de moldar, faz-se uma massa e a pressiona contra uma placa de vidro rugosa, e assim se começa a rolar pequenos cilindros de aproximadamente 3mm de diâmetro, mantendo um pequeno cilindro de 3mm próximo ao ensaio para permitir a comparação. Ao se chegar nessa espessura especificada, o cilindro deve começar a apresentar rachaduras. Se o solo se romper antes disso, é porque sua umidade está insuficiente para a moldagem. Se ao contrário, o solo não apresentar as rachaduras, é porque se encontra com umidade em excesso, devendo-se secar o material previamente ou acrescentar mais solo (tomando cuidado sempre com a homogeneização).

Figura 12 - Ensaio de plasticidade



Fonte: Autora

Por fim, toma-se aproximadamente 6 amostras (cilindros) que tenham apresentado resultado satisfatório, colocam-se em cápsulas previamente identificadas e pesadas, e se pesa o conjunto. Colocam-se por fim estas amostras em estufa (por aproximadamente 24h ou mais em caso de presença forte de matéria orgânica, tomando-se sempre cuidado quanto a temperatura da estufa utilizada) e pesa-se novamente. Os resultados permitirão concluir a umidade limite para a plasticidade do solo, ou seja, a partir de que umidade ele se torna menos "moldável".

Em caso da amostra possuir alto teor de silte e areia, e baixo teor de argila, não será possível efetuar o ensaio, de forma que a mistura nunca permitirá ser moldada corretamente. Assim, o material será dito não plástico (NP).

### 3.1.3 Limite de liquidez

O limite de liquidez de um material se caracteriza pela umidade limite, onde abaixo desta o solo não apresenta determinada capacidade de sustentação sob ação de impacto, sendo determinado por procedimento presente na norma NBR 6459/2016 (ABNT, 2016).

Da mesma forma que no ensaio anterior, se separa parte do solo que passa na peneira nº40 e acrescenta-se água destilada aos poucos. Dessa vez, no entanto, procura-se manter o solo ainda um pouco seco.

Este ensaio é realizado por meio do equipamento de Casa Grande, composto por uma concha metálica e uma base rígida, onde por meio de uma manivela em movimentos circulares se pode fazer a concha dar uma pequena rotação em torno de um eixo e retorná-la ao estado anterior. Utilizando o aparelho normalizado, se coloca o solo com auxílio de uma espátula, espalhando o solo bem e evitando que se formem bolhas de ar em seu fundo. Passa-se um cinzel, que permite a formação de um sulco no solo (o cinzel é uma peça metálica, cujo formato irá depender do tipo de solo considerado).

Figura 13 - Aparelho de Casa Grande



Fonte: Autora

Por fim, após se verificar que o aparelho se encontra devidamente calibrado (1cm entre o fundo do recipiente e a base do aparelho quando posicionado na posição mais alta, além de não se encontrar frouxo a ponto de prejudicar o movimento da manivela), se golpeia a concha em velocidade de aproximadamente 2 vezes por segundo, obtendo o número de golpes

suficiente para que o sulco se feche. Após isso, colhe-se parte do solo no ponto onde este se fechou na concha e coloca-se em uma cápsula para determinação de sua umidade.

Figura 14 - Execução do ensaio de liquidez



Fonte: Autora

Aos poucos, coloca-se mais água destilada no solo e se executa o mesmo ensaio. Em caso do número de golpes de um ensaio para outro varie pouco, é interessante se depositar mais água ou colocar mais solo na mistura, procurando sempre homogeneizar bem a mistura, permitindo assim a obtenção de pontos com razoável distância entre si.

Com os valores obtidos, traça-se um gráfico umidade (escala linear) x nº de golpes (escala logarítmica), que será uma reta. Deve-se então determinar a unidade correspondente a 25 golpes, e esta corresponderá ao limite de liquidez do solo. O limite de liquidez indica o máximo onde o solo ainda apresenta o mínimo de condições para ser moldado, ou seja, apresentando comportamento plástico. Em caso de aumento de umidade a partir desse ponto, o solo já se apresenta em sua forma mais líquida.

Em caso de valores muito concentrados, ou apenas antes ou apenas depois dos 25 golpes, é interessante refazer o ensaio, obtendo-se valores mais bem distribuídos, permitindo assim a determinação da umidade referente aos 25 golpes de forma mais precisa.

É importante salientar, tanto neste ensaio como no de plasticidade, que deve-se pesar as cápsulas previamente, e as cápsulas com o solo imediatamente após o ensaio, evitando assim a evaporação na amostra e erro nos valores obtidos para a umidade do solo.

É possível ainda que, devido a porcentagem de material granular, ou não coesivo, o ensaio não seja possível de ser realizado (não permita a disposição sem bolhas de ar na

concha do aparelho de Casa Grande), sendo dessa forma o solo denominado Não Líquido (NL).

#### 3.1.4 Ensaio de compactação

No ensaio de compactação proctor se busca determinar a umidade que torna o solo mais viável para compactação, de forma a apresentar maior densidade e compacidade, sem interferência de coesão aparente, evitando o fenômeno denominado Borrachudo, que ocorre quando a compactação é feita quando o solo ultrapassa a umidade ótima. Para sua execução, utilizam-se as normas NBR 6457/1986 (ABNT, 1986) e NBR 7182/1986 (ABNT, 1986).

Para o ensaio, separa-se aproximadamente 3kg de solo seco ao ar e destorroado. Geralmente, inicia-se com o solo com o mínimo de umidade. Acrescenta-se pequena quantidade de água ao solo. Então toma-se o solo, procurando peneirá-lo em peneira nº4 para evitar a passagem de pedregulho que possa interferir no resultado, e se coloca uma camada no cilindro de proctor (lembrando que este cilindro deve estar previamente identificado, pesado e com seu volume analisado), a pouco mais de um terço deste (somado com sua parte superior encaixada). Então, se golpeia o solo 26 vezes com martelo normalizado para o ensaio. Com o auxílio de um objeto cortante, se escarifica a camada recém compactada (para garantir aderência entre esta e a camada seguinte), e se coloca a seguinte camada de forma a ultrapassar um pouco 2/3 do cilindro montado, procedendo então ao mesmo processo de 26 golpes com o martelo. Por fim, escarifica-se novamente a camada recém compactada e coloca-se a terceira de solo, se compactando novamente. Finalmente, ainda com auxílio do objeto cortante, retira-se a parte de cima do cilindro e o excesso de solo que ultrapassa o cilindro original pesado. Então, pesa-se o conjunto cilindro com solo, retirando-se depois o solo do cilindro por meio de aparelho específico. Daí, rompesse o cilindro de solo e se retira um pequeno pedaço de solo para analisar sua umidade, por meio de pesagem com cápsula (já pesada e identificada) que passará por estufa.

Figura 15 - Execução do ensaio proctor



Fonte: Autora

Procura-se então fazer o mesmo processo, mais 4 ou 5 vezes, aumentando o volume de água acrescentado, de forma a obter no final 5 pontos. Cada vez que se acrescenta mais água, deve-se ter o cuidado de destorroar e uniformizar a água presente, evitando a formação de torrões ricos em umidade em meio ao solo seco.

Por fim, traça-se o gráfico relacionando a umidade do solo e sua densidade, calculada por meio das pesagens de cilindro e solo. O gráfico deve se apresentar como uma parábola, onde seu pico indicará a umidade ótima para aquele solo, ou seja, umidade na qual ele terá coesão e densidade máxima.

### 3.1.5 Ensaio de compressibilidade e expansão

Visando a medição de valores de expansão ao se saturar, ou ainda tensão necessária para o confinamento do solo, ou seu adensamento pela aplicação de uma carga (como ocorre com as camadas de cobertura pela passagem do maquinário usado em aterros), pode-se utilizar de um único aparelho que permite a efetuação de diferentes valores em diferentes ensaios, mudando apenas as suas circunstâncias.

Primeiro, monta-se um corpo de prova em uma forma em forma de anel de altura aproximada de 2cm. Este corpo de prova pode ser obtido cravando-se este anel em um cilindro compactado de ensaio proctor, ou cravando-o em um bloco de amostra indeformada obtido em campo, ou ainda cravando-o em amostra obtida com tubo shelby em campo. Essa cravação deve ser feita posicionando o cilindro sobre o solo e então escavando cuidadosamente ao seu redor, de forma que se possa ir cravando o cilindro aos poucos no solo sem causar grandes alterações na estrutura atual do solo. Após isso, monta-se a estrutura do equipamento como mostrado a seguir:

Figura 16 - Montagem para equipamento de adensamento



Fonte: Autora

---

Depois de montada toda a estrutura, pode-se efetuar diferentes ensaios sobre o solo:

- Expansão livre: Uma vez colocado o solo no equipamento, acrescenta-se água destilada (ou água do local onde o material encontra em uso no campo, evitando possíveis alterações químicas) a este, até que todo o corpo de prova se encontre submerso em água. Então, passa-se a fazer leituras no extensômetro (instrumento que permite o registro de pequenas variações de comprimento por meio de agulha de grande sensibilidade) presente no equipamento em intervalos de tempo determinados. Por fim, observa-se a sua expansão ao final de 24h. A depender do valor final obtido, pode-se classificar o solo segundo suas capacidades expansivas;
- Pressão de expansão: coloca-se o corpo de prova no equipamento e inicia-se então a adição de água destilada (ou água do local onde o material encontra e, uso no campo), mas desta vez, a medida que ele vai se expandindo, deve-se combater a expansão por meio da adição de pesos no outro lado do braço do equipamento, mantendo-se sempre o braço em equilíbrio com auxílio de um nível tubular, anotando-se com regularidade as cargas posicionadas. As cargas são posteriormente convertidas em pressões, multiplicadas por um fator correspondente ao braço do equipamento, obtendo-se assim a real pressão que deve ser posta ao solo evitando sua expansão;
- Expansão com sobrecarga: assim como nos ensaios anteriores, se expande o corpo com o uso de água destilada (ou água do local onde o material encontra em uso no campo), entretanto, desta vez apenas se coloca uma carga única e analisa-se a expansão apresentada pelo corpo de prova;
- Ensaio de adensamento: adiciona-se o corpo de prova na máquina submetido a certa pressão por meio de posicionamento de pesos no braço do equipamento, e em intervalos de 24h adiciona-se mais peso, registrando-se em intervalos de tempo definidos o quando o corpo de prova se deformou por meio de medições no extensômetro. Depois, repete-se o mesmo processo, desta vez retirando-se parte dos pesos a cada 24h, observando mais uma vez por meio de medições como este se comporta ao longo do descarregamento.

Após a execução do ensaio considerado, plotam-se gráficos que relacionem o carregamento, o tempo e a expansão ou compressão do material, podendo assim inferir-se a respeito do comportamento deste sob os esforços do ensaio elaborado.

---

### 3.1.6 Ensaio de permeabilidade - Uso do aparelho TRI-FLEX

O ensaio tri-flex é uma alternativa mais viável para a obtenção dos valores de permeabilidade de solos de granulometria mais fina, principalmente argilosos. Nos ensaios de permeabilidade convencionais, se aplica ou uma carga variável (devendo-se esperar e contabilizar a variação desta carga no tempo) ou carga constante (observa-se e contabiliza-se a quantidade de líquido necessário a manter a carga de líquido no corpo de prova constante), que em caso de materiais muito finos, é de difícil observação e contagem devido a lentidão de passagem do líquido no corpo, ou ainda requer cargas muito grandes para sua observação mais simplificada, que recaem no uso de aparelhos (tubulações, por exemplo) de grande altura. O equipamento TRI-FLEX, por conta de sua vedação e capacidade de fornecer grandes pressões ao corpo de prova considerado, torna-se assim mais apropriado para ensaios de permeabilidade com materiais mais finos, portanto com baixas porosidades, obtendo assim resultados com mais rapidez e precisão. Além disso, é possível sua utilização para diferentes permeantes, ou seja, permite a análise da passagem de diferentes tipos de líquidos e gases no corpo de prova, que por sua vez não necessariamente precisa apresentar formato regular, podendo se apresentar de qualquer formato e obtido de qualquer tipo de amostra (bloco, shelby, anel metálico, corpo de prova de ensaio proctor), desde que seja possível que este seja envolto por membrana emborrachada e possa ser colocado adequadamente no cilindro onde se executa o ensaio.

Nele, monta-se o corpo de prova, geralmente utilizando-se o corpo de prova do ensaio proctor na umidade ótima (ou outra umidade desejada) diretamente, sendo este depois posicionado sob base e topo de material plástico resistente e impermeável, dotados furos onde se conectarão os tubos para a passagem do permeante. Depois, envolve-se essa estrutura com espécie de invólucro cilíndrico de látex, tomando-se cuidado para manter a estanqueidade do corpo, já que este é então posicionado no cilindro de ensaio, conectado com os tubos em posição indicada no aparelho, e então terá o cilindro do ensaio será preenchido com água confinante externa, buscando sempre evitar a presença de bolhas dentro do corpo de prova e dentro da água confinante.

Figura 17 - Equipamento TRI-FLEX



Fonte: Autora

Após a estrutura ser montada, segue-se ao ensaio, ativando-se eletronicamente que valores de pressão devem colocados sobre o corpo. Após isso, ativam-se os mecanismos de passagem de água do corpo, de forma a permitir sua saturação (em caso de ensaio saturado; caso contrário, ignora-se esta etapa). A depender do caso, recomenda-se a espera de pelo menos 24h para a inicialização do ensaio, evitando a presença de ar no corpo e permitindo a sua saturação de forma homogênea.

Então, se ativa a passagem de água pelo corpo de prova, marcando o tempo para a passagem de determinado volume de água, repetindo-se ao menos 3 vezes. Esses valores são então anotados, tirando-se a média, para permitir posteriormente o cálculo da permeabilidade do solo, como exemplificado a seguir:

Ex.:

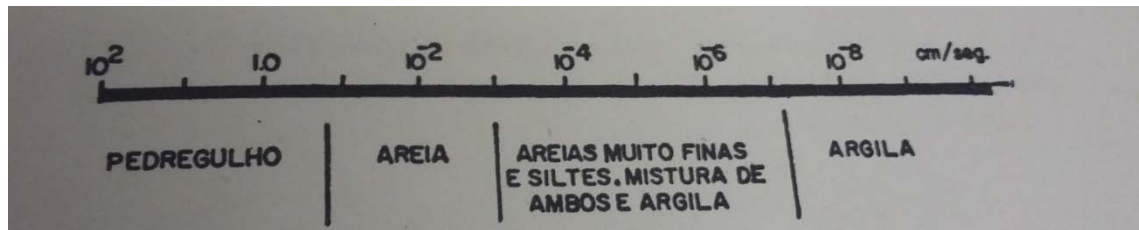
*Média = 26,78 s*

*Área da base do corpo: 84,9 cm<sup>2</sup> Diferença de altura d'água: 90cm h: 10,9cm*

$$k = \frac{h \cdot (Vol \text{ do corpo})}{(Área \text{ da base}) \cdot (Tempo \text{ médio}) \cdot (Diferença \text{ de altura})} = 5,3 \cdot 10^{-3}$$

[cm/s].

Figura 18 - Escala de permeabilidade a água esperada para tipo de material



Fonte: PINTO (2006).

É importante também lembrar que os valores de permeabilidade de solo obtidos em laboratório apresentam certa confiança, mas devem ser analisados criticamente, tomando-se em conta como o solo se encontra em campo. Além disso, o solo pode apresentar características anisotrópicas, que podem provocar disparidades entre os valores obtidos a depender das condições locais e disposição dos materiais, além da granulometria do solo, de forma que se recomenda a utilização de corpos de prova obtidos de amostras não-amolgadas de campo, como blocos ou tubos shelby.

Esse ensaio mesmo que permita a utilização de diferentes permeantes, devem ser tomadas as devidas precauções quanto a possibilidade de danificar a estrutura interna do equipamento, podendo ser utilizado um recipiente em separado para conter este permeante, com a aplicação da pressão para dentro deste.

Este equipamento permite também a análise da permeabilidade do solo ao ar, parâmetro muito importante no caso estudado de camadas de cobertura, considerando a possibilidade de passagem de gases formados do corpo do aterro para a atmosfera. O ensaio é feito modificando-se o permeante para que este seja ar injetado a determinadas pressões estabelecidas (geralmente indo de 2 a 20kPa), e observando a vazão de saída deste por meio de aparelhos como rotâmetro (a passagem do ar é medida de observando a capacidade da vazão de fazer subir uma pequena esfera, de forma a mantê-la em equilíbrio em determinada altura no tubo, que é graduado pelo próprio fabricante de forma a fornecer a vazão correta). Em casos onde a vazão é muito reduzida e não se dispõe de rotâmetro com a graduação necessária, pode-se utilizar o equipamento fluxímetro, que consiste em um tubo capaz de medir a vazão do gás através da passagem de bolhas por duas marcas no equipamento com um volume de 25ml ( $r=1,44\text{cm}$  e  $h=15,35\text{cm}$ ), onde a formação das bolhas é viabilizada pela presença de detergente no tubo, que também permite a eliminação do atrito para que as bolhas formadas não venham a estourar. Então, insere-se os valores correspondentes na fórmula de forma a obter o valor da permeabilidade ao ar em determinadas condições de confinamento:

$$K_{ar} = \frac{q \times L}{A \times \Delta p}$$

Onde:

$K_{ar}$  = Permeabilidade ao ar (m/h)

$q$  = Vazão (Nm<sup>3</sup>/h)

$A$  = Área (m<sup>2</sup>)

$L$  = comprimento da amostra (m)

$\Delta p$  = gradiente de pressão (m), considerando  $\gamma_{ar} = 0,012 \text{ kN/m}^3$

Por fim, ainda destaca-se a possibilidade de se executar análise de permeabilidade horizontal ao se moldar o corpo de prova de uma seção horizontal do corpo de prova original. Nota-se a importância da análise da permeabilidade horizontal em nosso caso, pois, tal como afirmado por Pinto (2000), a permeabilidade horizontal tende a ser sempre superior a permeabilidade vertical, o que pode vir a permitir fluxos de gases de aterro horizontalmente, não passando pela totalidade da camada de cobertura, podendo assim não serem corretamente oxidados.

### 3.1.7 Ensaio de cisalhamento direto (saturado e na umidade natural)

Buscando-se obter valores relativos as tensões de cisalhamento do material em relação a cargas verticais confinantes, executa-se este ensaio, tomando-se corpos de prova com área de superfície 2x2 ou 4x4 polegadas. Esses pequenos paralelepípedos são obtidos da mesma forma que o cilindro para os ensaios de adensamento, cravando-se em amostras de solo.

Após sua retirada, monta-se a estrutura como mostrado a seguir:

Figura 19 - Montagem do ensaio de cisalhamento



Fonte: Autora

---

Segue-se então para o ensaio. Primeiramente, é necessário definir os parâmetros de funcionamento da máquina, a depender do corpo de prova e outras configurações indicadas pelo fabricante. Depois, escolhe-se o tipo de ensaio a ser feito: o corpo de prova pode ser previamente saturado, visando a obtenção de sua resistência ao cisalhamento saturado, ou não, podendo estar na umidade ótima (obtido de um proctor, por exemplo), ou ainda na umidade real de campo (solo obtido de tubo shelby ou bloco). Pode-se também escolher quanto ao seu adensamento, podendo o corpo de prova ser adensado previamente ao ensaio por meio da introdução de pesos previamente calculados. Muitas vezes, opta-se pela realização do ensaio com a utilização de diferentes pesos. Cada vez que se efetua o adensamento, deve-se fazer medidas com relação ao tamanho do corpo de prova por meio de medições no extensômetro.

Por fim, segue-se ao ensaio propriamente dito, onde retiram-se os parafusos que fecham a estrutura com o corpo de prova e inicia-se o funcionamento da máquina. Ela irá, em velocidade previamente estabelecida, "empurrar" a parte de cima da "caixa" com o corpo de prova, sendo esse movimento acompanhado pelo movimento do extensômetro posicionado para medições horizontais. A partir de valores pré-fixados nesse extensômetro, fazem-se medições nos extensômetros vertical (que medirá a deformação vertical do corpo de prova submetido ao esforço) e aquele posicionado dentro do anel de tensão, onde a partir dos valores obtidos nesse extensômetro e com a utilização de uma constante do anel (obtida pelo fabricante), pode-se determinar a que tensão o corpo estava sujeito, valendo observar que após o rompimento do corpo de prova o valor do extensômetro do anel tende a apresentar valores menores com o tempo. Assim, pode-se observar em que valor mais exato ocorreu o cisalhamento do corpo de prova, determinando assim sua tensão máxima de cisalhamento.

Após isso, os valores de expansão ou compressão vertical, cargas horizontal e vertical aplicadas, pode-se montar gráficos relacionando esses valores, obtendo relações entre eles para o material considerado.

Como observado na montagem do solo convencional mostrado acima, a base utilizada para o ensaio consiste em uma chapa metálica com furos que permitam a saída de ar e líquido, permitindo a compressão do solo sob a ação das cargas verticais aplicadas durante o ensaio.

### 3.1.8 Ensaio triaxial

Este ensaio tem como objetivo fundamental a obtenção da resistência do solo quando submetido a determinada tensão, estando ele confinado por uma tensão confinante.

Nele, a partir de um corpo de prova de ensaio proctor, molda-se um corpo de prova cilíndrico manualmente, tomando como referência para as medidas das bases uma peça cilíndrica (que fará parte da montagem do corpo de prova para o ensaio).

Figura 20 - Moldagem de corpo de prova para ensaio triaxial



Fonte: Autora

A partir de um proctor, é interessante a montagem do maior número possível de corpos para ensaiar, podendo assim comparar os resultados obtendo valores médios. Entretanto, essa capacidade de se moldar mais ou menos corpos está geralmente ligado ao tipo de solo, que permite ou não uma melhor trabalhabilidade na hora de se moldar os corpos de prova, já que em corpos com menor trabalhabilidade (como arenosos), utiliza-se geralmente maior volume inicial para moldagem, evitando chances de rompimentos e surgimento de fissuras na moldagem.

Após isso, segue-se para a montagem do corpo de prova como mostrado a seguir:

Figura 21 - Montagem do ensaio triaxial



Fonte: Autora

Figura 22 - Ensaio triaxial montado



Fonte: Autora

É importante destacar que a membrana elástica deve ser sempre bem vedada com o auxílio das ligas elásticas, evitando assim que a água utilizada para confinamento interfira internamente ao corpo, falseando os valores da água presente internamente. Além disso, recomenda-se que ao longo do ensaio adote-se uma única marca da membrana utilizada, evitando-se assim alterações nos valores em decorrência de diferenças de permeabilidade e fixação ao corpo.

Para o ensaio, deve-se regular a máquina segundo velocidade utilizada no ensaio, seguindo-se as recomendações para cada material ensaiado.

Após isso, inicia-se a máquina, fazendo anotação dos valores obtidos no extensômetro do anel de tensão em valores determinados de tempo, observando-se assim a tensão máxima suportada pelo solo naquela tensão confinante.

O ensaio pode ser efetuado para diferentes tensões confinantes, obtendo-se assim diferentes valores de tensão axial máxima. Além disso, é possível se efetuar o ensaio com o corpo de prova saturado ou não, e drenado ou não, pela ativação de partes do sistema, além de permitir ainda o resultado da resistência após adensamento, sendo necessário apenas manter o corpo em determinadas tensões confinantes por algum tempo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Agora, apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios mencionados na seção de metodologia anterior, procurando elaborar comparações entre as proporções estudadas, e o material de solo puro já originalmente utilizado em aterros sanitários, procurando assim, observar a viabilidade dessas misturas como camadas de coberturas oxidativas funcionais.

Foram executados assim, os seguintes ensaios:

Tabela 1 - Resumo de ensaios realizados

| Ensaio                                                   | Número de ensaios realizados                           | Materiais ensaiados                                                                       |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Granulometria (Peneiramento e Sedimentação)              | 4 (um deles obtido a partir de estudos anteriores)*    | Solo puro, Composto Orgânico, Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume |
| Limites de plasticidade e liquidez                       | 6 (dois deles obtidos a partir de estudos anteriores)* | Solo puro, Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume                    |
| Ensaio de compactação proctor normal                     | 3                                                      | Solo puro, Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume                    |
| Ensaio de compressibilidade                              | 6                                                      | Solo puro, Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume                    |
| Ensaio de cisalhamento direto                            | 3                                                      | Solo puro, Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume                    |
| Ensaio triaxial                                          | 2                                                      | Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume                               |
| Ensaio de permeabilidade com uso de equipamento TRI-FLEX | 8 (dois deles obtido a partir de estudos anteriores)*  | Solo puro, Misturas em proporções 1:1 e 2:1 de solo:composto em volume                    |

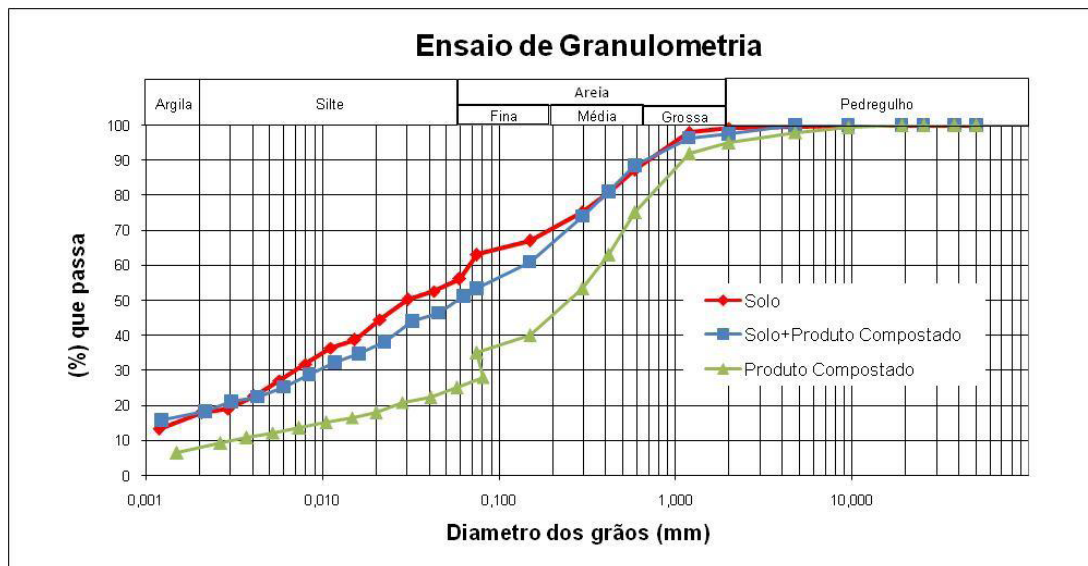
\*Parâmetros obtidos de ensaios realizados no mesmo laboratório e com mesmo material de Solo Puro usado nesta pesquisa, feitos por Costa (2015).

Fonte: Autora

### 4.1 Granulometria e limites de liquidez e plasticidade

Considerando o solo puro, por ser o mesmo material usado anteriormente por Costa (2015), considera-se a sua análise do material para estudo (solo):

Gráfico 1 - Granulometria do solo utilizado



Fonte: COSTA (2015)

Tabela 2 - Granulometria do solo utilizado em porcentagens

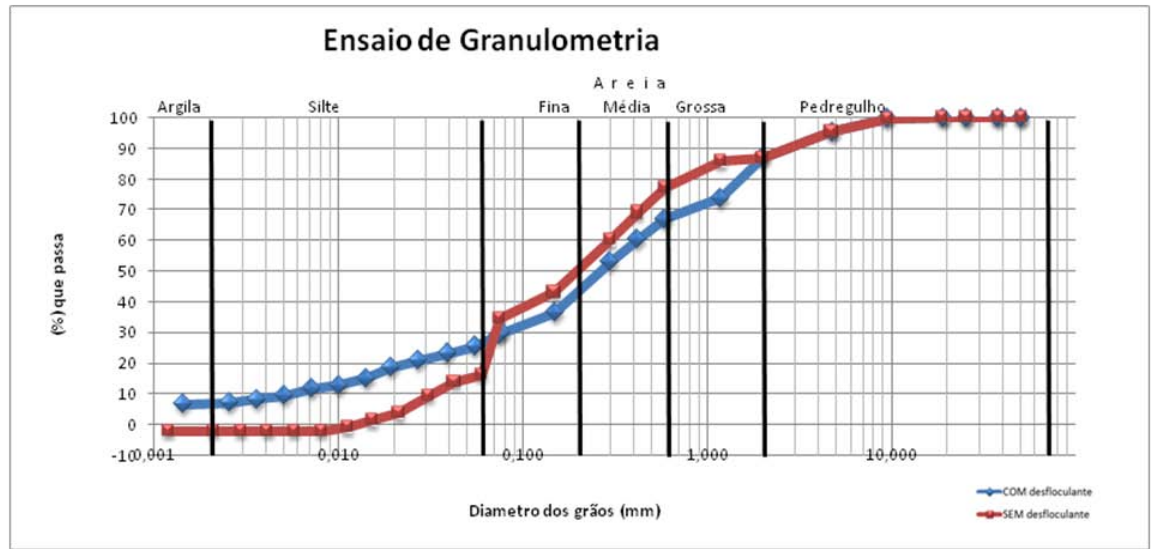
| Análise                            |               | Solo  |
|------------------------------------|---------------|-------|
| Granulometria                      | %Argila       | 17,63 |
|                                    | %Silte        | 38,58 |
|                                    | %Areia fina   | 13,68 |
|                                    | %Areia média  | 17,63 |
|                                    | %Areia grossa | 11,64 |
|                                    | %Pedregulho   | 0,84  |
|                                    | %>0,075mm     | 63,14 |
| Índice de Consistência             | %LL           | 49,78 |
|                                    | %LP           | 33,16 |
|                                    | %IP           | 16,62 |
| Massa Específica dos Grãos (g/cm³) |               | 2,72  |
| Classificação Unificado            | Sistema       | ML    |

Fonte: COSTA (2015)

Sendo assim o material observado como um silte de baixa compressibilidade, com pequena porcentagem de argila, condizente com o que se utiliza nos aterros sanitários convencionais.

Já para o composto recolhido:

Gráfico 2 - Granulometria do composto utilizado



Fonte: Autora

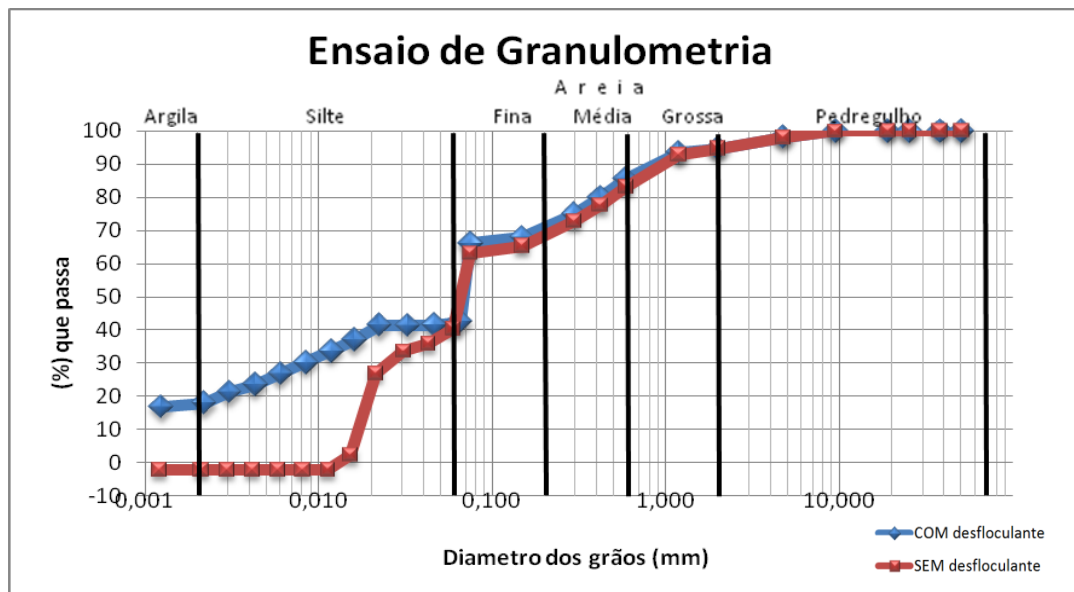
Mostrando uma presença bem mais efetiva de areia em sua composição, sendo classificado segundo a classificação unificada como SM (areia siltosa).

Ainda para o ensaio de densidade com o picnômetro, houve extrema dificuldade para sua realização, devido ao material orgânico principalmente advindo de madeira, que apresentava flutuação. Mesmo assim, foi possível a determinação da densidade dos grãos chegando a um resultado de 2,181 g/cm<sup>3</sup>.

Já para as misturas:

- 1:1

Gráfico 3 - Granulometria da mistura de solo e composto em 1:1 (volume)



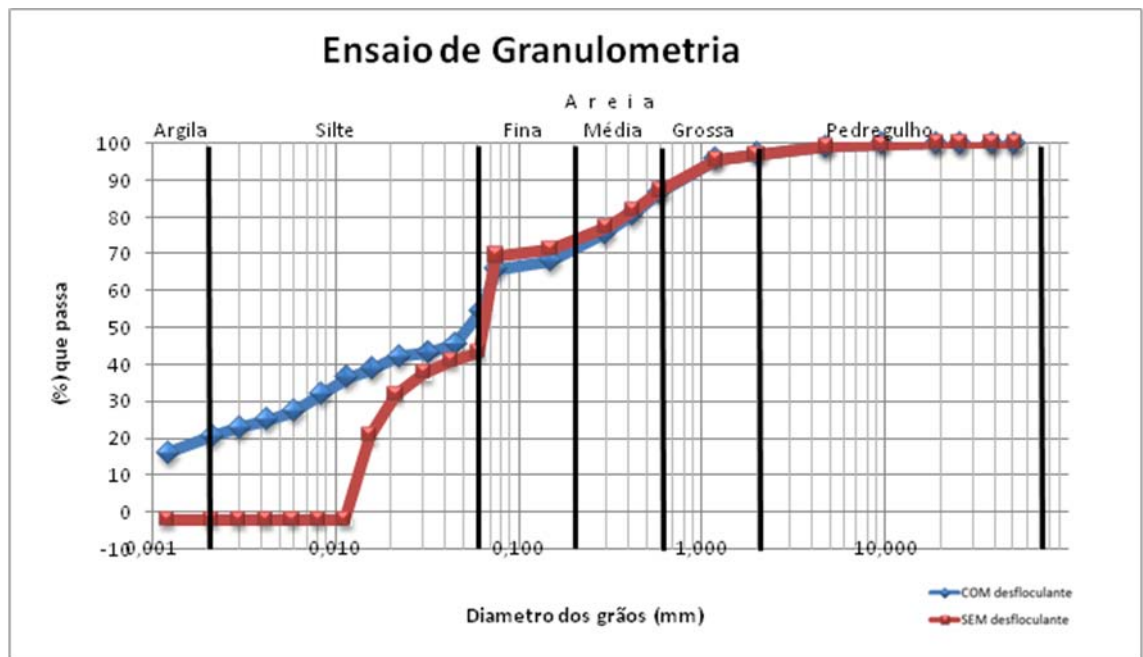
Fonte: Autora

Assim, observa-se mais uma vez pronunciada presença de areia e silte na composição, mas já com presença da argila proveniente do solo puro, sendo classificado segundo a classificação unificada como ML (silte de baixa compressibilidade). Da mesma forma, a influencia do solo também surge quando consideramos a densidade real dos grãos, de 2,541 g/cm<sup>3</sup>, já superior ao obtido no composto puro.

Já quanto aos limites, o limite de liquidez se encontra a 43,9 % de umidade, e o de plasticidade em 33,6%, resultando em um índice de plasticidade de 10,3%, mostrando que o material apresenta plasticidade bastante reduzida quando comparado ao solo puro.

- 2:1

Gráfico 4 - Granulometria da mistura de solo e composto em 2:1 (volume)



Fonte: Autora

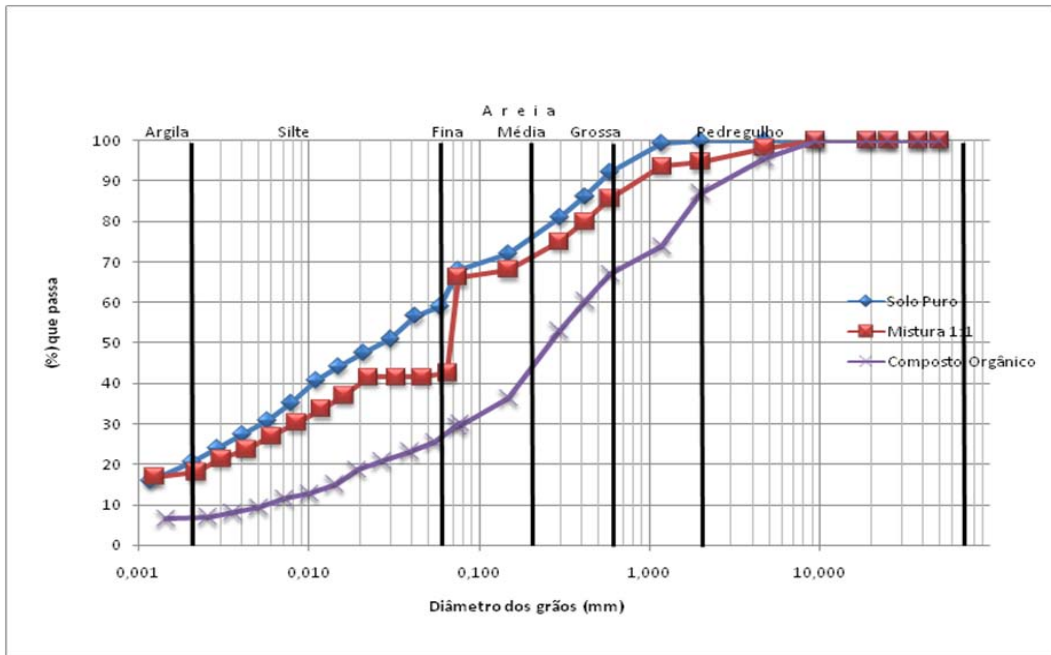
Nota-se semelhança notável com a granulometria da mistura de 1:1, com exceção de maior presença de material fino, provavelmente resultante da maior presença de solo puro na mistura, sendo mais uma vez classificado como ML.

Quanto a densidade, obteve-se 2,581 g/cm<sup>3</sup>, apenas sensivelmente maior que a mistura 1:1.

Quanto ainda aos limites de liquidez e plasticidade, obteve-se respectivamente os valores de 43,1% e 30,4%, com índice de plasticidade de 12,7%, mostrando mais uma vez a influência de mais material fino argiloso advinda da maior presença de solo puro na mistura, resultando em uma maior plasticidade.

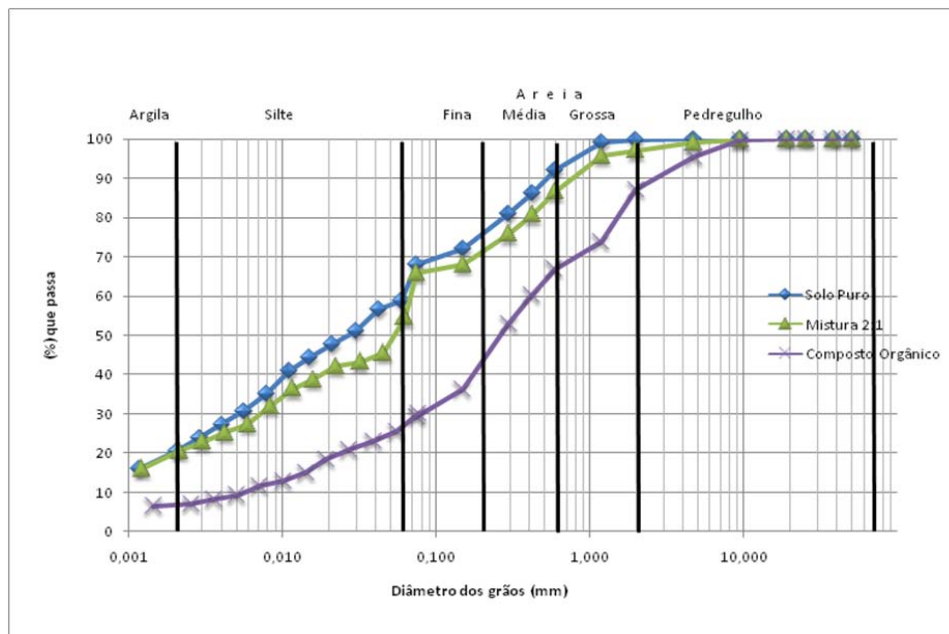
Comparativamente, ainda tem-se:

Gráfico 5 - Granulometria da mistura de solo e composto em 1:1 (volume) em comparativo com granulometrias de solo e do composto



Fonte: Autora

Gráfico 6 - Granulometria da mistura de solo e composto em 2:1 (volume) em comparativo com granulometrias de solo e do composto



Fonte: Autora

Observando comportamento esperado, onde as misturas possuem curvas granulométricas situadas entre as curvas de solo e composto, com a curva que apresenta mais solo, mais próximo a esta. Dessa forma, espera-se que o comportamento desta mistura se aproxime sensivelmente do comportamento esperado pelo solo, que se mostrou apropriado em campo, considerando suas porcentagens razoáveis de argila (que garante menor permeabilidade e capacidade de acompanhar os recalques apresentados após o início da decomposição dos resíduos no aterro) e silte (interessante para reduzir também a permeabilidade da camada por tamponamento de poros a medida que é carregado pela água de precipitações).

Lembrando ainda que, considerando que o composto orgânico se apresenta com bastante finos e mais baixa densidade, já esperava-se que os resultados das granulometrias obtidas nas misturas se mostrassem próximas ao observado na granulometria do solo puro, mais próximo que do composto, já que este se apresenta em menor massa na mistura.

Resumidamente, tem-se:

Tabela 3 - Resumo dos resultados de granulometria

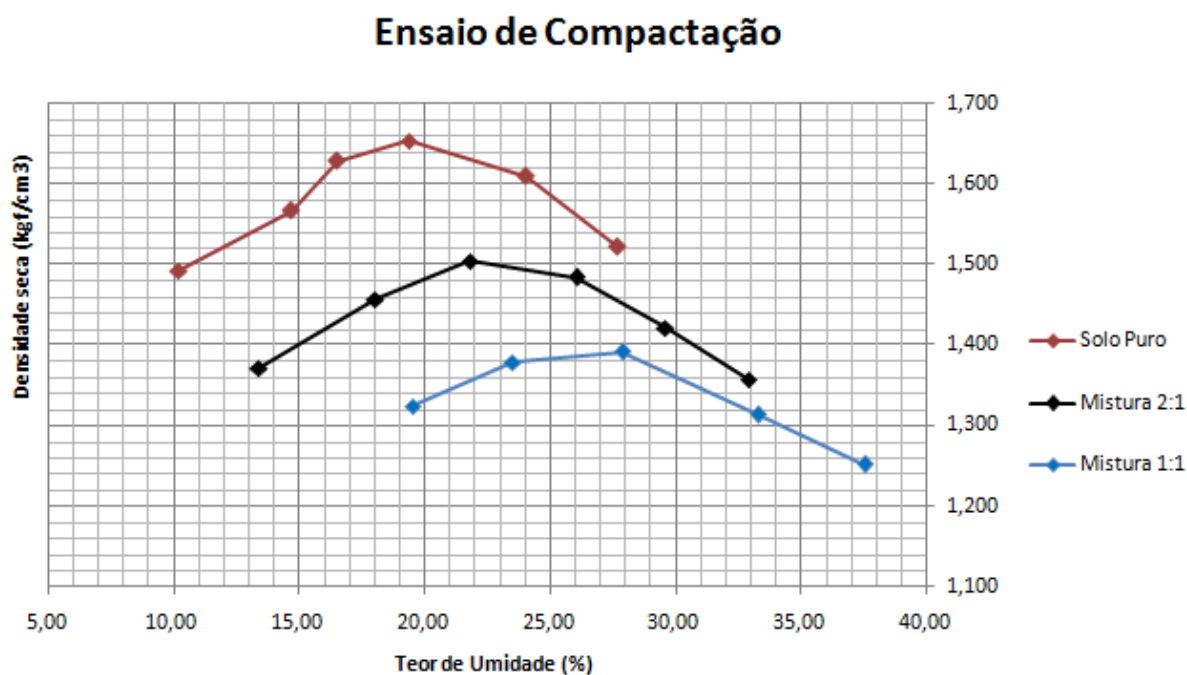
| Material                       | Solo Puro | Composto Orgânico | Mistura 1:1 | Mistura 2:1 |
|--------------------------------|-----------|-------------------|-------------|-------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,72      | 2,18              | 2,54        | 2,58        |
| Índice de plasticidade (%)     | 17        | NP                | 10          | 13          |
| Classificação unificada        | ML        | SM                | ML          | ML          |

Fonte: Autora

## 4.2 Compactação

Obteve-se na compactação:

Gráfico 7 - Gráficos da compactação do solo puro e das duas misturas



Fonte: Autora

Tabela 4 - Resultados da compactação

| Material    | Umidade Ótima (%) | Peso específico aparente seco (kgf/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| Solo Puro   | 20                | 1,660                                                |
| Mistura 2:1 | 23                | 1,506                                                |
| Mistura 1:1 | 26                | 1,396                                                |

Fonte: Autora

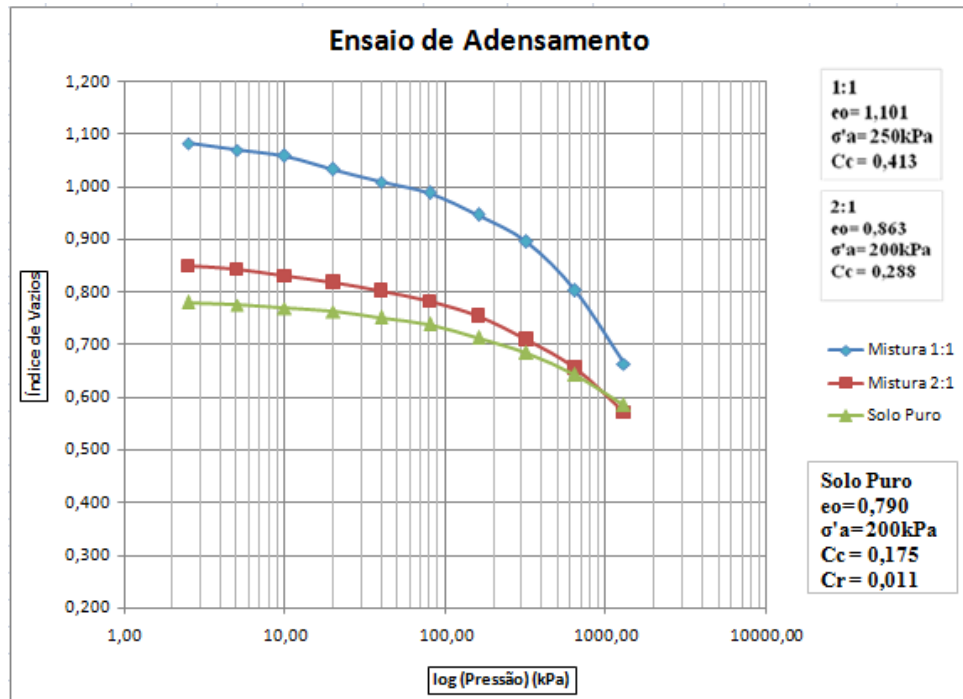
A presença da matéria orgânica se torna notável no ensaio, de forma que a medida que a porcentagem de matéria orgânica aumenta na mistura, menor se torna a densidade apresentada, e maior se torna a umidade ótima, mostrando a forte tendência deste material orgânico para retenção de umidade.

Da mesma forma, o formato das curvas mais aplainadas confirma a presença de granulometria mais fina e com presença de argila, que permite ganho ou perda menos elevada de densidade com as variações de umidade.

### 4.3 Adensamento

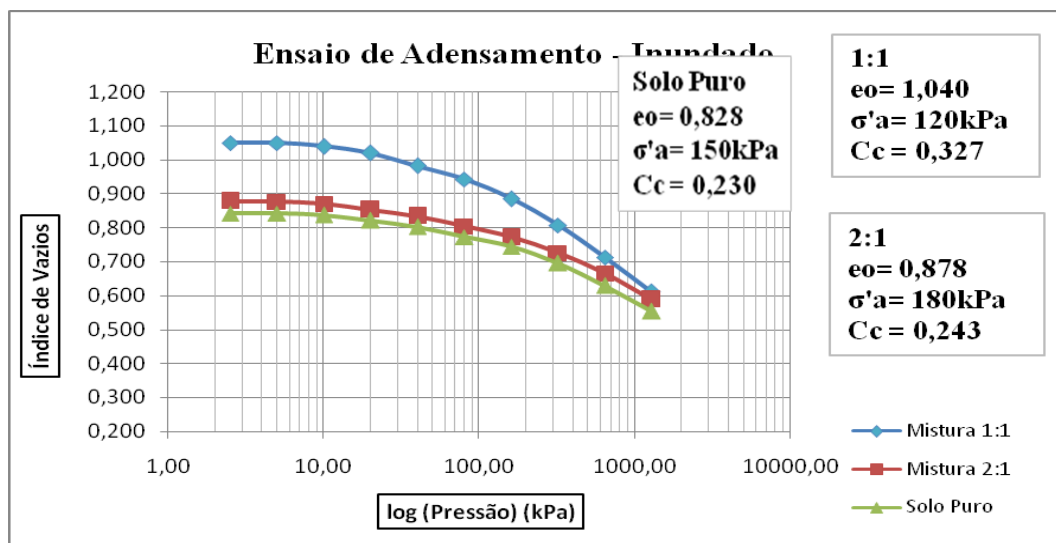
Para os ensaios de adensamento (ou compressibilidade) executado nas misturas, feitos em umidade ótima e inundados, obteve-se:

Gráfico 8 - Resultado de ensaio de adensamento das misturas e do solo puro



Fonte: Autora

Gráfico 9 - Resultado de ensaio de adensamento das misturas e do solo puro em situação inundada



Fonte: Autora

Observa-se assim, como esperado, que a mistura mais rica em matéria orgânica (1:1), apresenta maior índice de vazios, apresentando conseqüentemente maior adensamento ao longo do tempo devido ao aumento de carga.

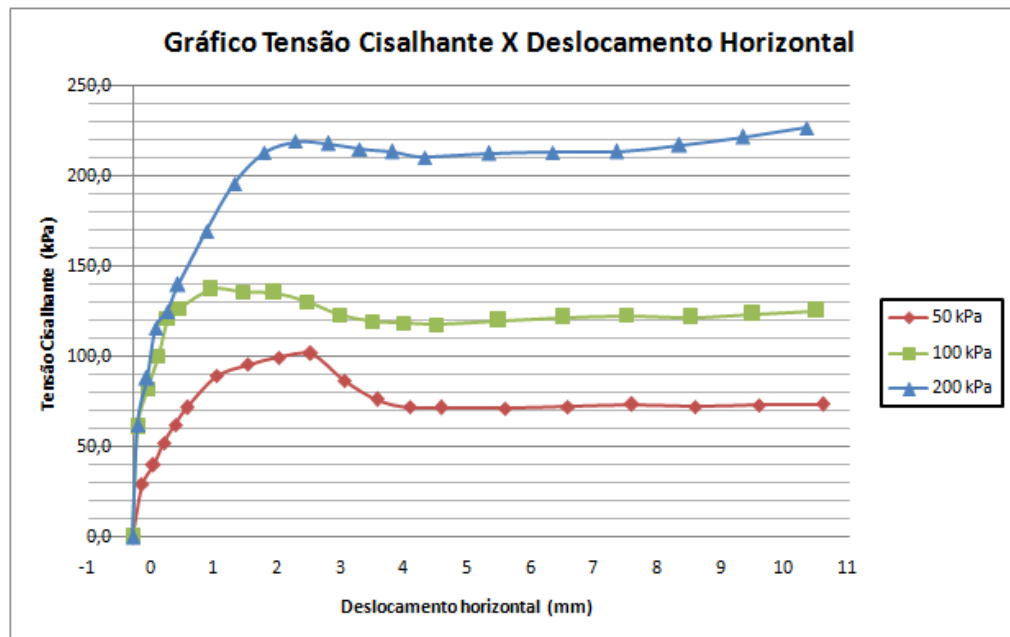
Além disso, com a saturação dos corpos de prova, observou-se uma redução no índice de vazios inicial do corpo de prova com mais matéria orgânica, provavelmente devido a um "inchamento" causado pela absorção de umidade por parte da matéria orgânica, recaindo em menos poros, que tendem a ser esvaziados com o aumento das cargas e conseqüente saída da água dos poros.

#### 4.4 Cisalhamento direto

Para o cisalhamento direto:

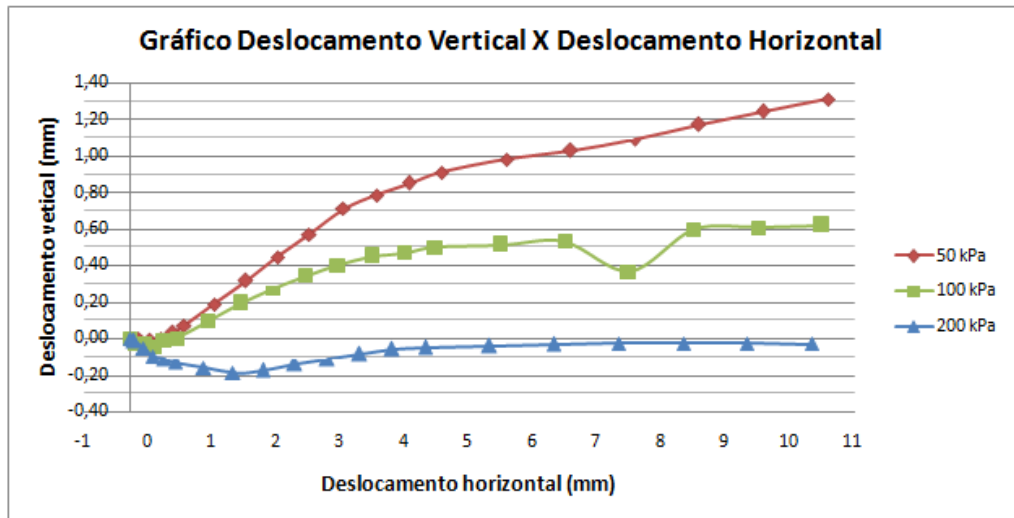
- Solo Puro

Gráfico 10 - Resultado de ensaio de cisalhamento do solo puro compactado em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deslocamento horizontal



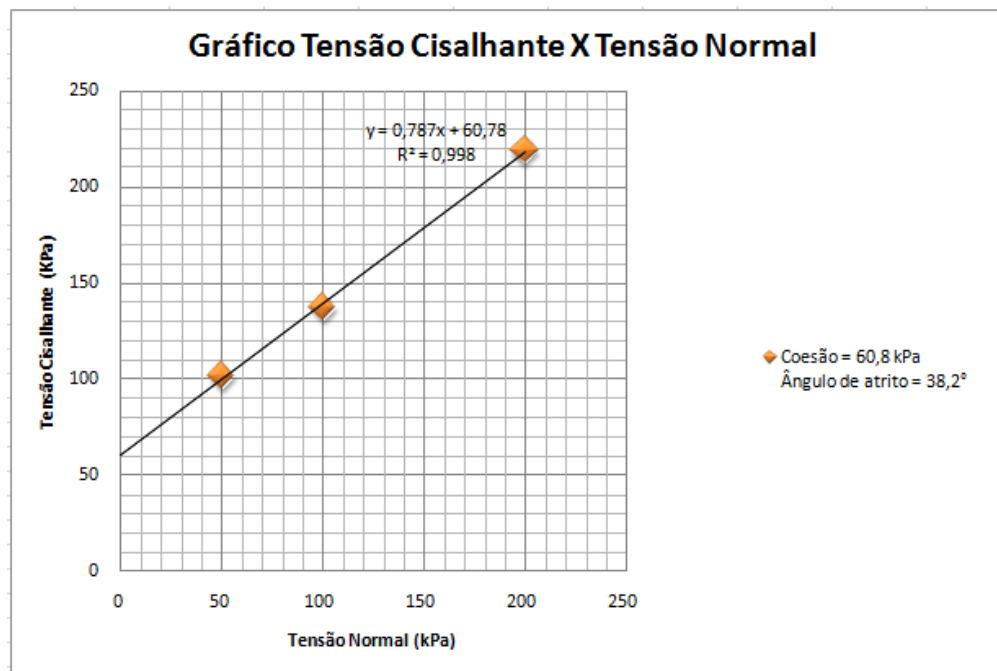
Fonte: Autora

Gráfico 11 - Resultado de ensaio de cisalhamento do solo puro compactado em umidade ótima, comparando deslocamento vertical e deslocamento horizontal



Fonte: Autora

Gráfico 12 - Resultado de ensaio de cisalhamento do solo puro compactado em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e tensão normal

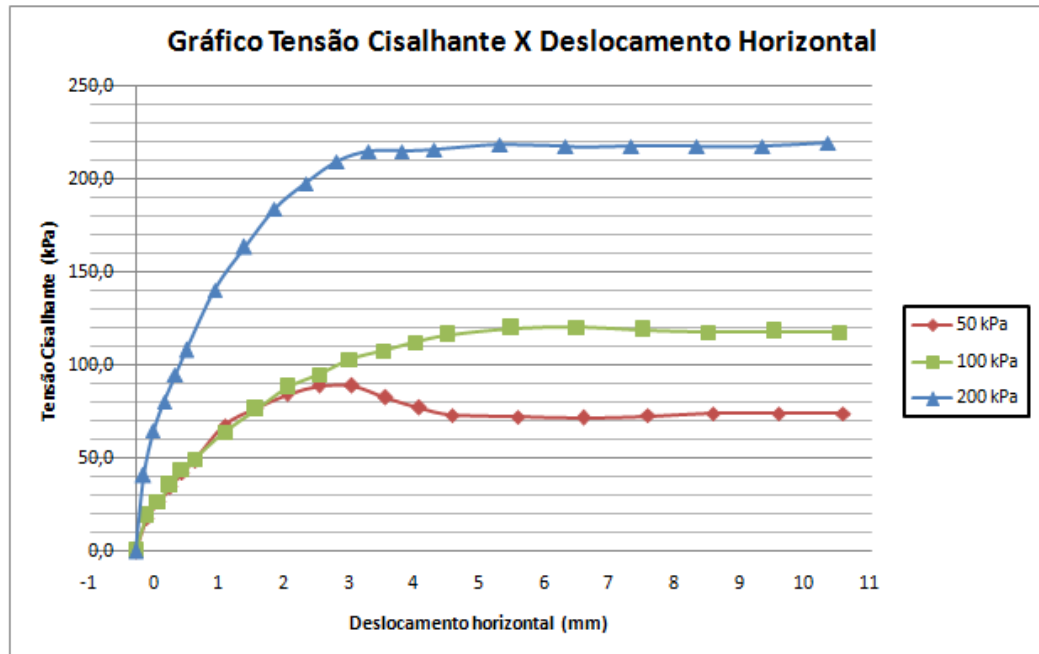


Fonte: Autora

Destaca-se assim, mais uma vez o solo argiloso presente, com boa coesão, mas com ângulo de atrito alto pela presença do silte e da areia em porcentagens razoáveis.

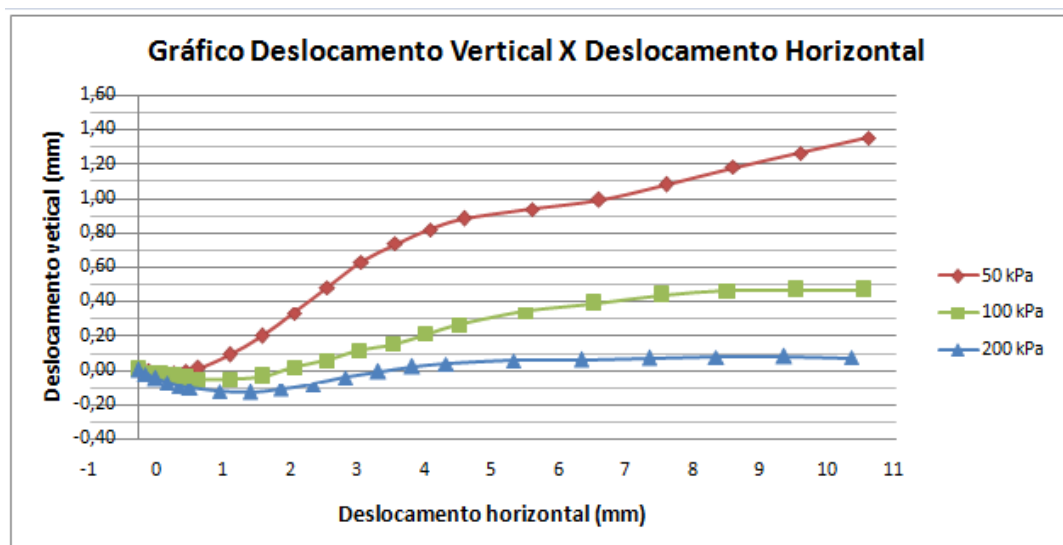
- 1:1

Gráfico 13 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deslocamento horizontal



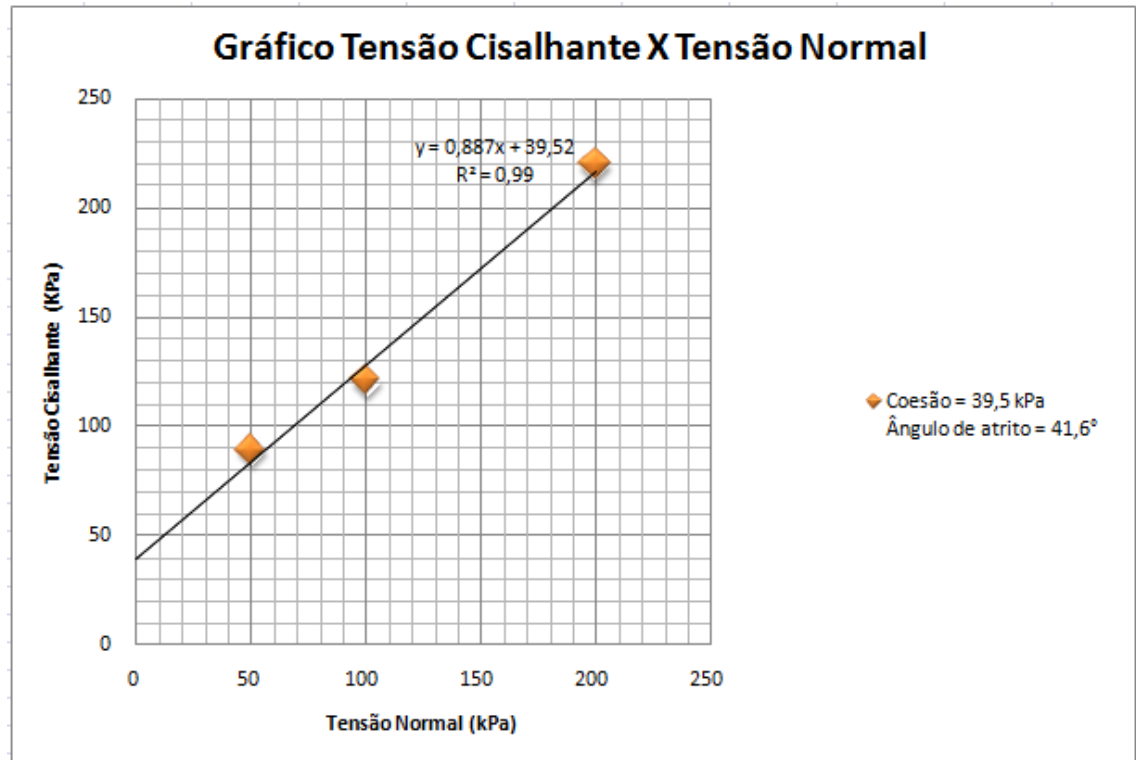
Fonte: Autora

Gráfico 14 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando deslocamento vertical e deslocamento horizontal



Fonte: Autora

Gráfico 15 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e tensão normal

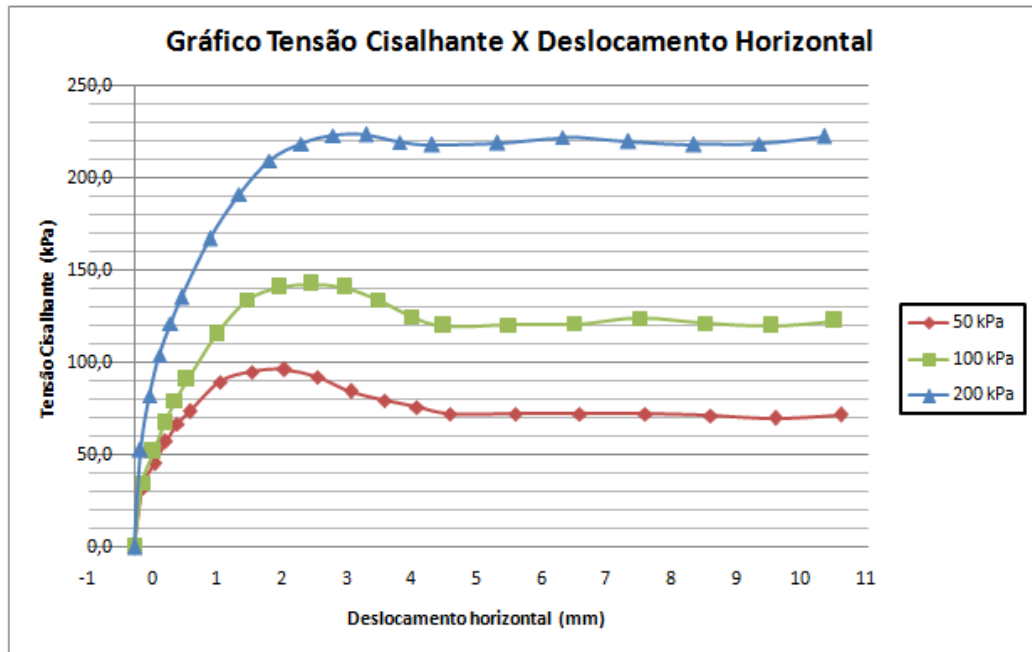


Fonte: Autora

Assim, observa-se que a associação dos materiais na proporção 1:1 proporcionou uma coesão razoável, com bom ângulo de atrito, tal como o solo puro, confirmando as expectativas de comportamento semelhante ao solo puro.

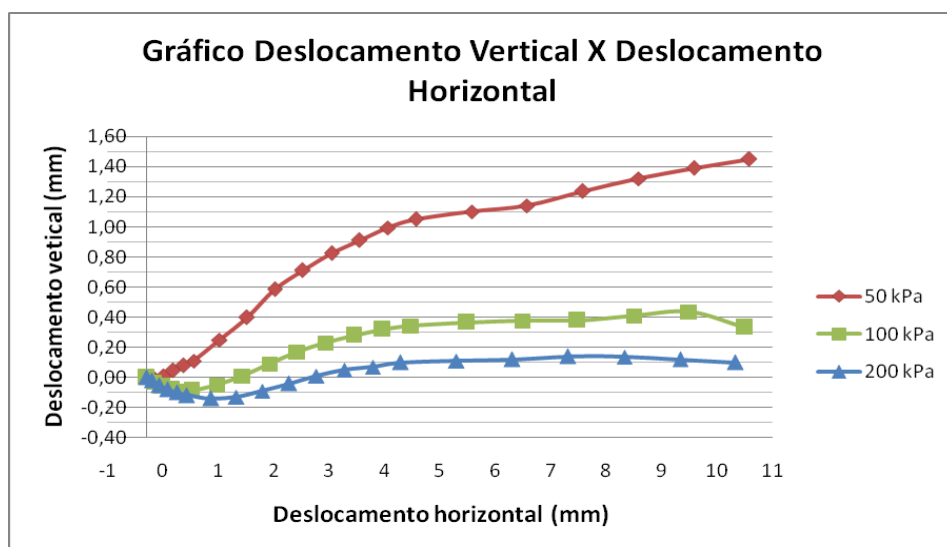
- 2:1

Gráfico 16 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deslocamento horizontal



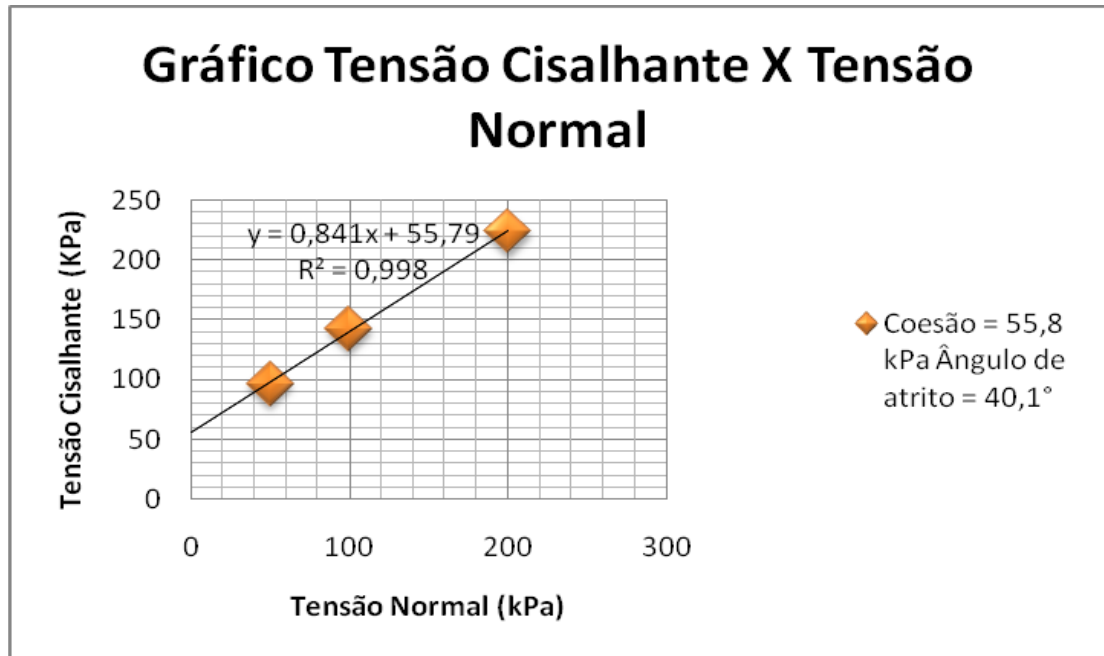
Fonte: Autora

Gráfico 17 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando deslocamento vertical e deslocamento horizontal



Fonte: Autora

Gráfico 18 - Resultado de ensaio de cisalhamento da mistura em razão 2:1  
(solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e  
tensão normal



Fonte: Autora

Nota-se assim, que com a maior presença do solo argiloso, houve um aumento na coesão apresentada pela mistura. Entretanto, com a redução da ação da areia mais presente no composto, o ângulo de atrito tendeu a decair, mesmo que minimamente, comprovado pela análise dos gráficos de deslocamento horizontal versus tensão cisalhante e deslocamento horizontal versus força vertical.

Resumidamente, tem-se:

Tabela 5 - Resumo de índices obtidos com ensaio de cisalhamento direto

| Material         | Solo Puro | Mistura 1:1 | Mistura 2:1 |
|------------------|-----------|-------------|-------------|
| Coesão (kPa)     | 60,8      | 39,5        | 55,8        |
| Ângulo de atrito | 38,2°     | 41,6°       | 40,1°       |

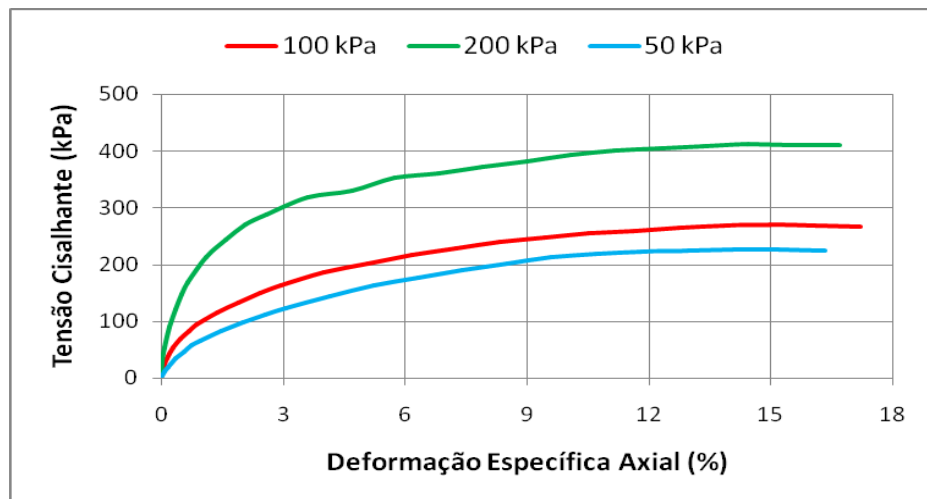
Fonte: Autora

#### 4.5 Ensaio triaxial

Para o ensaio triaxial, obteve-se:

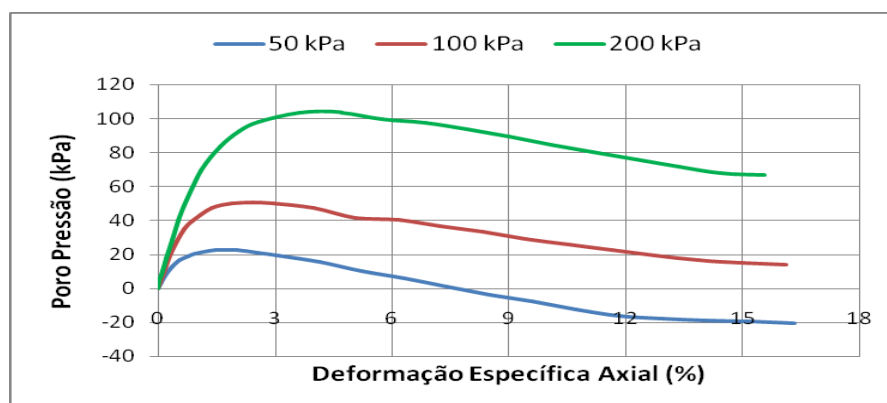
- 1:1

Gráfico 19 - Resultado de ensaio triaxial CIU (material compactado e não drenado) da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deformação axial



Fonte: Autora

Gráfico 20 - Resultado de ensaio triaxial CIU da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando poro pressão e deformação axial

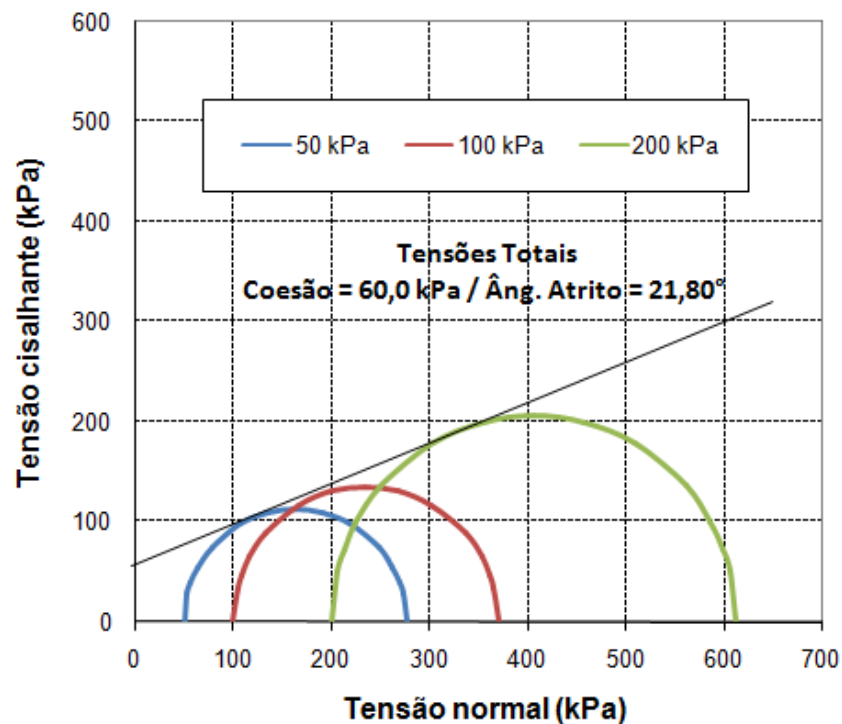


Fonte: Autora

Mostrando uma natural tendência a um aumento de vazios passíveis de serem preenchidos com água e sofrer a ação da poropressão em menores pressões confinantes. Também uma tendência natural de que, com o aumento da tensão confinante, maiores são as cargas verticais suportadas antes do cisalhamento. Além disso, sem a definição de um plano de cisalhamento pré determinado nem a restrição a deformação horizontal como no cisalhamento direto, ouve uma perda sensível de resistência do corpo de prova analisado.

Analisando agora por meio da elaboração dos círculos de Mohr:

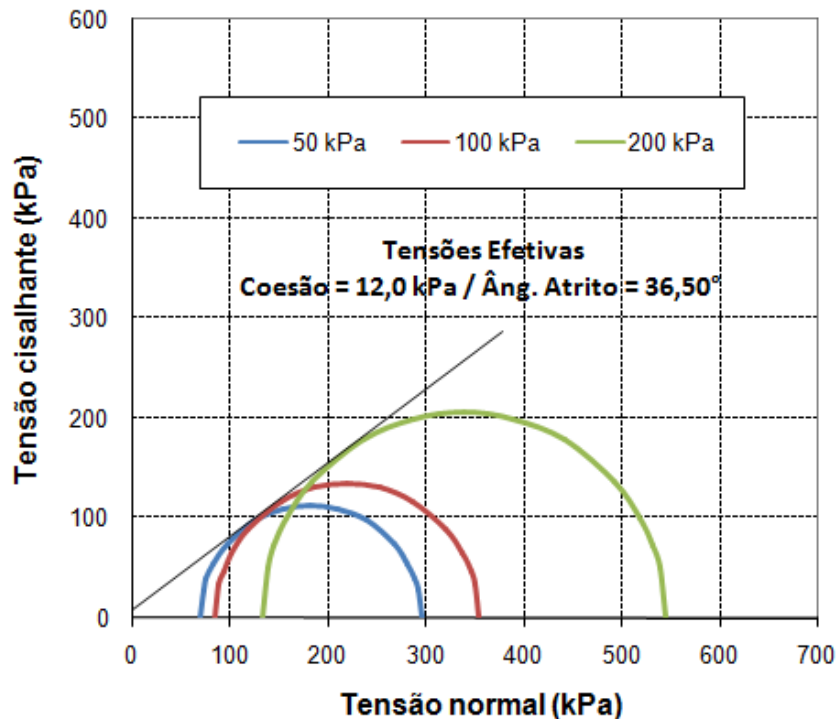
Gráfico 21 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões totais



Fonte: Autora

Já analisando agora as tensões efetivas (ou seja, na ausência de poropressões):

Gráfico 22 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 1:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões efetivas

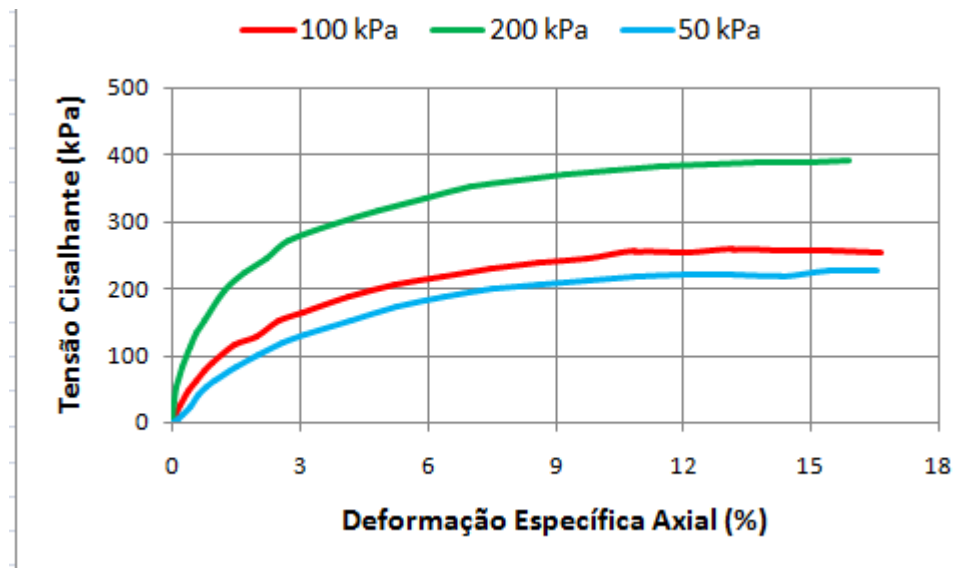


Fonte: Autora

Desta vez, sem a definição de uma superfície de ruptura única e com menor área de contato restringindo o corpo de prova a ser ensaiado, a coesão apresentada pela mistura com a influência da poropressão foi bem superior a observada no ensaio de cisalhamento, associado ainda a um menor ângulo de atrito. Assim, em termos de tensões efetivas, a coesão apresentou forte queda, o que é esperado pelo deslocamento dos semicírculos de tensão para a esquerda (que não são idênticas devido a variação da poropressão pelo aumento da pressão axial), inclinando a reta da superfície de ruptura, podendo-se ainda associar o resultado as possíveis fibras provindas do composto orgânico (observadas visualmente durante os ensaios), que, além de absorver água, permitia a presença de poros que também armazenavam água, a ponto de provocar aumento na poropressão de forma a diferenciar tão bruscamente os resultados em termos de tensões totais e efetivas.

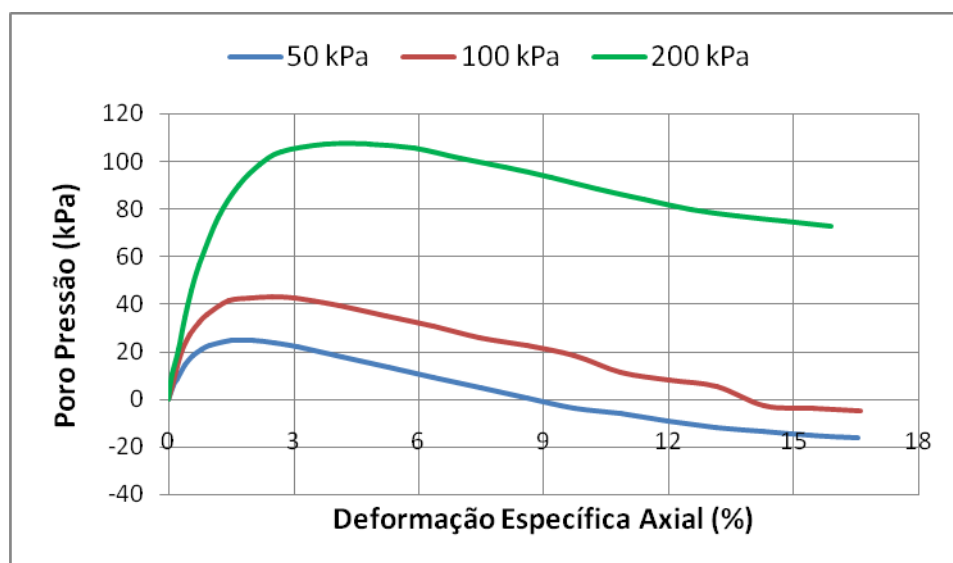
- 2:1

Gráfico 23 - Resultado de ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando tensão cisalhante e deformação axial



Fonte: Autora

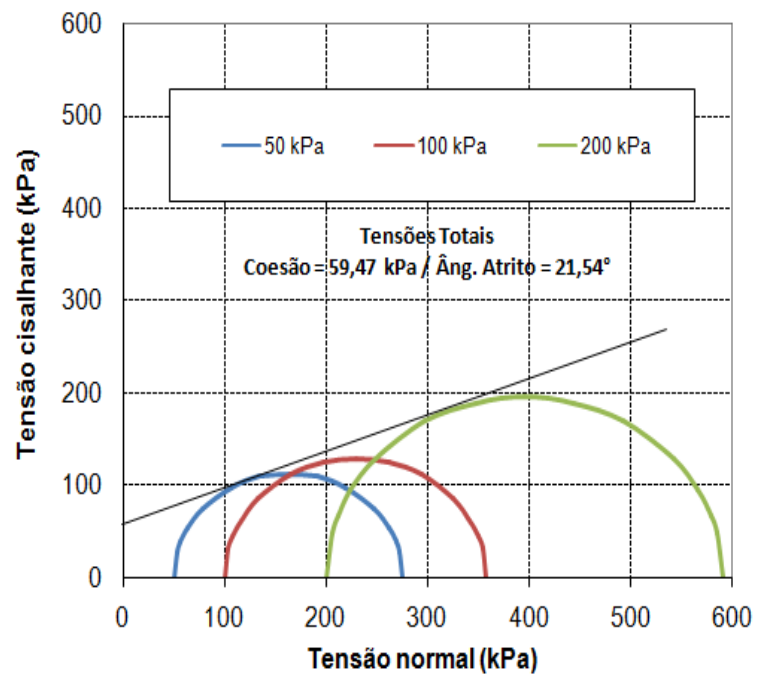
Gráfico 24 - Resultado de ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima, comparando poro pressão e deformação axial



Fonte: Autora

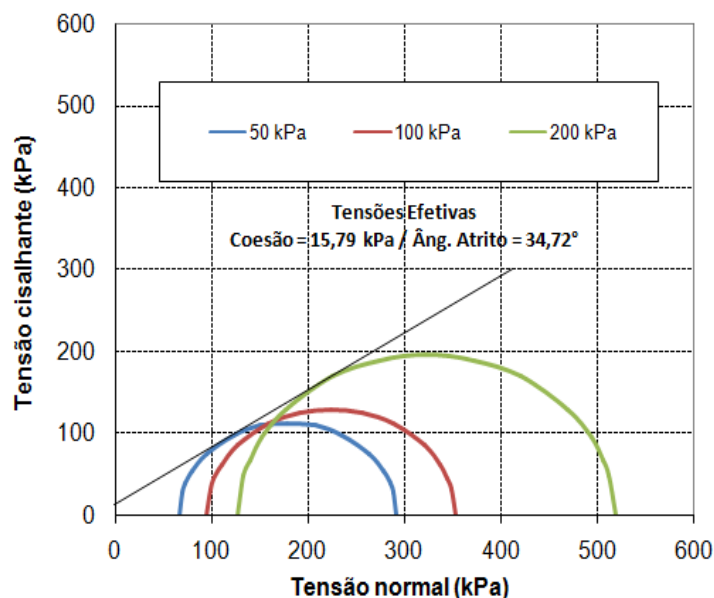
Quanto as envoltórias de Mohr:

Gráfico 25 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões totais



Fonte: Autora

Gráfico 26 - Envoltória de Mohr feita a partir do ensaio triaxial CIU da mistura em razão 2:1 (solo:composto em volume) compactada em umidade ótima considerando tensões efetivas



Fonte: Autora

Mais uma vez se observa decréscimo na coesão observada com a retirada da poropressão, como esperado, além das diferenças existentes entre os resultados obtidos no triaxial em detrimento ao obtido no cisalhamento direto. Observa-se assim, como se deve ter cautela quanto aos resultados obtidos no cisalhamento direto, já que este apresenta seção de cisalhamento preferencial e base rígida que impede maiores deformações, podendo provocar resultados superestimados, devendo-se assim, se ter maior confiabilidade nos resultados obtidos pelo ensaio triaxial.

Além disso, confirmamos mais uma vez a similaridade existente entre as duas proporções estudadas, com apenas sensível aumento nos valores de coesão e redução no ângulo de atrito.

Resumidamente:

Tabela 6 - Resumo de índices obtidos com ensaios triaxiais

| Material                            | Mistura 1:1 | Mistura 2:1 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Coesão (kPa)                        | 60,0        | 59,47       |
| Coesão (tensões efetivas) (kPa)     | 12,0        | 15,79       |
| Ângulo de atrito                    | 21,80°      | 21,54°      |
| Ângulo de atrito (tensões efetivas) | 36,50°      | 34,72°      |

Fonte: Autora

## 4.6 Permeabilidade

Para permeabilidade, foram ensaiadas as misturas nas proporções 1:1 e 2:1 (solo:composto volumetricamente) obtidas por meio de proctor feito na umidade ótima.

Para permeabilidade a água, obtivemos:

Tabela 7 - Valores de permeabilidade á água obtidos

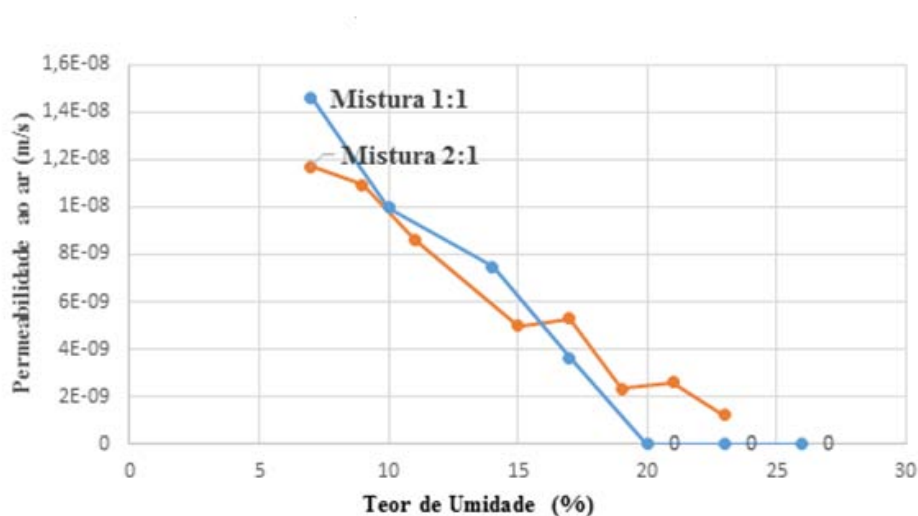
| Material             | Solo Puro (Costa, 2015) | Mistura 1:1          | Mistura 2:1         |
|----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|
| Permeabilidade (m/s) | $4,2 \cdot 10^{-9}$     | $2,77 \cdot 10^{-9}$ | $5,6 \cdot 10^{-9}$ |

Fonte: Autora

Dessa forma, apesar da variação no teor de matéria orgânica e porosidade da mistura, não se observou mudança significativa na permeabilidade do material. Além disso, os valores obtidos estão em conformidade com o material de solo puro já utilizado em camadas de cobertura convencionais, e com a norma internacional da USEPA (2004), que indica uma permeabilidade máxima indicada de  $10^{-7}$  m/s, de forma a evitar excesso de percolação de água provinda das chuvas.

Para permeabilidade ao ar, os corpos de prova passaram por ensaio inicialmente na umidade ótima, e então eram postos para secar, e então eram ensaiados novamente, permitindo assim a elaboração de análise da variação da permeabilidade ao ar com a diminuição da umidade do corpo de prova. Essa forma de análise, apesar de não considerar uma mudança na disposição das partículas do solo que se obteria caso os corpos de prova fossem diretamente compactados nas diferentes umidades analisadas, ainda apresenta validade por representar a situação justamente de uma camada de cobertura compactada em umidade ótima e que agora apenas se apresenta sobre a ação dos intempéries externos (sol e chuva), sem modificações de carregamento com o fechamento do aterro.

Gráfico 27 - Permeabilidade ao ar das misturas com variação de umidade



Fonte: Autora

Nota-se que o comportamento das misturas mostrou-se semelhante, com valores sempre em mesma ordem de grandeza ( $10^{-9}$  a  $10^{-8}$  m/s), condizente também com o obtido para o solo puro utilizado previamente, que foi de  $10^{-9}$  m/s (Costa, 2015), com diferença observada apenas em torno dos 7% de umidade, onde a mistura 1:1 mostra uma tendência de permeabilidade crescente mais expressiva, o que é esperado pela maior presença de poros observada nessa mistura, tanto no ensaio de compactação como de adensamento, justificada pela maior presença de matéria orgânica na mistura. Entretanto, considerando a análise dos valores em si, ambas as misturas se mostram adequadas para utilização em camadas de cobertura, ao menos em quantidade rezoável de umidade (pelo menos 10%), e considerando que as misturas apresentam tendência a reter umidade por conta da matéria orgânica presente, esse requisito pode ser atendido sem grandes preocupações, requerendo apenas o mínimo de manutenção esperado para uma obra deste porte.

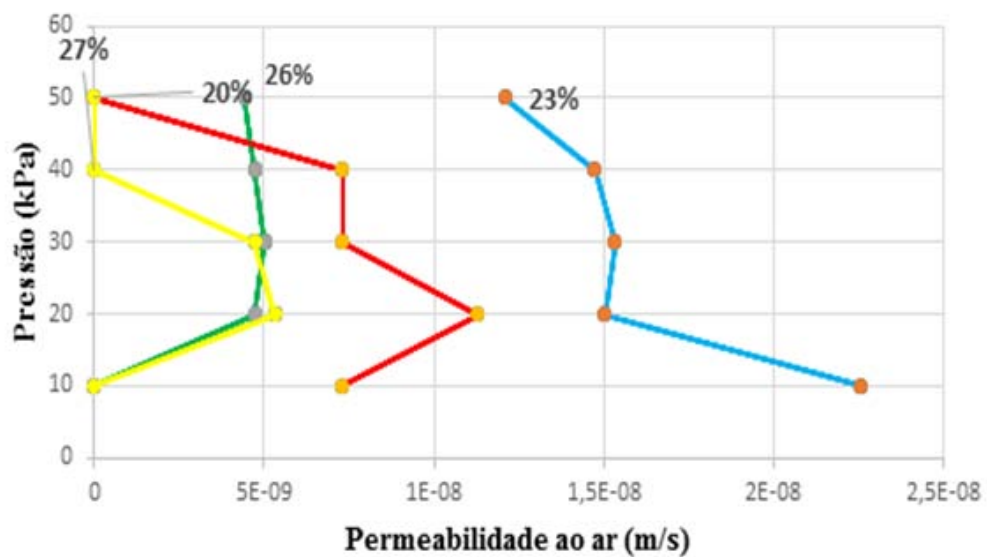
Para os valores superiores aos 20% de umidade se observa a reduzida permeabilidade observada, já que condiz com as umidades próximas as umidades ótimas das misturas, de forma que os seus poros se encontram em sua grande parte ocupados por água, impedindo assim a passagem do ar.

Para a permeabilidade horizontal a água, para maior rapidez na obtenção dos resultados, preferiu-se analisar o caso de mistura 1:1 por ser o mais crítico, considerando sua maior porosidade observada nos ensaios anteriores. No ensaio, obteve-se o valor de permeabilidade de  $5,33 \cdot 10^{-9}$  m/s, de forma que mesmo sendo minimamente superior ao

vertical (o que era esperado teoricamente), ainda se apresenta na mesma ordem de grandeza deste.

Já para a permeabilidade horizontal ao ar, preferiu-se da mesma forma, analisar apenas a mistura 1:1. O ensaio foi feito variando desta vez não somente a umidade do corpo de prova pela sua secagem, mas também pela variação da pressão confinante do corpo de prova. Assim, obtivemos:

Gráfico 28 - Permeabilidade ao ar da mistura 1:1 com variação de umidade e pressão confinante



Fonte: Autora

Nota-se que, mesmo a maiores valores de umidade, o corpo apresenta permeabilidade passível de observação, mostrando que realmente ocorre aumento sensível da permeabilidade ao ar quando se compara a permeabilidade horizontal e vertical, mesmo que estes valores ainda sejam muito reduzidos, não prejudicando assim a funcionalidade do material para camada de cobertura. Também se pode observar que a maior pressão confinante comprime o corpo de prova de forma a permitir menor passagem do ar por meio deste (os valores menores de permeabilidade para as porcentagens de umidade mais alta na carga menor podem ter ocorrido devido a conformação inicial do corpo de prova, por esta se tratar da carga inicial dada ao corpo de prova no ensaio). Além disso, da mesma forma que na permeabilidade vertical, a menor umidade permite maior presença de poros interligados vazios (sem água), o que permite maior permeabilidade ao ar.

---

## 5 CONCLUSÕES

Quanto a granulometria, considerando que materiais mais argilosos são mais recomendáveis para camadas de cobertura por conta de sua baixa permeabilidade (MACIEL, 2003), poderia surgir alguma preocupação relativa a presença acentuada de material granular nas misturas estudadas. Entretanto, a presença de material orgânico acentua a capacidade das misturas de reterem água (como confirmado no ensaio de compactação), mantendo assim uma porcentagem de poros livres reduzida (pela presença de água no seu interior), diminuindo assim a permeabilidade presente. Além disso, a redução excessiva de porosidade, poderia impedir a entrada de oxigênio da atmosfera, inibindo o processo de oxidação das bactérias metanotróficas, reduzindo o potencial desejado da camada oxidativa (GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; PFEIFFER, 2011), dessa forma é desejável a presença, mesmo que reduzida, de poros presentes, como ocorreu com as misturas (identificado mais uma vez pela compactação). Ainda quanto a retenção de água pela matéria orgânica, ela é considerada inclusive benéfica no ponto de impedir a ocorrência de fissuras por conta de ressecamentos, acontecimento comum a camadas convencionais, principalmente em regiões áridas, além de impedir a passagem de líquidos para o interior do maciço, resultando em menor produção de lixiviados, e consequente menor custo com tratamento destes (calculados em geral a partir dos litros de lixiviados tratados). E ainda, a retenção de água associada a uma possível presença mais elevada de nutrientes (a ser comprovada em análise química), pode viabilizar o plantio de vegetação apropriada (com raízes que não permitam vazamento excessivo de gás, nem tenham porte a ponto de provocar carregamento extra no aterro), de forma a impedir ainda mais a entrada de água no maciço, também evitando ressecamentos e fissuras, e ainda podendo garantir maior estabilidade da camada contra a erosão de agentes externos (ventos, chuvas, etc). Além disso, as plantas podem regular a quantidade de água presente na camada, otimizando assim o transporte de oxigênio para dentro desta, permitindo melhor oxidação do metano (REICHENAUER *et al.*, 2010).

Observou-se também a densidade reduzida apresentada pelas misturas mais ricas matéria orgânica (1:1), fator que pode ser positivo considerando maior facilidade para manejo no aterro por menor peso, mas que trás preocupação com a possibilidade de mais poros livres que possam permitir emissão (observado nos ensaios de permeabilidade quando não se tem cautela quanto a umidade da camada e se permite que esta chegue a valores muito baixos). Quanto a umidade ótima, deve ser observado cuidado para permitir compactação correta em campo, devido a necessidade de mais uso de água (devido a valor de umidade ótima elevado),

---

permitindo obtenção de resistência adequada na compactação (atentando ainda para umidade já apresentada pelo material orgânico).

Quanto ao adensamento, a maior compressibilidade das misturas mais ricas em compostos orgânicos pode trazer problemas quanto a passagem de maquinário. Entretanto, isso não é uma preocupação tão excessiva, já que a camada é posta apenas após o fechamento da célula, de forma que a passagem do maquinário deverá ser restrita. Além disso, por conta dos resíduos apresentarem capacidade de carga reduzida, associado ainda ao risco de emissão de gases causadores de mau odor, inflamáveis ou mesmo tóxicos, não se recomenda construções de porte sobre o aterro após fechamento, sendo estes destinados geralmente a usos menos nobres, como parques.

Quanto a capacidade de carga, o cisalhamento direto mostrou que a matéria orgânica, contribuiu positivamente (mesmo que de forma reduzida) no ângulo de atrito, auxilia na resistência do material, mas reduzindo a coesão, que seria benéfica a permeabilidade e estabilidade. Entretanto, os resultados do ensaio triaxial mostraram valores diferenciados, mostrando menor confiabilidade dos resultados obtidos do cisalhamento, já que este apresenta superfície pré definida de ruptura e impede a deformação efetiva do corpo de prova, dando-se assim maior importância aos valores obtidos nos ensaios triaxiais. Mesmo assim, ambas as misturas se mostraram com resistência minimamente satisfatória, condizendo com solos submetidos a carregamentos mais esporádicos presentes em camadas de cobertura. Além disso, mesmo com mais adição de matéria orgânica de uma mistura para outra, a alteração dos parâmetros de resistência foram reduzidos, sendo um indicativo positivo para fomentar o uso do composto orgânico (podendo ser obtido até mesmo no próprio aterro sanitário por meio de separação de material orgânico levado ao aterro), que antes poderia ser destinado inclusive para descarte, como substituto do solo argiloso convencional (frequentemente mais caro e de difícil aquisição). Considerando também a natureza mais granular do composto acrescentado, o material passa a apresentar ângulos de atrito mais expressivos que os observados apenas para o material de solo puro, de forma que os taludes dos aterros sanitários podem ser assim construídos de forma mais íngreme com mais segurança, reduzindo ainda mais o uso de material de cobertura, o que recai mais uma vez em uma redução de custos.

Ainda quanto a permeabilidade, os resultados também se mostraram satisfatórios, com valores dentro do indicado na literatura e usado na prática, e ainda seguindo o mesmo preceito de que a maior adição do composto orgânico em uma das misturas não provocou nenhum tipo de agravante negativo em detrimento a mistura com mais solo.

---

Assim, inicialmente a partir de suas propriedades, pode-se inferir que as misturas apresentam capacidades positivas para atuar nas camadas de cobertura de aterros, requerendo apenas cuidado quanto a adensamentos e carregamentos que se apresentarão nesta, que não devem ser superiores que as previstas para um aterro encerrado.

---

## REFERÊNCIAS

ABICHOU, T. LANGONI, G. TAWFIC, K. **Assessment of Alternative Earthen Final Covers for Florida Landfills**. State University System of Florida. Relatório #03-05. Março de 2003. 107p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6457: **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro - RJ, 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 8419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro - RJ, 1992.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 13896: **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro - RJ, 1997.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro - RJ, 1984 (Versão Corrigida: 1988).

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180: **Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7182: **Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro - RJ, 1986 (Versão Corrigida: 1988).

BRASIL. **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicada no D.O.U. em 03/08/2010. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)> Acesso em 09/01/2016.

CABRAL, A.R., BURNOTTE, F., LEFEBVRE, G. PANAROTTO, C.T. Geotechnical characterization of a pulp and paper residue to be used as alternative cover material to landfill and to acid generating tailings. In: **Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Balkema**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil, vol. 1, p.207-211. 2002.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte.

COSTA, M. D. **Estudos de Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas de Solos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2015.

DANIEL, D.E. Soilbarriers layers versus geosynthetic barriers in landfill cover systems. **ASCE Geotechnical Special Publication**, n. 53, p. 1 - 18, 1995.

---

ELSHORBAGY; W.A.; MOHAMED, A.M.O. Evaluation of using municipal solid waste compost in landfill closure caps in arid areas, United Arab Emirates. **Waste Management**, PERGAMON, v. 20, p. 499-507, 2000.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A. Passive landfill gas emission - Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidizing biofilters, Hamburgo - Alemanha. **Waste Management**, ELSEVIER, v. 26, n. 3, p. 245-251, 2006.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; PFEIFFER, E. Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers, Hamburgo - Alemanha. **Soil Biology & Biochemistry**, ELSEVIER, v. 43, n. 9, p. 1759-1767, 2011.

GEBERT, J.; MIRJAM, P. Impact of preferential methane flow through soil on microbial community composition, Hamburgo - Alemanha. **European Journal Of Soil Biology**, ELSEVIER, v. 69, p. 8-16, 2015.

Geofoco Brasil. **IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS COM GEOMEMBRANA DE PEAD**. Disponível em <<http://geofoco.com.br/impermeabilizacao-de-aterros-sanitarios-com-geomembrana-de-pead/>> Acesso em 02/07/2016.

HUMER, M. **Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost**. PhD Thesis. University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU). Vienna, p. 279, 2004.

KNAEBEL, K.S.; REINHOLD, H. Landfill gas: from rubbish to resource. **Adsorption**, v.9, p. 87-94, 2002.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife. 2003.

MARINHO, F. A. M. **Cobertura de aterro - Requerimentos, Definições e Visão geral dos sistemas, Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos: Projeto, Operação e Descomissionamento de Aterros Sanitários**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MCCARTNEY, J. S.; ZORNBERG, J. G. Design and performance criteria for evapotranspirative cover systems. In: **Proceedings of The Fourth International Congress on Environmental Geotechnics (ICEG)**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil, vol.1, p. 195-200. 2002.

MOO-YOUNG, H. K.; ZIMMIE, T. F. Closure of geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers. **Jornal of Geo-technical Engineering**. ASCE 124 (10):1043. 1998.

PERNAMBUCO (Estado). **Lei 10.489 de 2 de outubro de 1990**. Dispõe sobre a distribuição, entre os municípios, da parcela do ICMS que lhes é destinada. Disponível em <<http://legis.alepe.pe.gov.br/arquivoTexto.aspx?tiponorma=1&numero=10489&complemento=0&ano=1990&tipo=&url=>> Acesso em 02/07/2016.

---

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP, 3ª edição. 2006.

REICHENAUER, T. G.; WATZINGER, A.; RIESING, J., GERZABEK, M. H. Impact of different plants on the gas profile of a landfill cover. Vienna - Áustria. **Waste Management**, ELSEVIER, v. 31, n. 5, p. 843-853, 2010.

SANTOS, G. M., **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2015.

SINDERN, A.; RICKEN, T.; BLUHM, J.; WIDMANN, R.; DENECKE, M.; GEHRKE, T. A coupled multicomponent approach for bacterial methane oxidation in landfill cover layers. **Proceedings in applied mathematics and mechanics** [1617-7061] vol:14 fasc:1 p. 469-470. 2014.

SHIN, H.C., PARK, J.W., PARK, K., SONG, H.C. Removal Characteristics of Trace Compounds of Landfill Gas by Activated Carbon Adsorption. **Environ. Pollut.** 119(2) p.227–236. 2002.

USEPA (2004) **Evaluation of Permeable Reactive Barrier Performance. Prepared for Federal Remediation Technology Roundtables by the tri-agency Permeable Barrier Initiative**, US Department of Defense, US Department of Energy, US Environmental Protection Agency, Interstate Technology and Regulatory Cooperation, 2002, EPA 542-R-04-004.