



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

ENOQUE GUTHIERREZ OLIVEIRA JACINTO

**BACIAS DE CONTENÇÃO: impermeabilização com solo compactado**

Recife

2021

ENOQUE GUTHIERREZ OLIVEIRA JACINTO

**BACIAS DE CONTENÇÃO: impermeabilização com solo compactado**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Washington Moura de Amorim Junior .

Recife

2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

J12b Jacinto, Enoque Guthierrez Oliveira.  
Bacias de contenção: impermeabilização com solo compactado /  
Enoque Guthierrez Oliveira Jacinto. - 2021.  
61 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Washington Moura de Amorim Junior.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2021.  
Inclui Referências.

1. Engenharia civil. 2. Bacias de contenção. 3. Solo compactado. 4.  
Sustentabilidade. I. Amorim Junior, Washington Moura de (Orientador). II.  
Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-14

ENOQUE GUTHIERREZ OLIVEIRA JACINTO

**BACIAS DE CONTENÇÃO: Impermeabilização com solo compactado**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau em Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/08/2021 .

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Washington Moura de Amorim Junior (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Externo)  
Universidade Católica de Pernambuco

---

Prof. Samuel França Amorim (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho aos meus pais por fornecer todas as condições para meu desenvolvimento acadêmico.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me dar saúde, sabedoria e determinação para superar as dificuldades nos momentos de angústia e, por sempre iluminar meu caminho na busca dos meus objetivos.

Aos meus pais, Severina Oliveira e José Enoque, a minha família por fazerem o possível para me oferecer o suporte necessário durante os longos anos de estudo.

A minha irmã Suhenya Oliveira por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

A meu orientador Prof. Washington Moura de Amorim Junior, pela confiança, amizade, orientação, paciência, incentivo e disponibilidade durante todos os anos de estudo desde minha graduação, e com seu conhecimento me orientou possibilitando que esse trabalho fosse realizado.

As Engenheiras Nayara Belfort e Rayane Mattos que me ajudaram no começo dessa caminhada e sempre estiveram presentes para tirar qualquer tipo de dúvida.

A minha namorada Ayrles Alves por sempre me apoiar e incentivar a não desistir nos momentos mais difíceis, sempre servindo como base emocional.

A meu primo William Araújo que teve uma grande paciência, e sempre esteve ao meu lado para ajudar no que fosse preciso.

Aos meus amigos por sempre estarem presentes tanto nos momentos mais difíceis de estudo e convivência, quanto nos momentos de alegria.

Ao pessoal presente no Laboratório de Solos da UFPE, Antônio Brito e Gutemberg Francisco que contribuíram na realização do trabalho.

E por fim a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização desse trabalho e para minha formação profissional.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”(NEWTON, ano 1676)

## RESUMO

O uso do solo argiloso compactado é um método muito usado para impermeabilização, a aplicação desse método em bacias de contenção apresenta uma solução de menor custo e mais sustentável. Em vista disso, o objetivo geral deste estudo foi estimar a espessura de solo contaminado em caso de derramamento e criar uma tabela baseada nos estudos e normas brasileiras, antigas e vigentes, sobre bacias de contenção. Baseando-se nos critérios estabelecidos pela NBR 7505:2000, 17505:2015 e Registro Federal 40, CFR 112, “Oil Pollution Prevention” (2002) para impermeabilização de bacias de contenção de tanques verticais de armazenamento de produtos, considerando o estudo de caso de três Bacias de contenção. Para isso, foram coletadas 16 amostras de solos dentre 3 bacias de contenção próximas aos terminais. As amostras de solo foram submetidas a ensaios de granulometria, limites de Atterberg, compactação (proctor normal), edométrico para expansão livre e permeabilidade no triflex, este para determinação do coeficiente de permeabilidade(k) referenciado ao Etanol(EHC) visto que os outros produtos armazenados nas bacias de contenção apresentam alta viscosidade, portanto baixa permeabilidade. A exemplo disso, verificou-se que nos ensaios de Amorim Jr.(2007) as amostras permeadas por óleo combustível ou gasóleo, produtos de altíssima viscosidade, apresentaram coeficientes de permeabilidade na ordem de  $10^{-8}$  cm/s, independente das mesmas apresentarem valores de permeabilidade à água entre as ordens de grandeza  $10^{-7}$  a  $10^{-3}$  cm/s. Os ensaios de granulometria demonstraram composição semelhante entre os solos das bacias. Através dos ensaios de permeabilidade, foi possível constatar a influência do tempo previsto em um plano de contingência na espessura da camada de solo compactado. No geral, o resultado revelou que a bacia de contenção (Álcool 1) apresentou coeficiente de permeabilidade – referenciado ao produto – menor que o coeficiente de permeabilidade máximo – referenciado à água – para bacias de contenção como exigido na NBR 17505:2015. Logo, este estudo demonstrou que o coeficiente de permeabilidade encontrado apresenta-se como uma solução viável, uma vez que “k” cm/s foi referenciado ao produto contaminante, também foi aplicado o método utilizado na dissertação de Amorim Jr.(2007) para estimar a profundidade de solo contaminado após um possível derramamento.

Palavras-chave: bacias de contenção; solo compactado; sustentabilidade.

## ABSTRACT

The use of compacted clayey soil is a widely used method for waterproofing, the application of this method in containment basins presents a lower cost and more sustainable solution. In view of this, the general objective of this study was to estimate the length of contaminated soil in the event of a spill and create a table based on old and current Brazilian studies and standards on containment basins. Based on the criteria established by NBR 7505:2000, 17505:2015 and Federal Registry 40, CFR 112, "Oil Pollution Prevention" (2002) for waterproofing containment basins for vertical product storage tanks, considering the case study of three containment basins. For this, 16 soil samples were collected from 3 containment basins close to the terminals. Soil samples were subjected to particle size tests, Atterberg limits, compaction - normal proctor, densification - free expansion and permeability - triflex, this to determine the permeability coefficient (k) referenced to Ethanol (EHC) as the other products stored in containment basins have high viscosity, therefore low permeability. As an example, it was found that in the tests by Amorim Jr. (2007), samples permeated by fuel oil or diesel, products of very high viscosity, presented permeability coefficients in the order of  $10^{-8}$  cm/s, regardless of whether they present values of water permeability between the orders of magnitude  $10^{-7}$  to  $10^{-3}$  cm/s. The granulometry tests showed a similar composition between the soils in the basins. Through permeability tests, it was possible to verify the influence of the time foreseen in a contingency plan on the length of the compacted soil layer. Overall, the result revealed that the containment basin (Alcohol 1) had a permeability coefficient – referenced to the product – lower than the maximum permeability coefficient – referenced to water – for containment basins required in NBR 17505:2015. Therefore, this study demonstrated that the permeability coefficient found is a viable solution, since "k" cm/s was referenced to the contaminating product, the method used in the dissertation by Amorim Jr. (2007) was also applied to estimate the depth of contaminated soil after a possible spill.

Keywords: containment basins; compacted soil; sustainability.



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ensaio de Granulometria – Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1....	36
Gráfico 2 - Ensaio de Granulometria – Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2.....	36
Gráfico 3 - Ensaio de Granulometria – Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4.....	37
Gráfico 4 - Limite de Liquidez - Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1 .....	38
Gráfico 5 - Limite de Liquidez - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2.....	38
Gráfico 6 - Limite de Liquidez - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4.....	39
Gráfico 7 - Compactação - Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1 .....	40
Gráfico 8 - Compactação - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2.....	41
Gráfico 9 - Compactação - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4.....	42
Gráfico 10 - Expansão Livre - Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1 .....	45
Gráfico 11 - Expansão Livre - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2 .....	46
Gráfico 12 - Expansão Livre - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4 .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de valores ótimos de propriedades dos solos para execução de bacias de contenção de líquidos orgânicos. Fonte: Machado et al. (2011).....	19
Tabela 2 - Faixa de valores ótimos de propriedades dos solos para execução de bacias de contenção de líquidos orgânicos. Fonte: Machado et al. (2014).....	19
Tabela 3 - Granulometria Parcial das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4.....	37
Tabela 4 - Faixa de valores - Índices de Plasticidade das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4 .....	40
Tabela 5 - Faixa de valores - Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4 .....	43
Tabela 6 - Ensaio de Expansão livre - Bacia de contenção Álcool 1 .....	45
Tabela 7 - Ensaio de Expansão livre - Bacia de contenção Mel 2.....	45
Tabela 8 - Ensaio de Expansão livre - Bacia de contenção Mel 4.....	46
Tabela 9- Classificação do grau de expansão do solo. ....	47
Tabela 10 - Coeficiente de Permeabilidade do Etanol(EHC) no Solo compactado .....	50
Tabela 11 - Estimativa da camada de solo contaminado para a bacia de Álcool 1. ....	51
Tabela 12 - Tabela formada com os parâmetros ótimos do solo obtidos por Machado et al. (2011) e Machado et al. (2014) – Adaptado.....	52
Tabela 13 - Tabela formada com com os parâmetros do solo encontrados nas amostras retiradas das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4.....	53
Tabela 14 - Tabela formada com os resultados dos parâmetros do solo encontrados nos ensaios realizados nas três amostras estudadas: Álcool 1, Mel 2 e Mel 4.....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO .....	15
1.2	OBJETIVO GERAL .....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1	USO DE SOLO COMPACTADO COMO CAMADA IMPERMEABILIZANTE.....	17
2.2	NORMAS E REGULAMENTAÇÕES GERAIS SOBRE BACIAS DE CONTENÇÃO EM SOLO COMPACTADO .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Estados Unidos .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Estudos no Brasil .....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
3.1	IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO .....	22
3.2	COLETAS DE AMOSTRAS AMOLGADAS NAS BACIAS .....	22
3.3	ENSAIOS DE GRANULOMETRIA .....	23
3.4	ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE.....	24
3.5	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO .....	26
3.6	IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS - EXPANSÃO LIVRE .....	26
3.7	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE .....	28
3.8	MÉTODO PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE DE SOLO CONTAMINADO..	29
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>32</b>
4.1	MODELO DO LOCAL DE ESTUDO .....	32
4.2	COLETA DE AMOSTRAS AMOLGADAS NAS BACIAS .....	33
4.3	ENSAIOS DE GRANULOMETRIA .....	34
<b>4.3.1</b>	<b>Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1 .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2 .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4 .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Parâmetros do ensaio de Granulometria.....</b>	<b>37</b>
4.4	ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE.....	37
<b>4.4.1</b>	<b>Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1 .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2.....</b>	<b>38</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4.....</b>	<b>39</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Parâmetros de I.P. obtidos através dos Limites de Atterberg.....</b>	<b>40</b>

4.5	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO .....	40
4.5.1	<b>Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1 .....</b>	<b>40</b>
4.5.2	<b>Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2.....</b>	<b>41</b>
4.5.3	<b>Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4.....</b>	<b>42</b>
4.5.4	<b>Parâmetros do ensaio de compactação – Proctor normal.....</b>	<b>43</b>
4.6	ENSAIOS DE COMPRESSIBILIDADE UNIDIMENSIONAL – EXPANSÃO LIVRE.....	44
4.6.1	<b>Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1 .....</b>	<b>45</b>
4.6.2	<b>Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2 .....</b>	<b>45</b>
4.6.3	<b>Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4 .....</b>	<b>46</b>
4.6.4	<b>Método utilizado para classificação da expansão dos solos encontrados nas bacias estudadas: .....</b>	<b>47</b>
4.6.5	<b>Método proposto para estabilização da expansão dos solos estudados .....</b>	<b>48</b>
4.7	ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....	48
4.7.1	<b>RESULTADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE .....</b>	<b>50</b>
4.8	ESTIMAR A PROFUNDIDADE DE SOLO CONTAMINADO.....	50
4.8.1	<b>Considerações para a aplicação do modelo.....</b>	<b>51</b>
4.9	TABELAS COM RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS.....	52
5	<b>ORÇAMENTO .....</b>	<b>56</b>
5.1.1	<b>Orçamento para bacia de contenção em solo .....</b>	<b>57</b>
5.1.2	<b>Orçamento para bacia de contenção em Concreto .....</b>	<b>57</b>
5.1.3	<b>Orçamento para bacia de contenção em PEAD.....</b>	<b>57</b>
6	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Não há estudos específicos na literatura vigente quanto a incapacidade da utilização do solo natural ou solo argiloso compactado para contenção dos produtos como o etanol, mel, melaço e outros líquidos em situação de vazamentos sobre bacias de contenção. Existem limitações ambientais para o emprego de materiais diferentes da argila natural, mas essa impermeabilização das estruturas de contenção exigiria grande quantidade de elementos sintéticos.

Amorim Jr.(2007) orienta que a adequação do solo como material da bacia de contenção pode depender das propriedades dos produtos armazenados nos tanques e do tipo de solo empregado na contenção. Por exemplo, o solo compactado do local pode ser impermeável a derramamento de líquidos viscosos como cimento asfáltico líquido, ou óleo combustível, mas não ser adequado a conter gasolina. Por este motivo, a USEPA(Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) não fixa um parâmetro de permeabilidade, mas orienta que as bacias de contenção devem ser capazes de conter derramamentos até que o produto derramado seja removido da bacia de contenção, considerando fatores específicos do local.

Segundo a norma brasileira NBR 17505:2015 a bacia de contenção é uma “Área constituída por uma depressão, pela topografia do terreno ou ainda limitada por dique, destinada a conter eventuais vazamentos de produtos; o coeficiente de permeabilidade máximo das paredes do dique e do piso da bacia deve ser de  $10^{-6}$  cm/s, referenciado à água a 20 °C e a uma coluna de água igual à altura do dique.”. Sendo assim a Norma não apresenta parâmetros de permeabilidade referenciados ao produto para bacias de contenção.

Com base nessas referências este trabalho faz um estudo sobre os parâmetros do solo que mais se adequam à implementação de bacias de contenção em solo argiloso compactado para armazenamento de mel, melaço, e etanol.

Para a obtenção dos respectivos resultados apresentados neste trabalho foram coletadas 16 amostras de solo argiloso, posteriormente foram selecionadas 3 amostras e realizados ensaios (granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação e permeabilidade) para obtenção de parâmetros do solo. Mediante as alternativas conhecidas para a construção de bacias de contenção, o solo argiloso compactado apresenta algumas vantagens sobre as opções sintéticas, a solução é mais econômica e também torna-se menos invasiva ao meio ambiente, aquecendo menos com radiação solar, evento observado quando são usadas soluções em geossintético, concreto de cimento Portland ou asfáltico.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Os elementos sintéticos como: concreto, geomembranas poliméricas, asfalto ou combinações destes materiais, são soluções desaconselháveis do ponto de vista ambiental, aumentando a temperatura sobre a superfície da bacia de contenção e no entorno dos tanques além de acumular um grande volume de material sintético sobre o solo natural, terem custo elevado e serem mais suscetíveis ao vandalismo, em especial os geossintéticos se ficarem aparentes.

O intuito desse estudo é evidenciar, através dos resultados obtidos nos ensaios e pesquisas, que a bacia de contenção em solo argiloso é prática, econômica, eficiente e segura aliando ainda as vantagens de reduzir a temperatura no entorno dos tanques, caracterizando-se como uma Construção Sustentável.

Em bacias de contenção construídas com concreto de cimento Portland são necessárias juntas de dilatação, devido à grande variação de temperatura observada nessas placas. As patologias mais comuns oriundas dessa variação térmica são as fissuras e ressecamento das juntas de dilatação, que são pontos vulneráveis para a impermeabilização das estruturas, e necessitam de manutenção mais onerosa. Como a maioria dos Tanques de Armazenamento estão instalados em locais de difícil acesso existem dificuldades na logística de transporte do material de construção, da execução e manutenção dessas bacias que também podem ser evitados.

Motivado pelo empreendedor para indicar uma solução eficiente, segura e econômica para contenção de mel, melaço e outros líquidos, foi desenvolvida a pesquisa baseada nos critérios de impermeabilização apropriados pelas normas Brasileiras e Americanas:

- a) ABNT NBR 7505:2000
- b) ABNT NBR 17505:2006
- c) ABNT NBR 17505:2015
- d) Registro Federal 40, CFR 112, “Oil Pollution Prevention” (2002).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Poduzir uma tabela com parâmetros dos solos coletados das bacias de contenção estimando a profundidade da camada de solo contaminado e a espessura da camada mínima para conter um possível vazamento dos tanques de armazenamento.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico é realizar ensaios para fornecer os parâmetros dos solos argilosos estudados, seguindo a sequência:

- a) Coletar amostras deformadas das bacias de contenção ao entorno dos tanque de armazenamento;
- b) Selecionar as amostras mais representativas;
- c) Obter os parâmetros do solo estudado por meio de ensaios de Granulometria, Limites de Atterberg e compactação pelo método do proctor normal;
- d) Investigar a existência de argilas expansivas através do ensaio de “expansão livre”;
- e) Avaliar a permeabilidade do solo estudado analisando a sua adequação às normas primitivas e vigentes no que se refere às bacias de contenção;
- f) Analisar a estimativa da profundidade de solo contaminado na região da bacia de contenção no intervalo de tempo suficiente para as ações de emergência serem realizadas; baseando-se na metodologia observada em Amorim Jr. (2007);
- g) Estimar a espessura mínima de solo contaminado para conter um derramamento em uma bacia de contenção com parâmetros dos solos semelhantes aos estudados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 USO DE SOLO COMPACTADO COMO CAMADA IMPERMEABILIZANTE

A impermeabilização com solo argiloso compactado é bastante utilizada em revestimento de açudes; de lagoas de estabilização; de células de aterros sanitários e para confecção de núcleo de argila para proteção de tanques subterrâneos de combustíveis contra vazamentos. Em geral, os solos com alto teor de argila apresentam baixos valores de permeabilidade e, devido a essa característica, são frequentemente usados como barreiras naturais e artificiais em sítios de disposição de resíduos, para limitar o escape dos contaminantes para o meio ambiente.

Segundo a NBR 17505:2015 a definição de Bacia de Contenção é:

“Área construída por uma depressão, pela topografia do terreno ou, ainda, limitada por diques, destinada a conter eventuais vazamentos de produtos.”

Bacia de contenção tem a função de evitar vazamentos de produtos químicos que podem gerar inúmeros prejuízos e impacto ambiental de grandes proporções e incalculável no que tange ao meio-ambiente e toda responsabilidade em torno da sustentabilidade nas operações de uma empresa. Isso sem contar a responsabilidade criminal e em todas as consequências. Um simples vazamento de um produto poluente pode se tornar um enorme problema. Para que isso seja evitado, é importante pensar nos procedimentos de segurança, ou seja, na prevenção desse tipo de problema.

A utilização de bacias de contenção ao redor dos tanques de armazenamento é a maneira recomendada e eficiente de reter produtos resultantes de vazamentos de tubulações tanques e recipientes fracionados.

Diversos autores (Carvalho *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2014; Machado *et al.*, 2011; Amorim Jr., 2007) já investigaram a impermeabilização de bacias de contenção com o emprego de solos argilosos compactados, caracterizando essa aplicação como eficiente para a impermeabilização das bacias. Os modelos de bacias de contenção mais utilizados são as de solo compactado, concreto e polietileno de alta densidade (PEAD).

Figura 1 - Bacia de contenção em solo compactado



Fonte: Amorim Jr. (2007).

Figura 2 - Bacia de contenção em PEAD



Fonte: Goiás Impermeabilizações (2021)

Figura 3 - Bacia de contenção em concreto de cimento portland



Fonte: Focusmetrologia (2021)

O trabalho de Carvalho *et al.* (2016) apresenta a investigação da permeabilidade *in situ* e em laboratório de sete aterros experimentais utilizando água e líquidos orgânicos

(gasolina, diesel e biodiesel em campo, e diesel em laboratório) como fluidos percolantes. A pesquisa concluiu que os aterros apresentaram bom desempenho na contenção de líquidos orgânicos, e apresentou um aterro constituído por 28% de argila, 17% de silte, 18% de areia fina, limite de liquidez de 41 e limite de plasticidade de 20% que mostrou resultados de permeabilidade na faixa  $10^{-6}$  cm/s para a maioria dos fluidos analisados, apenas para a gasolina o coeficiente de permeabilidade chegou perto da faixa de  $10^{-5}$  cm/s.

Em busca de solos potencialmente utilizáveis na contenção de líquidos orgânicos, alguns autores (Machado *et al.*, 2014; Machado *et al.*, 2011) estudaram detalhadamente o desempenho de inúmeros solos e propuseram faixas granulométricas ótimas para a sua utilização em bacias de contenção de líquidos orgânicos. Os valores estimados estão apresentados nas Tabela 1, Tabela 2.

Tabela 1 - Faixa de valores ótimos de propriedades dos solos para execução de bacias de contenção de líquidos orgânicos.

Parâmetros	Faixa de Valores	
Índice de Plasticidade	28%	42%
Teor de Finos (argila + silte)	33%	60%
Teor de Argila	27%	45%
Teor de Areia	34%	57%
Umidade Ótima	14%	20%
Densidade seca máxima	1,65g/cm <sup>3</sup>	1,83 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Machado *et al.* (2011).

Tabela 2 - Faixa de valores ótimos de propriedades dos solos para execução de bacias de contenção de líquidos orgânicos.

Parâmetros	Faixa de Valores	
Índice de Plasticidade	12%	25%
Teor de Finos (argila + silte)	25%	45%
Teor de Argila	20%	35%
Teor de Areia	45%	70%
Umidade Ótima	10%	17%
Densidade seca máxima	1,65g/cm <sup>3</sup>	2,0 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Machado *et al.* (2014).

## 2.2 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES GERAIS SOBRE BACIAS DE CONTENÇÃO EM SOLO COMPACTADO

### 2.2.1 Estados Unidos

Nos EUA, o Registro Federal 40 CFR Part 112, intitulada “Oil Pollution Prevention and Response - Final Rule” (US EPA, 2002), define no parágrafo 112.7(c) que as bacias de contenção, diques e bermas sejam “suficientemente impermeáveis” sem definição do tipo de material de recobrimento ou o coeficiente de permeabilidade máximo para o material impermeabilizante. No entanto, sabe-se que, na maioria dos casos, a impermeabilização com solo natural ( $k \leq 10^{-6}$  cm/s) é efetuada através de recobrimento com material argiloso compactado.

estabelece que todo o sistema de contenção deve fornecer um confinamento apropriado, além de estruturas de drenagem para impedir o inapropriado destino dos fluidos em caso de vazamento. Nesse Registro Federal, a US EPA cita a necessidade da execução de uma contenção lateral, para instalações em terra, onde devem ser construídos no mínimo Diques, Bermas ou Muros de Arrimo, suficientemente impermeáveis para conter óleo. Nesse Registro também constam alertas importância da elaboração de Plano de Contingência de derramamento de óleo e um termo de compromisso por escrito sobre os equipamentos e materiais necessários para controlar e remover rapidamente todo volume de líquido derramado, em período hábil, evitando prejuízos ao meio ambiente.

### 2.2.2 Estudos no Brasil

A NBR 17505:2015 especifica que bacias de contenção devem ter coeficiente de permeabilidade máximo de  $10^{-6}$  cm/s, referenciado à água a 20°C, ou  $10^{-4}$  cm/s, referenciado à água a 20°C caso possuam canaletas de drenagem. O solo argiloso é um material acessível e quando compactado apresenta um coeficiente de permeabilidade próximo ao recomendado pela NBR 17505:2015, seu baixo custo de implementação tem sido um diferencial para o aumento do uso no território brasileiro.

No Brasil ainda não existe uma legislação federal específica estabelecendo os critérios de impermeabilização em áreas destinadas à contenção de líquidos contaminantes. A Bahia é o único estado que possui uma legislação distinta sobre eficiência de retenção de bacias de contenção, a qual estabelece que tais áreas devam ser providas de diques de contenção

devidamente impermeabilizados.

A Bahia possui o DECRETO ESTADUAL Nº 11.235 DE 10 DE OUTUBRO DE 2008, que estabelece:

Das Descargas Acidentais - “Art. 68 - Toda área de estocagem de produtos tóxicos, inflamáveis ou corrosivos deverá ser provida de dique de contenção devidamente impermeabilizado, capaz de acumular todo o volume do maior tanque, acrescido da precipitação pluviométrica recorrente.”

Parágrafo único - Os tanques de estocagem de produtos tóxicos, inflamáveis ou corrosivos deverão ser providos de dispositivos para prevenção de vazamentos.

Da Poluição do Solo e do Subsolo – “Art. 71 - Considera-se poluição do solo e do subsolo a deposição, a descarga, a infiltração, a acumulação, a injeção ou o enterramento no solo ou no subsolo de substâncias ou materiais poluentes, em estado sólido, líquido ou gasoso, capazes de alterar sua qualidade ambiental.”

Parágrafo único - Não será permitida a acumulação, mesmo que temporária, diretamente sobre o solo ou no subsolo, de substâncias, produtos ou resíduos de qualquer natureza, que possam oferecer risco de poluição ambiental.

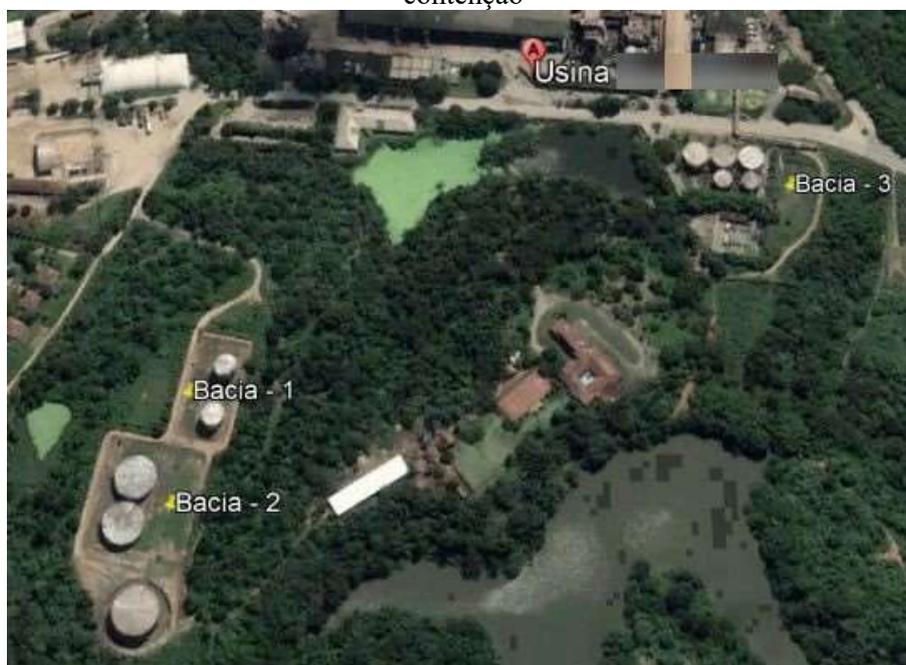
Diante deste cenário, o laboratório de Geotecnia ambiental da UFBA, GEOAMB, desenvolveu um projeto de pesquisa sobre permeabilidade de líquidos orgânicos em solos compactados (Machado *et al.*, 2011). Esta pesquisa, desenvolvida com apoio da PETROBRAS, teve como um dos resultados, a proposição de faixas granulométricas de solo com potencial de uso para barreiras de contenção de produtos combustíveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A área prevista para a verificação da viabilidade da utilização dos solos para fins de impermeabilização está localizada no Território Rural Mata Norte de Pernambuco, situada em uma Rodovia Estadual - Zona Rural. Abaixo está apresentado uma imagem do terreno pelo *Google Earth*:

Figura 4 - Imagem do Terreno obtida através do Google Earth, com identificação das três bacias de contenção



Fonte: Próprio Autor.

#### 3.2 COLETAS DE AMOSTRAS AMOLGADAS NAS BACIAS

Para esse tipo de amostragem, deve ser feita inicialmente uma limpeza no local de trabalho, retirando a vegetação superficial, raízes e qualquer outra matéria estranha ao solo, para só depois iniciar o processo de coleta de amostra, se a profundidade de retirada da amostra estiver, no máximo a 1 m da superfície do terreno pode ser feita uma escavação, com pá e picareta, entre 1 a 6 m de profundidade pode ser utilizado o trado cavadeira, desde que, o furo não precise de revestimento. Para profundidade maior que 6m ou quando o furo exigir trado com uso de tubo de revestimento deve ser usado o trado helicoidal.

O solo retirado pode ser utilizado das seguintes formas:

- a) Na identificação tátil-visual;
- b) Na preparação dos corpos de provas compactados para ensaios de permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento;
- c) No ensaio de compactação;
- d) Nos ensaios de classificação (Granulometria, Limites de Consistência e Massa Específica dos Sólidos).

A boa caracterização do solo depende da qualidade da amostra e do procedimento dos ensaios. Tanto para a amostragem quanto para os ensaios existem normas técnicas que regem o assunto e que devem ser obedecidas.

Quanto ao volume de solo que precisa ser caracterizado, normalmente não existe a possibilidade de que todo ele seja examinado daí serem necessárias coletas de amostras que sejam representativas.

### 3.3 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

O objetivo é a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação com a finalidade de obter a curva granulométrica dos solos seguindo a NBR 7181:2016. Os principais equipamentos e utensílios utilizados no ensaio, são: Balança; Almofariz e Mão de Grau; Cápsulas para Determinação de Umidade; Estufa; Jogo de Peneiras; Agitador de Peneiras; Dispensor Elétrico; Proveta Graduada de 1000ml; Densímetro Graduado de bulbo simétrico; Termômetro e Cronômetro. O procedimento teórico está descrito de A à C:

- a) Deve ser selecionado uma quantidade representativa Q1 de material seco ao ar ou úmido; determinando sua umidade: 10,0 kg para material com pedregulho grosso; - 2,0 kg para material com pedregulho fino; 1,0 kg para material arenoso; 0,5 kg para material silteoso/argiloso.
- b) Deve ser passada a massa Q1 na peneira N° 10;
- c) Do material que passar, serão separadas 03 quantidades: Q2 = 20 g para a determinação do peso específico real das partículas; Q3 = 50 a 100 g para a sedimentação; Q4 = 200 a 600 g para o peneiramento fino.

Para os procedimentos Experimentais:

- a) Peneiramento Grosso (material retido na peneira N° 10) -o material na peneira N° 10

- deve ser lavado e colocado na estufa; - o material seco é peneirado, mecânica ou manualmente, até a peneira Nº 10; - Após isso a fração retida em cada peneira é pesada;
- b) Peneiramento Fino (material que passa na peneira Nº 10) - o material na peneira Nº 200 deve ser lavado e colocado na estufa; - o material seco é passado nas peneiras de aberturas menores que a Nº 10;
  - c) Sedimentação - a massa Q3 é colocada em “banho” entre 6 a 24 horas com defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio); - a mistura deve ser agitada no dispersor elétrico de 5 a 15 minutos; - a mistura é transferida para a proveta graduada completando com água destilada até 1000 ml e o balanceamento é realizado; - as leituras do densímetro são feitas nos instantes de 30s,1,2,4,8,15,30min,1,2,4,8,25h.

### 3.4 ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Segundo a NBR 6459 – “Solo – Determinação do Limite de Liquidez” que é o teor de umidade do solo no qual se unem em um centímetro de comprimento, as bordas inferiores de uma canelura feita em uma massa de solo colocada na concha de um aparelho normalizado (Aparelho de Casagrande), sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base desse aparelho. O Limite de liquidez marca a transição do estado plástico ao estado líquido representado por LL e expresso em porcentagem, utilizando os seguintes equipamentos: peneira de número 40; estufa capaz de manter a temperatura entre 105° e 110°c; balança com capacidade de 200g, sensível a 0,01g; aparelho de Casagrande; cápsula de porcelana com 1 cm de diâmetro; funil de 5cm diâmetro; espátula de aço.

Para seguir o procedimento de A à F é utilizado 70g do material passado na peneira nº 40, o material é colocado numa cápsula e acrescenta de 15 a 20 cm<sup>3</sup> de água destilada, o material é misturado até resultar em uma massa plástica.

Procedimentos:

- a) Transferir a massa plástica para a concha do aparelho onde a massa é moldada de tal forma que a parte central da concha apresente uma espessura de aproximadamente 1 cm;
- b) Com o emprego do cinzel, massa do solo é dividida em duas partes, uma ranhura é aberta no centro perpendicularmente à articulação da concha;
- c) Girar a manivela causa o golpeamento da concha contra a base do aparelho com a razão de duas voltas por segundo até que as bordas inferiores da ranhura se unam em

- 1,3 cm de comprimento, sendo registrado então o número de golpes;
- d) É retirado um pouco de massa plástica do trecho em que ela se uniu. essa massa é colocada em uma cápsula para a determinação da umidade utilizando a estufa;
  - e) Repetindo as operações, acima mencionadas, agora é adicionado de 1 a 3 cm<sup>3</sup> de água, até se obter 5 pontos.

Para interpretar os resultados um gráfico é construído, os eixos de ordenadas em escala aritmética, representa os teores de umidade e o eixo das abscissas, em escala logarítmica, representa o número de golpes. Os pontos obtidos no gráfico dão origem a uma reta. O ponto de abscissa equivalente a “25 golpes” determina no eixo das ordenadas o teor de umidade que é o limite de liquidez (LL) do solo, geralmente expresso em porcentagem. No caso em que não se consegue a abertura da ranhura ou o seu fechamento com mais de 25 golpes, considerando que a amostra não apresenta limite de liquidez (NL).

Seguindo a NBR 7180 – “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade” para determinar o Limite de Plasticidade do solo que é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando o solo com a palma da mão. O Limite de liquidez marca a transição do estado semi-plástico ao estado plástico. É representado por LP e expresso em porcentagem. Utilizando os equipamentos necessários: Peneira de N° 40; Estufa capaz de manter a temperatura entre 105° e 110° C Balança com capacidade de 200 g, sensível a 0,01 g; Placa de vidro esmerilhado; Cápsula de porcelana com 12 cm de comprimento e 5 cm de altura; Cilindro de comparação; Espátula de aço; Pinça metálica. É utilizado 50g do material passado na peneira N° 40 para seguir o procedimento de A até E:

- a) A amostra é colocada na cápsula de porcelana, mistura água destilada até obter uma massa plástica e uniforme;
- b) Com a massa obtida é formada uma pequena bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro esmerilhado, com pressão suficiente da mão para que a massa tome a forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento;
- c) Amassando o material e o processo é repetido. A operação deve ser continuada até que, por perda da umidade, o cilindro atinja as medidas desejadas;
- d) Logo que o cilindro se quebre são transferidos vários pedaços para um recipiente para a determinação da umidade em estufa;
- e) As operações anteriores são repetidas até que se obtenha um mínimo de 3 valores para a umidade.

Para interpretar os resultados cada um dos valores obtidos não deve diferir em mais de 5% da média aritmética dos resultados. O limite de plasticidade (LP) é expresso pela média aritmética dos teores de umidade obtidos no ensaio.

### 3.5 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Seguindo a NBR 7182:2016 o procedimento é iniciado com a adição de água à amostra até se verificar uma certa consistência, é ideal que seja realizada uma ótima homogeneização da amostra; - a amostra é compactada no molde cilíndrico pequeno (2,5kg) em 3 camadas iguais (cada uma cobrindo aproximadamente um terço do molde), é aplicado em cada uma delas 26 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo de uma altura de 0,305m. Se o cilindro for o grande (4,5kg), a amostra é compactada em 5 camadas iguais, são aplicadas em cada uma delas 12 golpes de uma altura de 0,305m. - o colarinho e a base são removidos, aplaina-se a superfície do material à altura do molde e o conjunto cilindro + solo úmido compactado é pesado; - a amostra é retirada do molde com auxílio do extrator, e partida ao meio, é coletada uma pequena quantidade para a determinação da umidade; - No caso de reuso do material o material compactado é desmanchado até que possa ser passado pela peneira N° 4, em seguida é misturado ao restante da amostra inicial; - Adicionando 2% de água à amostra para solos arenosos e 3% de água para solos argilosos, da massa original de solo, em peso, para em seguida homogeneizar a amostra. O processo é repetido pelo menos por mais quatro vezes.

Como resultado é obtida a curva de compactação marcada em ordenadas os valores dos pesos específicos secos ( $\gamma_d$ ) e nas abcissas os teores de umidade correspondentes ( $w$ );

- Peso específico seco máximo ( $\gamma_{d\text{máx}}$ ) – é a ordenada máxima da curva de compactação;
- Umidade ótima ( $W_{ot}$ ) – é o teor de umidade correspondente ao peso específico máximo;
- Curvas de saturação – relaciona o peso específico seco com a umidade, em função do grau de saturação.

### 3.6 IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS - EXPANSÃO LIVRE

Seguindo a NBR 16853:2020 o ensaio edométrico consiste em moldar o corpo de prova, no caso compactado, na célula edométrica, com teor de umidade ótima e submeter a

uma carga correspondente ao valor da carga do terreno ou carga específica de projeto que será imposta pela estrutura.

O ensaio de expansão “livre” é um método quantitativo direto para identificação de solos expansivos, Os métodos diretos são baseados na medida da expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedir esta expansão, são realizados ensaios mecânicos do tipo edométrico onde procuramos simular, ao máximo, a condição de campo sendo por carregamento, por inundação ou percolante.

Este ensaio de expansão “livre” utiliza a prensa edométrica para verificar a expansão do solo quando inundado com água. Após a inundação da célula edométrica são realizadas leituras até 72 horas ou quando se verifica o final da expansão primária. Os ensaios de expansão “livre” medem a variação de espessura da amostra fazendo-se uma relação entre a sua altura inicial e final, a expansão livre é determinada em percentual após a sua estabilização. As tensões mais utilizadas são 1kPa, 7 kPa e 10 kPa e a metodologia que utiliza a tensão de 50 kPa em amostras deformadas (compactadas ou ressecadas ao ar), (CHEN, 1965). O percentual de expansão “livre” pode ser encontrado através da equação (1):

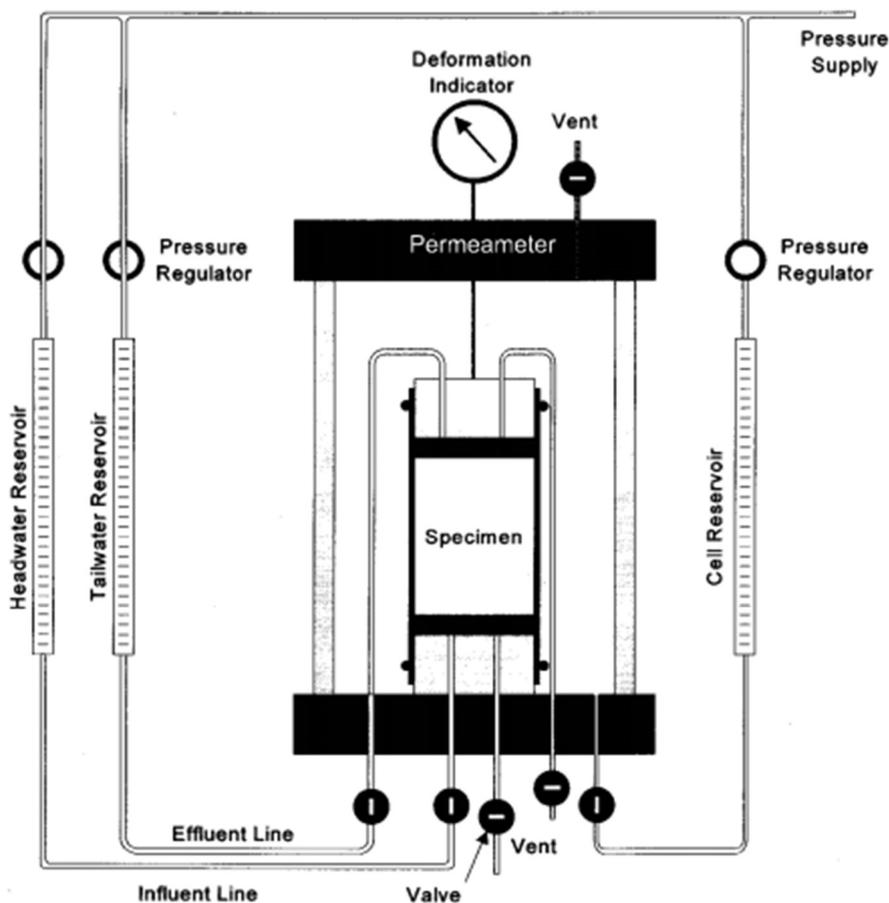
$$E_l(\%) = \frac{\Delta H}{H} * 100 \quad (1)$$

Onde:

- $E_l$  é a expansão “livre”
- $\Delta H$  é a altura da expansão devido à saturação
- $H$  é a altura do corpo de prova antes da inundação

### 3.7 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Figura 5 - Ilustração do ensaio de permeabilidade



Fonte: ASTM (2003).

Seguindo a Norma D5084 - 03 (ASTM 2003) o método utilizado consiste em moldar o corpo de prova indeformado ou compactado para a célula apropriada. Em seguida, o corpo de prova é montado nesta célula em procedimento semelhante aos ensaios triaxiais. Após instalação na célula as medições de permeabilidade são obtidas com auxílio de sistema hidráulico com o gradiente hidráulico necessário para gerar fluxo e utilizando medidores de volume para se obter a vazão que passa pela amostra. O método permite realizar os ensaios em vários estágios de pressão confinante e assim obter curvas de permeabilidade em função da variação do gradiente e da pressão confinante.

O ensaio de carga variável é indicado para solos argilosos e silto-argilosos de baixa permeabilidade. Alguns fatores podem influenciar a permeabilidade tais como: temperatura, estrutura, índice de vazios, homogeneidade, tamanho dos grãos e grau de saturação.

Tem fundamental importância para a engenharia ensaio de permeabilidade. As leis que

regem os fenômenos de fluxo de água em solos são aplicadas nas mais diversas situações, entre elas: cálculo de vazão, análise de recalques, arraste de material sólido “piping”, estudo de estabilidade e definição de materiais para filtros entre outros.

### 3.8 MÉTODO PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE DE SOLO CONTAMINADO

Segundo Amorim Jr. (2007) para a dedução do modelo de migração vertical do produto foram consideradas condições simplificadoras como: (i) o solo a montante da frente de migração está próximo da saturação e a jusante, praticamente seco, ou seja, a dispersão longitudinal do produto nos limites verticais (efeito de borda) do volume de controle simulado é nula. A dispersão do produto nos limites do volume de controle é denominada efeito de borda. Tendo em vista a dimensão superficial da bacia de contenção muito maior que a espessura de solo percolado, também se considera a dispersão transversal do produto nos limites laterais do volume de controle simulado nula, ou seja, o efeito de borda desprezível; e (ii) a migração dos compostos orgânicos através da zona não saturada do solo foi modelada como um movimento vertical unidimensional aplicando a Lei de Darcy para sistemas multifásicos. Segundo Bedient (1994), o gradiente hidráulico ( $dH/dh$ ) pode ser modelado segundo a equação:

$$\frac{dH}{dh} = \frac{P/\rho_w g + \Psi}{h} = \frac{H_f}{h}$$

Onde:

- P é a pressão exercida na frente de migração do produto no solo;
- $\rho_w$  é a densidade da água;
- g é a aceleração da gravidade;
- $\Psi$  é a pressão capilar de sucção do solo exercida na frente de migração do produto no solo;
- h representa a espessura de solo percolado pelo produto;
- $H_f$  representa a carga exercida sobre a frente de migração no solo;

A pressão P é causada pela altura da coluna líquida na bacia. Para o cálculo do gradiente hidráulico foi considerada uma coluna líquida de produto constante ao longo do

tempo e igual à altura máxima do dique de contenção, por ser a condição mais crítica.

O valor de  $h$  aumenta à medida que a frente de migração avança no solo, caracterizando um gradiente hidráulico variável ao longo do tempo. O modelo de migração vertical do produto foi deduzido em analogia à equação de permeâmetro de nível variável, reportada em Fetter(1994). As Equações (2) e (3) representam a velocidade de migração vertical dos produtos na zona não saturada do solo.

$$v_i = \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

$$v_i = \frac{k_r}{S_f} \frac{K_f}{n} \frac{H_f}{h} \quad (3)$$

Igualando as Equações (2) e (3);

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k_r}{S_f} \frac{K_f}{n} \frac{H_f}{h}$$

Onde:

- $dh$  é a espessura de solo infinitesimal percolada pelo produto;
- $dt$  tempo infinitesimal;
- $n$  é a porosidade do solo;
- $k_r$  é o coeficiente de permeabilidade relativo;
- $S_f$  é o grau de saturação do fluido no solo;
- $K_f$  é o coeficiente de permeabilidade do solo percolado com produto;
- $H_f$  é a carga exercida sobre a frente de migração no solo;
- $h$  é a profundidade de solo contaminado na zona não saturada após o tempo de migração  $t$ ;

e integrando, tem-se:

$$\int_0^h h' dh = \int_0^t \frac{k_r}{S_f} \frac{K_f}{n} H_f dt$$

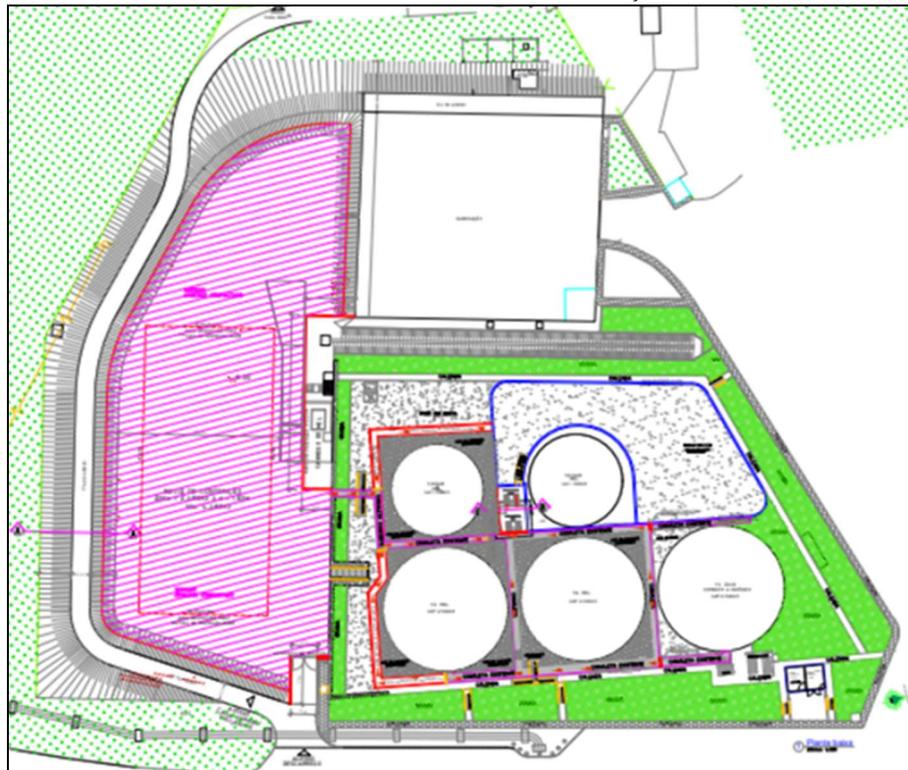
$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot k_r \cdot K_f \cdot H_f}{S_f \cdot n}} \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 MODELO DO LOCAL DE ESTUDO

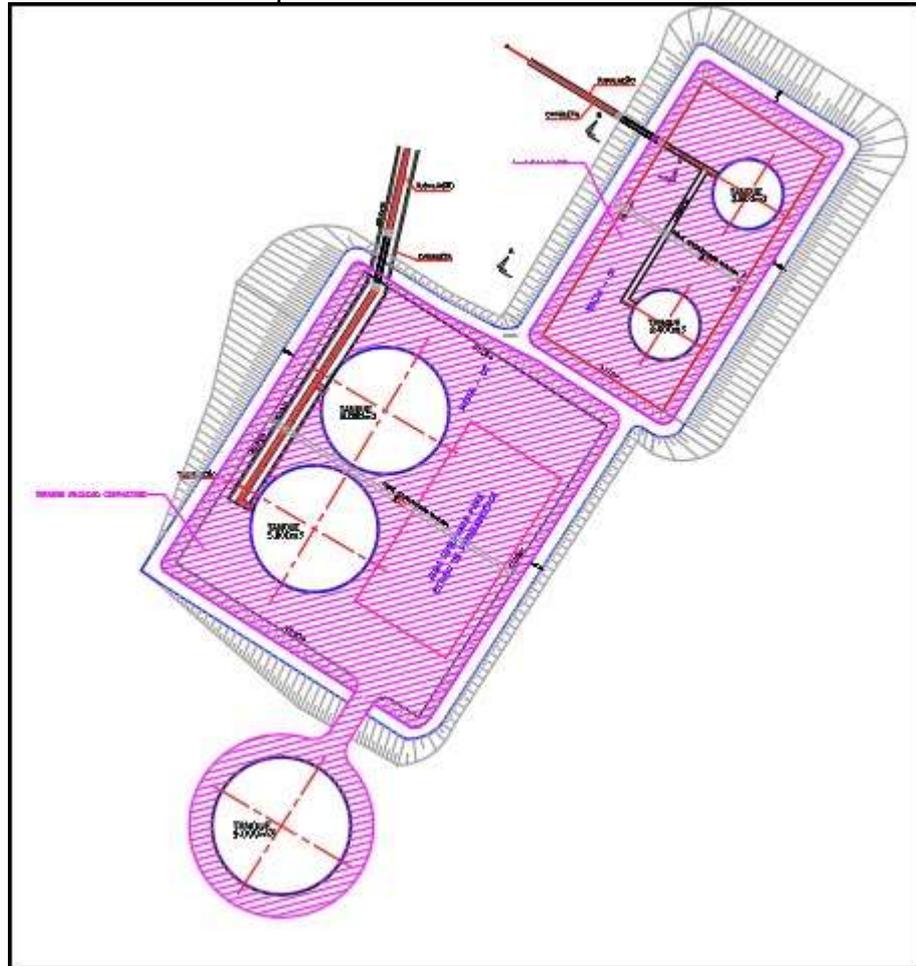
O modelo do local onde serão realizados os estudos fornece um registro dos parâmetros do solo utilizado associado a fatores climáticos e geológicos da região estudada, comprovando assim, a impermeabilização em solo compactado como a opção mais apropriada para a região, Território Rural Mata Norte de Pernambuco, tornando possível a utilização em outros projetos. Nas Figuras 2 e 3 estão ilustrados os levantamentos dos terrenos empregados durante o estudo, onde foram estudados os parâmetros do solo encontrado nas bacias de contenção de álcool, mel e melaço.

Figura 6 - Planta baixa para avaliação da impermeabilização da bacia de contenção dos tanques de armazenamento de mel e melaço



Fonte: Próprio Autor.

Figura 7 - Planta baixa para avaliação da impermeabilização das bacias de contenção dos tanques de armazenamento de álcool.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2 COLETA DE AMOSTRAS AMOLGADAS NAS BACIAS

A coleta das amostras amolgadas deve ser um procedimento rápido e econômico. Foram coletadas 16 amostras de solo no interior das bacias estudadas, essas amostras foram armazenadas no laboratório de solos da UFPE, em cada uma foi utilizada camada dupla de embalagem plástica transparente, mantendo as características do material original, com identificação de data e local da onde foram retiradas.

Figura 8 - Amostras armazenadas no Laboratório de solos da UFPE.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 9 - Amostras escolhidas para determinação dos parâmetros do solo



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.3 ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

Com base nos trabalhos de (Machado *et al.* 2011) e (Machado *et al.* 2014), esperava-se encontrar um solo Argilo-arenoso com um teor de finos (Argila e Silte) entre 20% e 50% de granulometria uniforme. Foi encontrado um teor de finos entre 57% e 62%, o que tornam mais amplos os estudos em solos mais finos.

Para a preparação da amostra:

Figura 10 - Preparação das amostras - Secagem.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 11 - Preparação das amostras – Destorroamento e Peneiramento

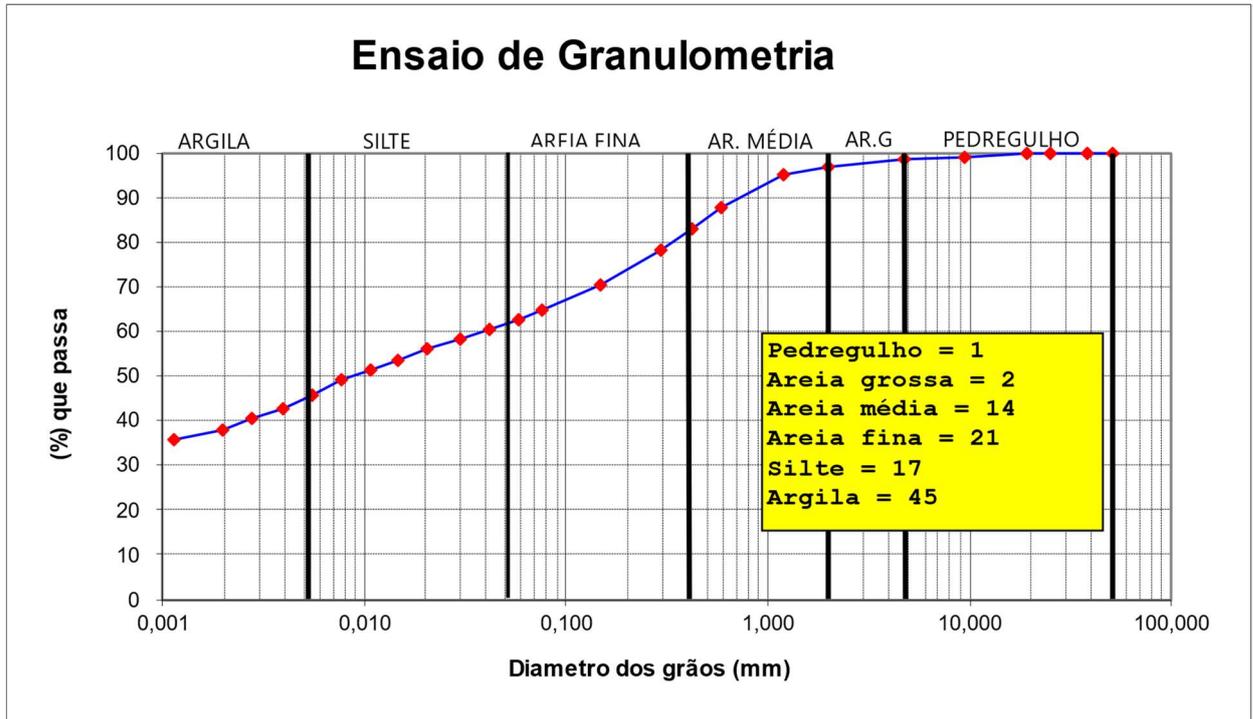


Fonte: Próprio Autor.

Entre as 16 amostras coletadas foram escolhidas as 3 que apresentaram um maior percentual de areia, recordando que o solo mais fino apresentaria menores resultados em relação ao coeficiente de permeabilidade do solo após a compactação, deste modo a decisão foi tomada a favor da segurança. Partindo do princípio de que - se a amostra que é mais favorável para permeabilidade apresentar um coeficiente de permeabilidade satisfatório para bacias de contenção, será um indício que as demais amostras também apresentem um coeficiente de permeabilidade adequado. Estão apresentados abaixo os dados referentes as 3 amostras.

#### 4.3.1 Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1

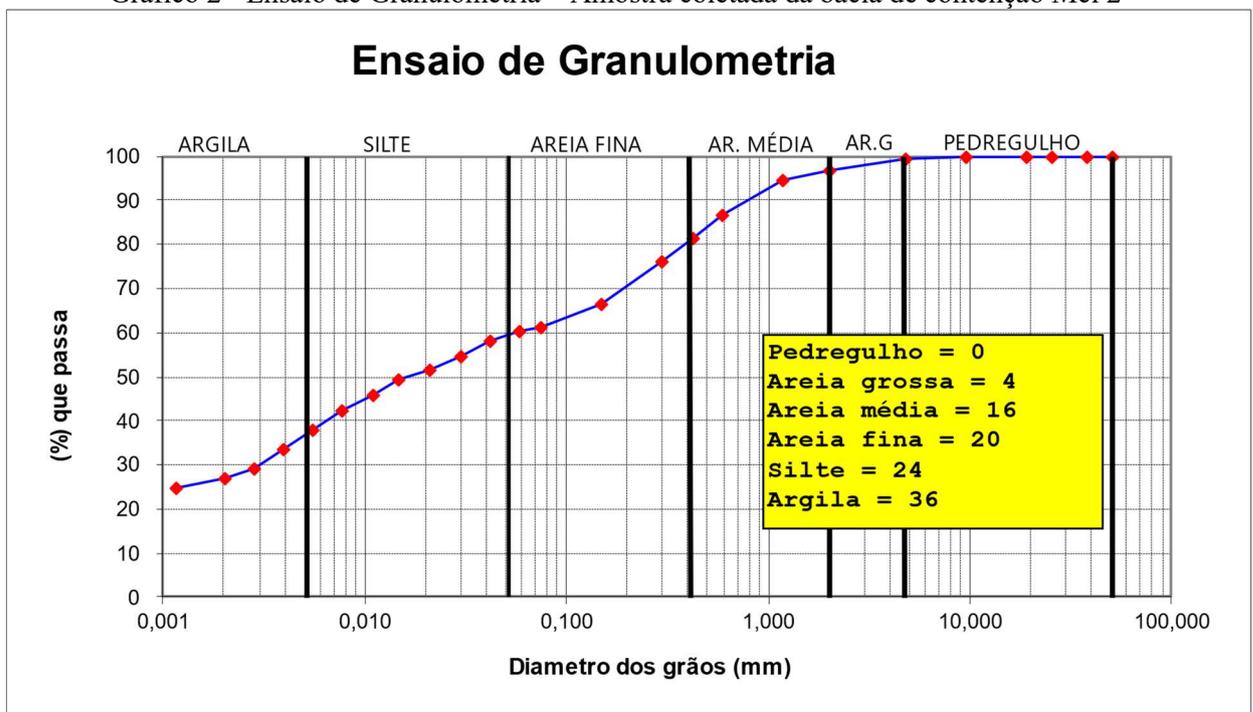
Gráfico 1 – Ensaio de Granulometria – Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.3.2 Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2

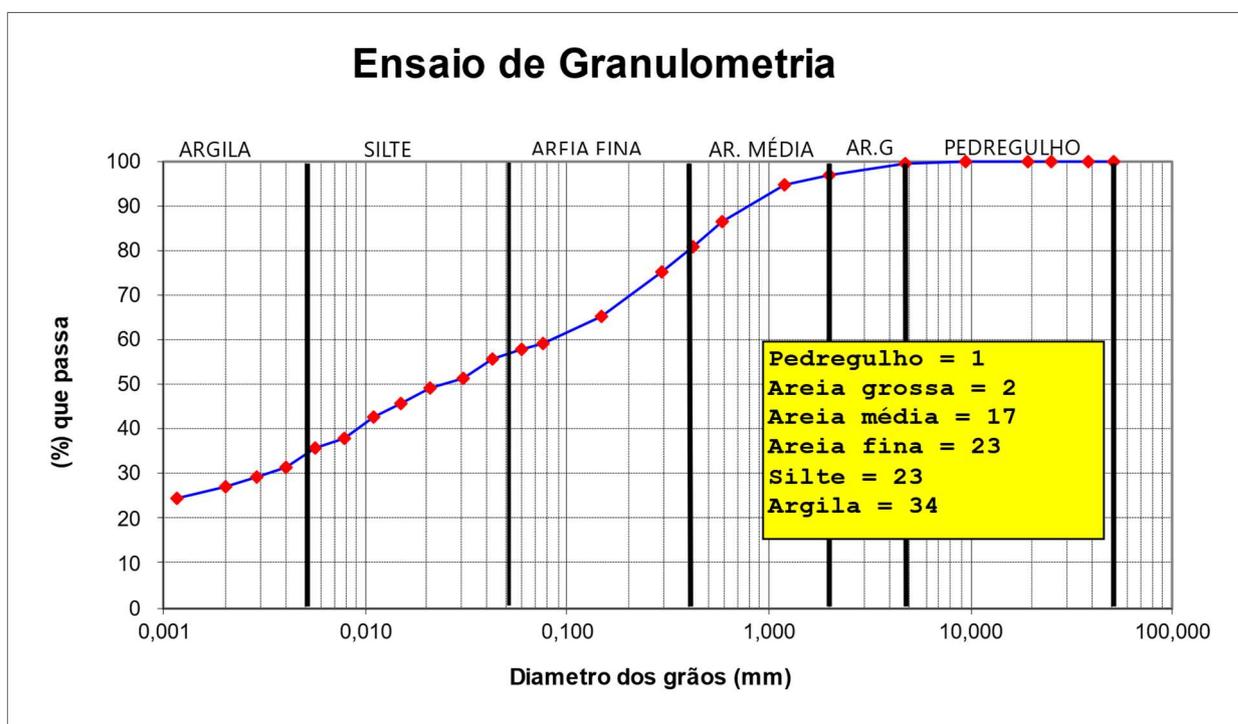
Gráfico 2 - Ensaio de Granulometria – Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2



Fonte: Próprio Autor.

### 4.3.3 Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4

Gráfico 3 - Ensaio de Granulometria – Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4



Fonte: Próprio Autor.

### 4.3.4 Parâmetros do ensaio de Granulometria

Tabela 3 - Granulometria Parcial das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4

Parâmetros	Faixa de Valores do Ensaio de Granulometria	
	Mínimo	Máximo
Teor de Finos (argila + silte)	57%	62%
Teor de Argila	34%	45%
Teor de Areia	37%	42%

Fonte: Próprio Autor.

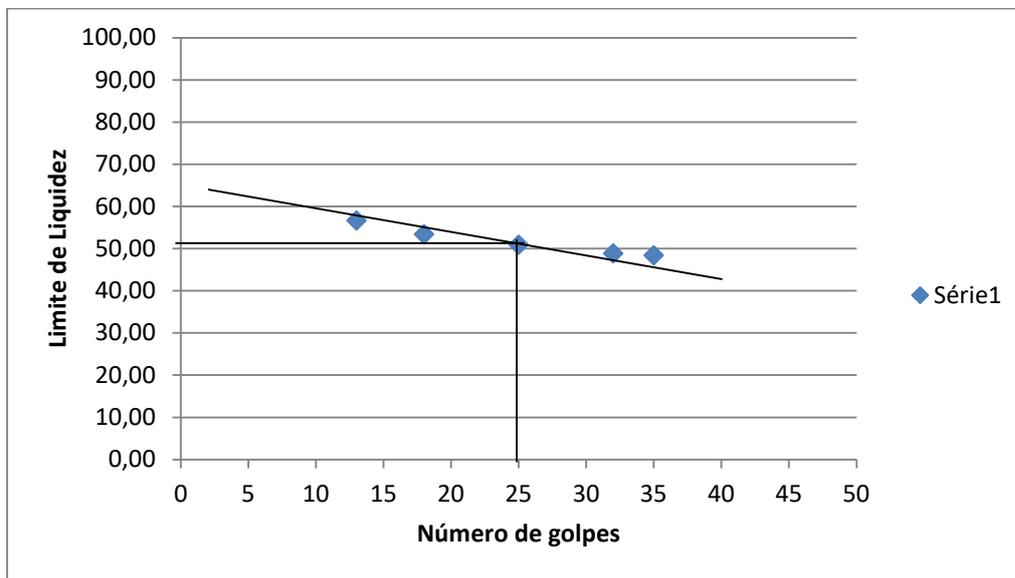
## 4.4 ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Com base nos trabalhos de (Machado *et al.* 2011) e (Machado *et al.* 2014), buscava-se encontrar solos com resultados de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) que resultassem em um Índice de Plasticidade (IP) entre 12% e 42%. Foi encontrado um uma faixa de valor para o IP entre 15% e 22%, valores que apresentam-se portanto adequados à faixa ótima de Machado sobre as propriedades dos solos para execução de bacias de contenção de líquidos orgânicos. Abaixo estão representados os dados amostras estudadas.

#### 4.4.1 Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1

Gráfico 4 - Limite de Liquidez - Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1

Índices	Valores
L.L. =	51%
L.P. =	31%
I.P. =	20%

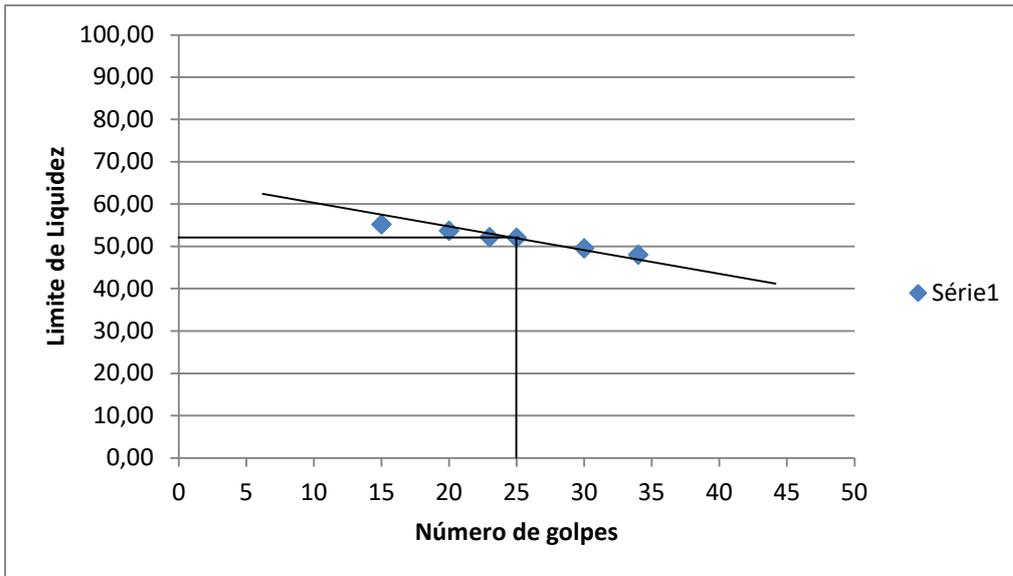


Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4.2 Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2

Gráfico 5 - Limite de Liquidez - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2

Índices	Valores
L.L. =	52%
L.P. =	30%
I.P. =	21%

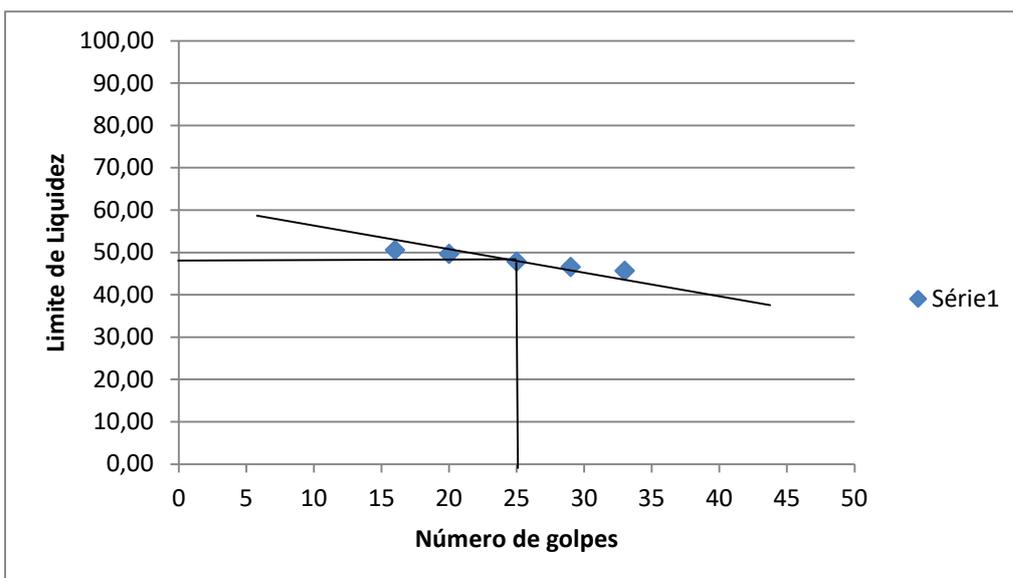


Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4.3 Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4

Gráfico 6 - Limite de Liquidez - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4

Índices	Valores
L.L. =	48%
L.P. =	33%
I.P. =	15%



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4.4 Parâmetros de I.P. obtidos através dos Limites de Atterberg

Tabela 4 - Faixa de valores – Limites de Atterberg das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4

Parâmetros	Faixa de Valores calculados (IP = LL – LP)	
	Mínimo	Máximo
Limite de Liquidez (L.L.)	48%	52%
Limite de Plasticidade (L.P.)	30%	33%
Índice de Plasticidade (I.P.)	15%	21%

Fonte: Próprio Autor.

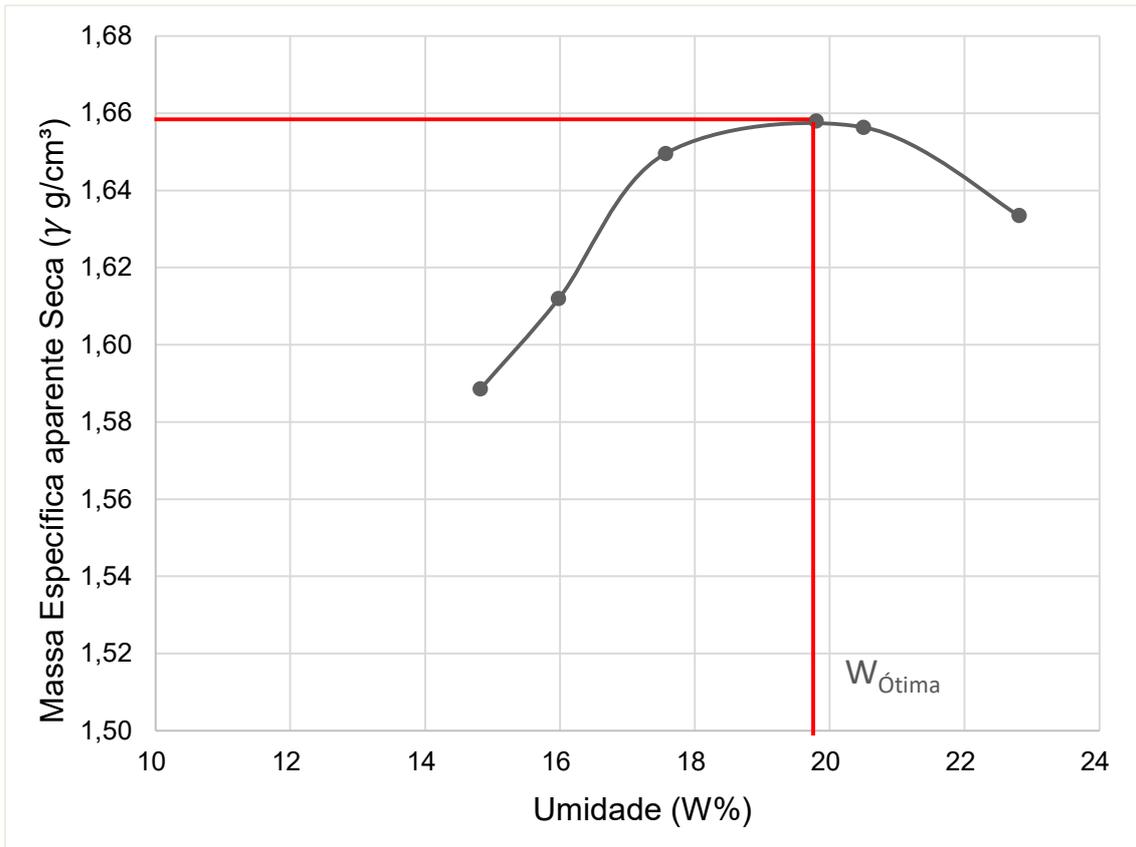
#### 4.5 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Com base nos trabalhos de (Machado *et al.* 2011) e (Machado *et al.* 2014), esperava-se encontrar resultados onde a umidade ótima – W% entre 10% e 20% e massa específica aparente seca -  $\gamma$  entre 1,65 g/cm<sup>3</sup> e 2,0 g/cm<sup>3</sup> como faixa adequada para bacias de contenção de líquidos orgânicos. Estão apresentadas abaixo os dados referentes as 3 amostras estudadas.

##### 4.5.1 Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1

Gráfico 7 - Compactação - Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1

W(%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )
14,820	1,589
15,978	1,612
17,566	1,650
20,502	1,656
22,810	1,633
19,800	1,658

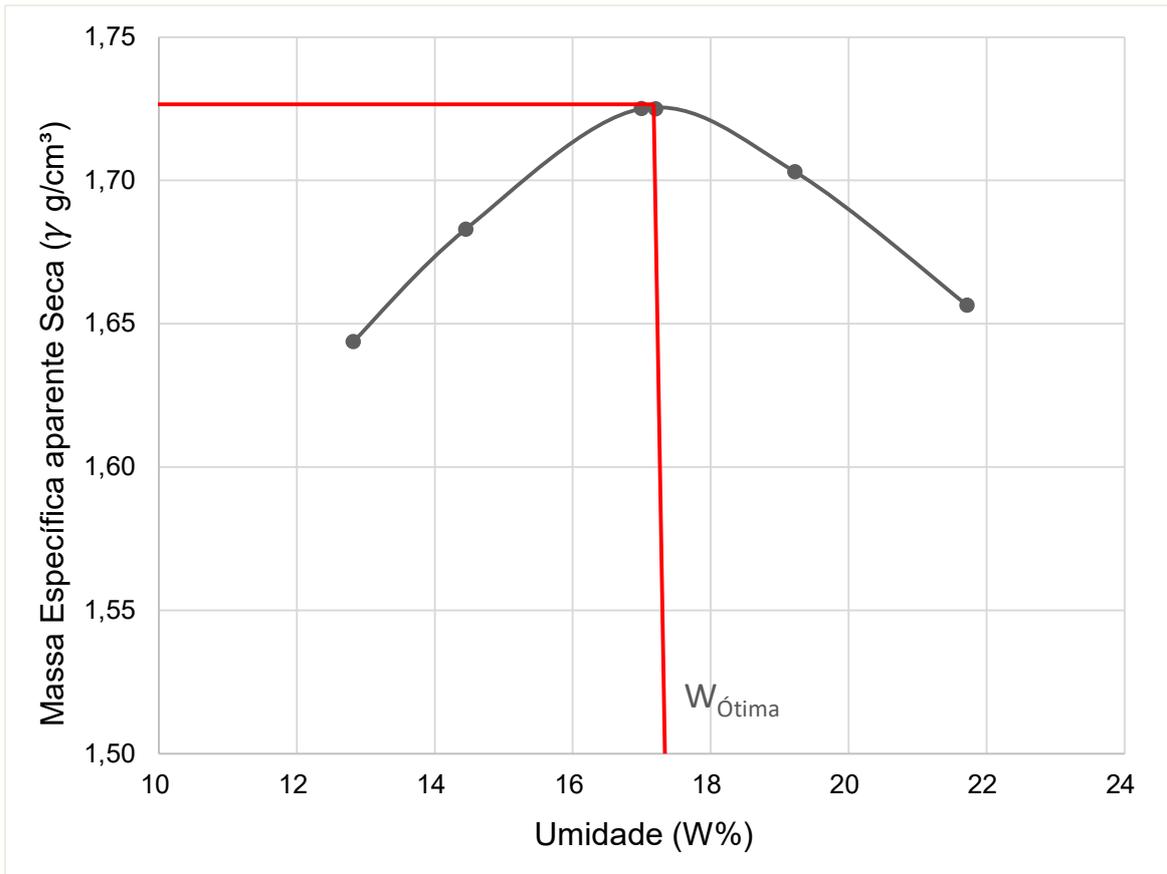


Fonte: Próprio Autor.

#### 4.5.2 Resultados da Amostra 1<sup>o</sup> camada – Bacia de contenção – Mel 2

Gráfico 8 - Compactação - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2

W(%)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )
12,8	1,644
14,4	1,683
16,9	1,725
19,2	1,703
21,7	1,656
17,2	1,725

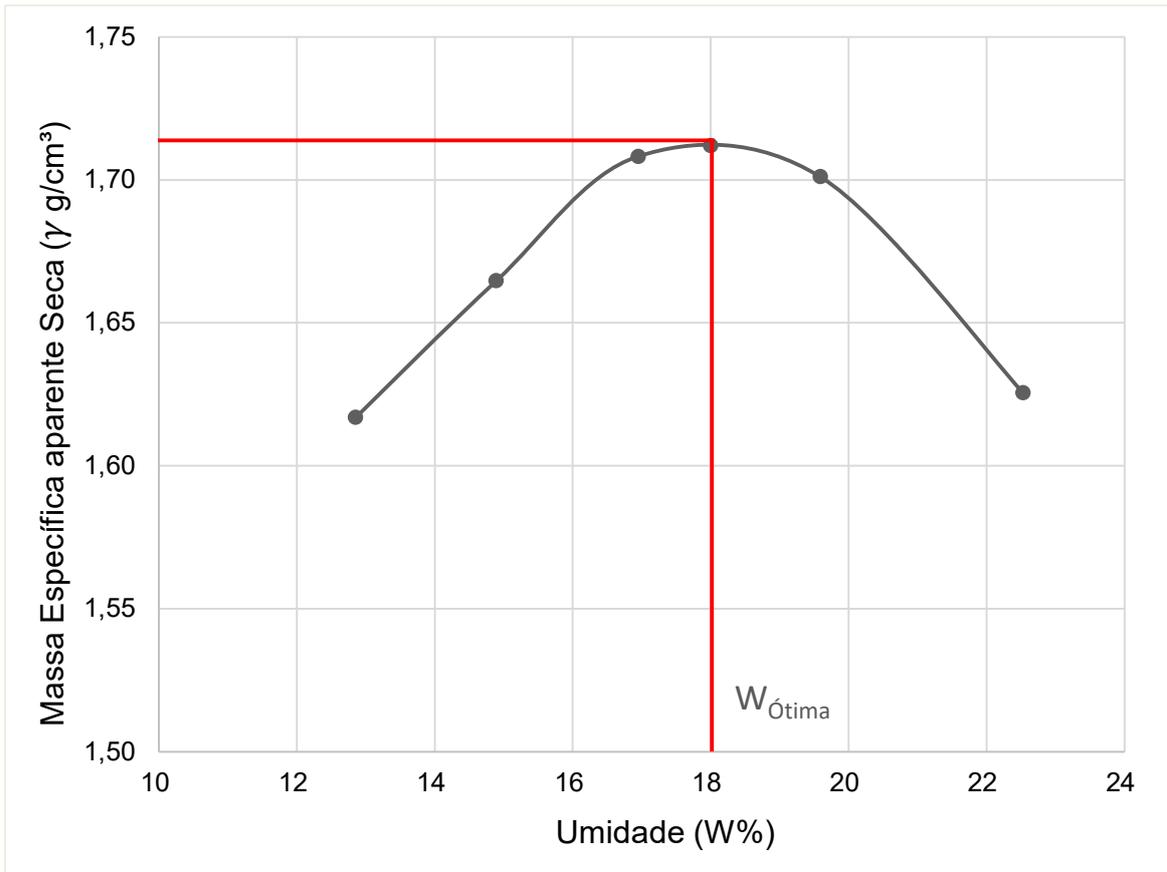


Fonte: Próprio Autor.

#### 4.5.3 Resultados da Amostra 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4

Gráfico 9 - Compactação - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4

W(%)	$\gamma(g/cm^3)$
12,8	1,617
14,8	1,665
16,9	1,708
19,5	1,701
22,5	1,626
18	1,712



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.5.4 Parâmetros do ensaio de compactação – Proctor normal

Tabela 5 - Faixa de valores - Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4

Parâmetros	Faixa de Valores dos Ensaio de Compactação – Proctor Normal	
	Mínimo	Máximo
Umidade Ótima	17%	20%
Massa Específica Aparente Seca	1,658(g/cm³)	1,725(g/cm³)

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.6 ENSAIOS DE COMPRESSIBILIDADE UNIDIMENSIONAL – EXPANSÃO LIVRE

Deve-se atentar à existência de argila expansiva, para que sejam reduzidas as variações volumétricas que podem gerar fissuras no solo compactado durante as variações de temperatura da região e alternância entre períodos de chuva e seca. Este ensaio foi realizado com o objetivo de detectar solos expansíveis que poderiam gerar uma interpretação equivocada no ensaio de permeabilidade quando referenciado a água, essa variação volumétrica também pode originar caminhos preferenciais para infiltração do líquido orgânico na camada de solo compactado. Dados do ensaio estão apresentados na próxima página.

Figura 12 - Preparação das amostras – Moldagem do Anel.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 13 - Preparação das amostras – Célula Edométrica.



Fonte: Próprio Autor.

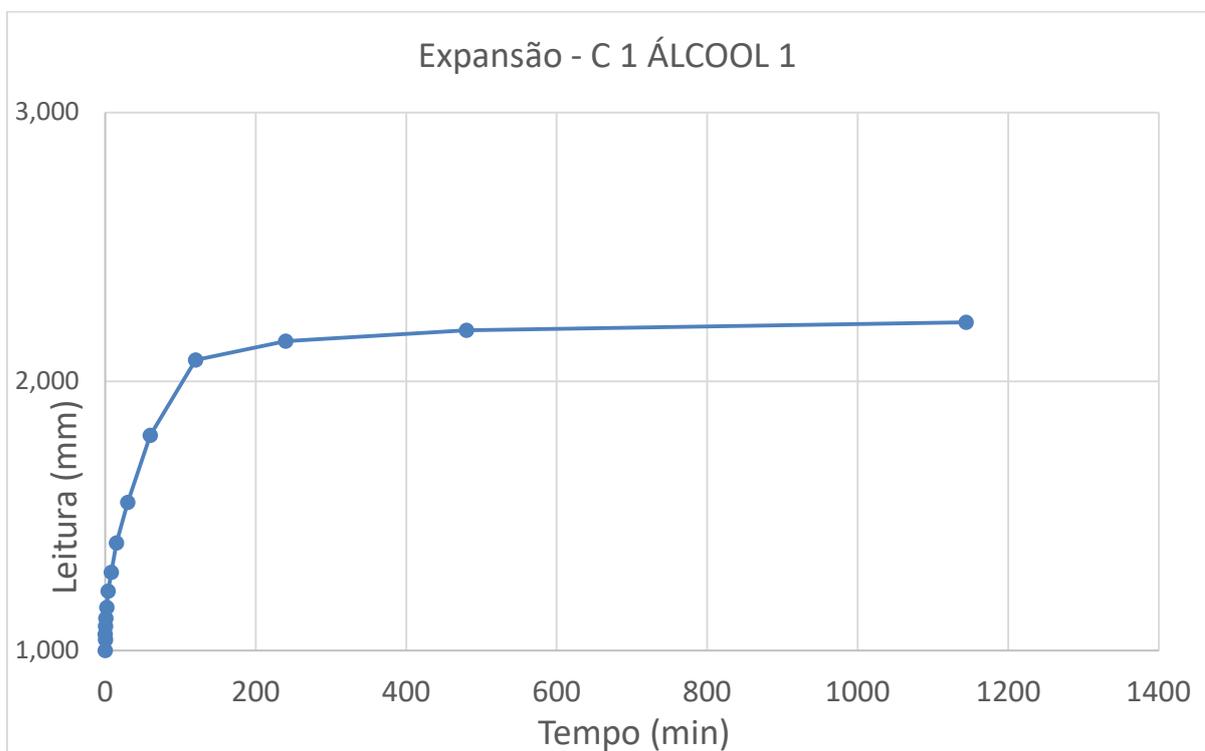
#### 4.6.1 Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Álcool 1

Tabela 6 - Ensaio de Expansão livre - Bacia de contenção Álcool 1

Dia	Leitura Extensômetro (mm)
11/jun	1,000
12/jun	2,200
Expansão Total(%)	6,10%

Fonte: Próprio Autor.

Gráfico 10 - Expansão Livre - Amostra coletada da bacia de contenção Álcool 1



Fonte: Próprio Autor.

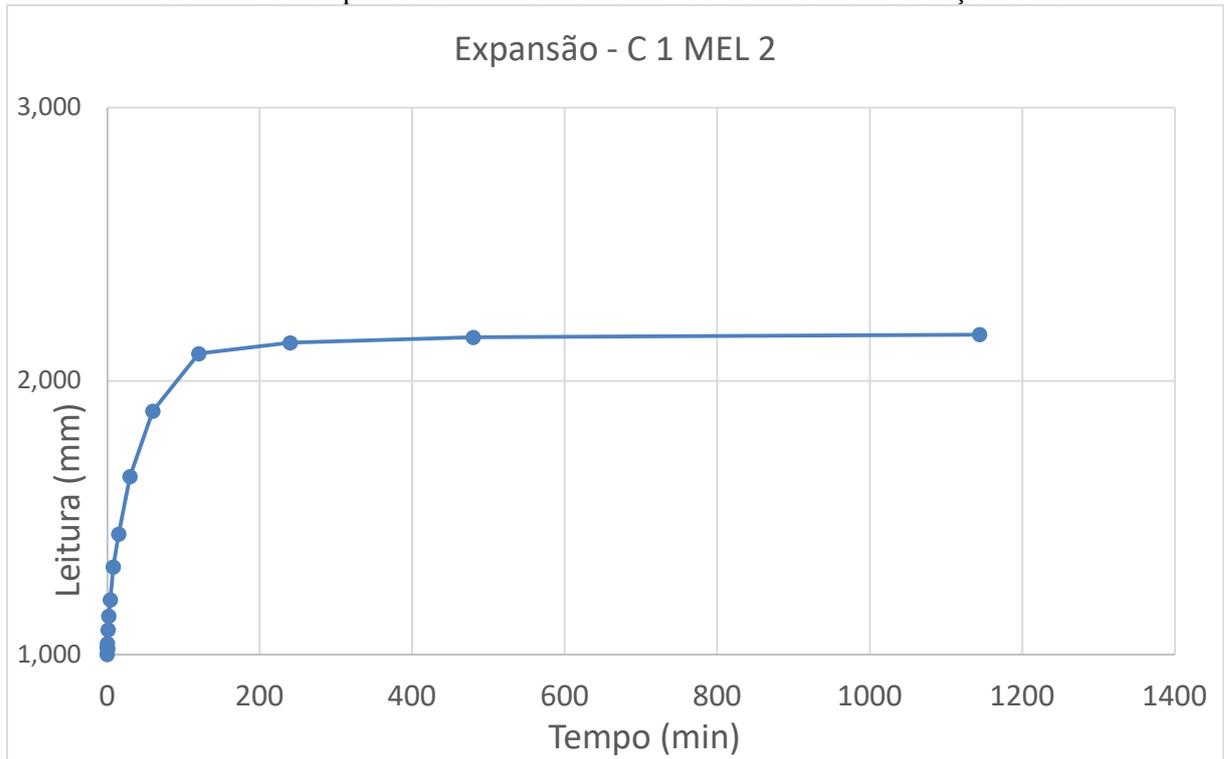
#### 4.6.2 Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 2

Tabela 7 - Ensaio de Expansão livre - Bacia de contenção Mel 2

Dia	Leitura Extensômetro (mm)
11/jun	1,000
12/jun	2,170
Expansão Total (%)	5,85%

Fonte: Próprio Autor.

Gráfico 11 - Expansão Livre - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 2



Fonte: Próprio Autor.

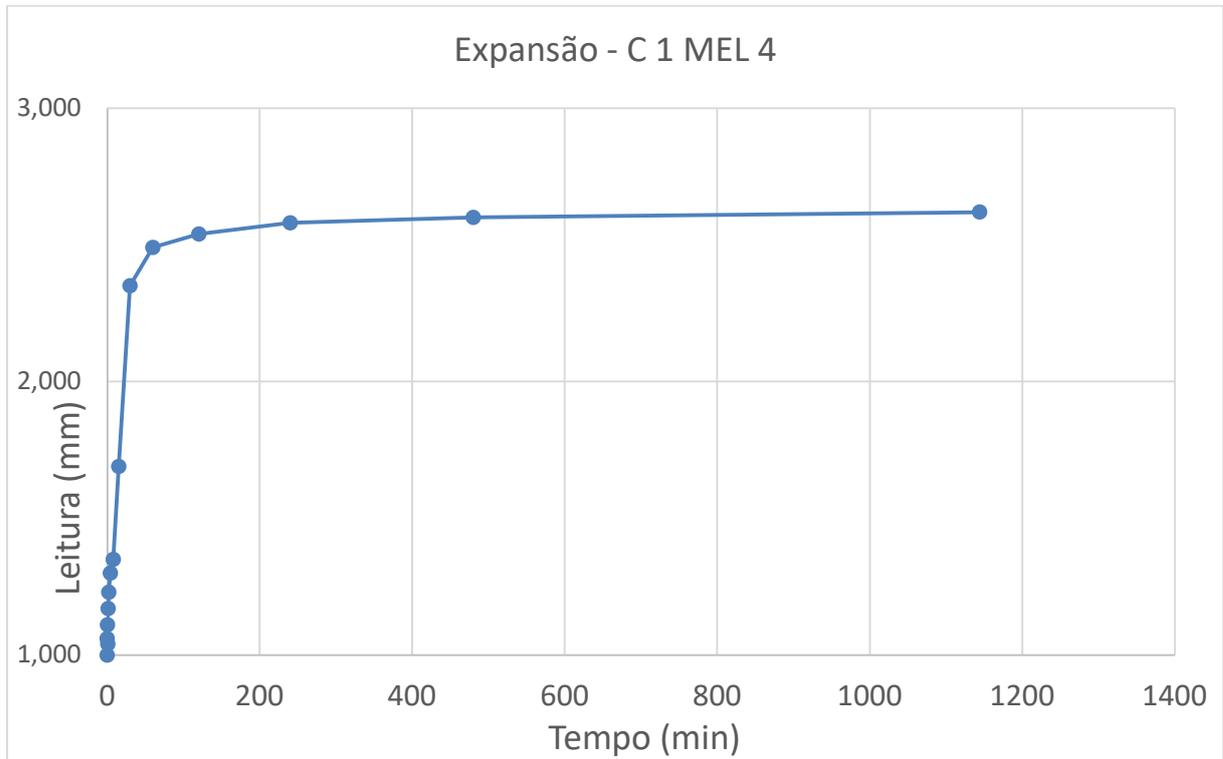
#### 4.6.3 Resultados da Amostra: 1º camada – Bacia de contenção – Mel 4

Tabela 8 - Ensaio de Expansão livre - Bacia de contenção Mel 4

Dia	Leitura Extensômetro (mm)
11/jun	1,000
12/jun	2,620
Expansão Total (%)	8,10%

Fonte: Próprio Autor.

Gráfico 12 - Expansão Livre - Amostra coletada da bacia de contenção Mel 4



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.6.4 Método utilizado para classificação da expansão dos solos encontrados nas bacias estudadas:

Tabela 9- Classificação do grau de expansão do solo.

Critério de SEED <i>et al.</i> (1962)		Chen (1983)	Grau de Expansividade
Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 7 kPa	Limites de Atterberg do solo estudado	Limites de liquidez	
0 – 1	< 10	LL < 30	Baixa
1 – 5	$10 \leq IP \leq 20$	$30 \leq LL \leq 40$	Média
5 – 25	$20 < IP \leq 35$	$40 < LL \leq 60$	Alta
>25	$IP > 35$	LL > 60	Muito alta

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados da expansão "livre" dependem da tensão de sobrecarga que o solo está submetido. Os resultados obtidos através dos ensaios Limites de Atterberg e expansão "livre", utilizando a Equação (1) -  $(E_l = (\Delta h / H) * 100$  para a pressão de 7kPa, apresentaram uma variação de 5,85% a 8,10%. Pelo critério de Seed *et al.* (1962) e Chen (1983), o solo apresenta-se mais próximo do grau de expansividade alto.

#### 4.6.5 Método proposto para estabilização da expansão dos solos estudados

Devido à grande aplicabilidade e baixo custo, a cal vem ganhando grande destaque na construção civil, a mistura solo-cal é um dos métodos mais utilizados, apresentando melhorias quanto à redução de expansão do solo. A granulometria fina do solo reage quando em contato com a cal desencadeando benefícios relacionados com sua trabalhabilidade, plasticidade e principalmente seu caráter expansivo.

Chen (1975) considera que a cal é o agente mais favorável para reduzir o potencial de expansão dos solos. Evans e Bell (1981) afirmam que nos primeiros incrementos de cal ocorrem as maiores reduções do comportamento expansivo do material.

No trabalho de Barbosa (2013) foi verificado que os valores obtidos com relação a expansão, após a adição da cal aos solos estudados, apresentaram uma redução da expansão à medida que uma maior quantidade de estabilizante foi adicionada a amostra ensaiada. A adição de 3% de cal ao solo tornou a mistura menos expansiva, estabilizando-a quanto à expansão “livre”. No caso de Barbosa (2013) - para uma tensão de expansão de 10 kPa - o solo estudado apresentou uma expansão livre de 7,45% para o solo sem cal, porém com adição de 3% de cal à amostra o valor da expansão livre diminuiu para 0,4%. Também foi verificado que o valor de 7% de cal adicionado ao solo anulou a sua tensão de expansão.

Concluimos que a adição de 3% de cal ao solo, poderia tornar a mistura menos expansiva, estabilizando o solo quanto à expansão, porém, devem ser realizados estudos mais profundos sobre a mineralogia da argila que compõe o solo da bacia de contenção com o objetivo de remediar solos potencialmente expansivos para evitar trincas e fissuras no interior das bacias de contenção.

#### 4.7 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

No caso das bacias de contenção para mel e melaço (Mel 2 e Mel 4), não foram realizados ensaios de permeabilidade em concordância com a eficiência encontrada no trabalho de Amorim Jr (2007) para líquidos com alta viscosidade em bacias de contenção de solo, como citado em seu trabalho: “produtos de altíssima viscosidade, apresentaram coeficientes de permeabilidade na ordem de  $10^{-8}$  cm/s, independente das mesmas apresentarem valores de permeabilidade à água entre as ordens de grandeza  $10^{-7}$  a  $10^{-3}$  cm/s.”

O ensaio realizado para estudar a eficiência das bacias de contenção em solo compactado foi baseado na norma vigente NBR 17505:2015 que estabelece um coeficiente de

permeabilidade máximo referenciado a água, porém não apresenta nenhum valor para o coeficiente de permeabilidade referenciado ao produto, visto isso o ensaio foi realizado com o objetivo de adquirir o coeficiente e permeabilidade do produto no solo compactado para estimar a espessura da camada de solo contaminado pelo Etanol no caso de um derramamento.

Está apresentado abaixo o ensaio realizado na amostra de Álcool 1, o Etanol utilizado no estudo está classificado na Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ de acordo com a NBR 14725-4:2010 como ETANOL HIDRATADO COMBUSTÍVEL EHC, mesmo Etanol utilizado nos estudos de Amorim Jr (2007).

O Tri-Flex 2 da ELE International Inc./ Soiltest Products Division foi o equipamento utilizado para obtenção do coeficiente de permeabilidade em laboratório, é um permeâmetro de carga constante e parede flexível, através desse aparelho também podem ser determinados os coeficiente de permeabilidade de outros líquidos e gases. Nos procedimentos iniciais colocam-se papel filtro e pedra porosa no topo e na base do corpo-de-prova, o conjunto é envolvido por uma membrana de borracha flexível e impermeável, em seguida é instalado o “cabeçote superior”. O permeâmetro é preenchido por água e aplica-se uma tensão confinante; inicia-se um fluxo ascendente para saturar a amostra e expulsar o ar contido nos vazios do corpo-de-prova. O ensaio pode ser finalizado após verificada a constância do coeficiente de permeabilidade. A tensão confinante aplicada neste estudo foi de 60 kPa e o gradiente hidráulico de 50 kPa, uma observação importante para realização do ensaio é que a amostra deve estar totalmente saturada, porque as bolhas de ar existentes em uma amostra não saturada são obstáculos ao fluxo do líquido, logo, o coeficiente de permeabilidade do solo não saturado seria menor do que o totalmente saturado.

Figura 14 - Ensaio de Permeabilidade – Triflex



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.7.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Tabela 10 - Coeficiente de Permeabilidade do Etanol(EHC) no Solo compactado

Amostra	Coeficiente de permeabilidade do Etanol no Solo (cm/s)
Bacia de contenção - Álcool 1	$5,5 \times 10^{-7}$

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.8 ESTIMAR A PROFUNDIDADE DE SOLO CONTAMINADO.

Os resultados estimados por Amorim Jr. (2007) de comprimento de solo contaminado por Etanol ficaram entre 20cm e 80cm, Deve-se observar que o tempo para retirada do líquido adotado foi de 72h após o vazamento, e os ensaios foram realizados em amostras indeformadas removidas das bacias de contenção estudadas em sua Dissertação.

Para este estudo foi encontrado o valor de 19cm, resultado abaixo dos valores encontrados por Amorim Jr, esse número está dentro do previsto por ter sido utilizado um tempo de resposta de 24h e o ensaio realizado com amostra compactada – Proctor Normal,

fatores esses que influenciaram diretamente na equação (4) que foi utilizada para estimar o comprimento de solo contaminado.

#### 4.8.1 Considerações para a aplicação do modelo

Para esse modelo, foi adotado que  $H_f$  não varia ao longo do tempo ou com o aumento da profundidade de solo percolado, por se tratar da situação mais crítica em casos de vazamentos de bacias de contenção.

No estudo de Amorim Jr. (2007) a carga exercida na frente de migração ( $H_f$ ) foi calculada considerando a pressão capilar de sucção ( $\Psi$ ) igual a um metro para todas as bacias de contenção, tendo em vista as características granulométricas e mineralógicas dos solos (Bedient, 1994). Como neste trabalho não foram estudadas as características mineralógicas dos solos foi considerado o mesmo valor de  $H_f$  calculado por Amorim para o Etanol.

Onde:

$$H_f = P/\rho_w g + \Psi = 343 \text{ cm}$$

Para a porosidade foram adotadas correlações. A condição de saturação do solo após a percolação do produto foi adotada  $S_f = 1$ , ou seja, o produto preenche 100% dos poros do solo percolado. O coeficiente de permeabilidade relativo também foi adotado  $k_r = 1$ , considerando a condição de solo seco no momento do derramamento. Isto permitiu modelar a profundidade de solo contaminado em função do tempo de migração vertical do Etanol nas bacias de contenção e assim estimar, em função do tempo de resposta de 24h previsto em caso de derramamentos, assim foram estimadas as espessuras de solo contaminado nas bacias de contenção. Aplicando os coeficientes de permeabilidade do produto no solo a equação (4) temos:

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot k_r \cdot K_f \cdot H_f}{S_f \cdot n}} \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

Tabela 11 - Estimativa da camada de solo contaminado para a bacia de Álcool 1.

Amostra	Estimativa de solo contaminado – Etanol (EHC)
Bacia de contenção - Álcool 1	19 cm

Fonte: Próprio Autor.

Recordando o objetivo geral do trabalho, as bacias de contenção em solo argiloso compactado apresentam-se eficientes para contenção de alguns líquidos orgânicos, principalmente os mais viscosos. Por consequência da estimativa de profundidade de solo contaminado – Equação (4) – Etanol(EHC) podemos estimar a espessura da camada mínima necessária para impermeabilizar as bacias de contenção que apresentem propriedades semelhantes as identificadas na bacia de Álcool 1.

Foi adotado um Fator de Segurança(FS) para essa estimativa, o número escolhido para majorar os valores obtidos nos ensaios foi 1,5 tendo em vista ser um valor consagrado na prática da geotecnia.

Em estudos posteriores vale a pena ressaltar que quando a confiabilidade nos ensaios não for boa ou por problemas na amostragem, armazenagem entre outros, vale a pena majorar um pouco mais o FS.

#### 4.9 TABELAS COM RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS

Reunindo os resultados obtidos durante os trabalhos de Machado *et al.* (2014) e Machado *et al.* (2011), foi criada a Tabela 12 com os parâmetros estudados e a faixa de valores.

Tabela 12 - Tabela formada com os parâmetros ótimos do solo obtidos por Machado et al. (2011) e Machado et al. (2014) – Adaptado.

Parâmetros	Faixa de Valores	
	Mínimo	Máximo
Índice de Plasticidade	12%	42%
Teor de Finos (argila + silte)	12%	60%
Teor de Argila	20%	45%
Teor de Areia	34%	70%
Umidade Ótima	10%	20%
Densidade seca máxima	1,65(g/cm <sup>3</sup> )	2,0 (g/cm <sup>3</sup> )

Fonte: Próprio Autor.

Fazendo um estudo sobre as propriedades dos solos das três amostras estudadas, assim como as faixas de valores ótimos de propriedades dos solos para execução de bacias de contenção de líquidos orgânicos proposta por Machado *et al.* (2011) e Machado *et al.* (2014), foi elaborada a Tabela 13 com o conjunto de propriedades dos solos encontrados nas três bacias, Álcool 1, Mel 2 e Mel 4, com o objetivo de comparar as tabelas e estimar camada mínima impermeabilizante baseando-se nos parâmetros do solo compactado.

Tabela 13 - Tabela formada com os parâmetros do solo encontrados nas amostras retiradas das bacias de contenção Álcool 1, Mel 2 e Mel 4.

Parâmetros	Faixa de Valores	
	Mínimo	Máximo
Índice de Plasticidade	15%	21%
Teor de Finos (argila + silte)	57%	62%
Teor de Argila	34%	45%
Teor de Areia	37%	42%
Umidade Ótima	17%	20%
Densidade seca máxima	1,658(g/cm <sup>3</sup> )	1,725(g/cm <sup>3</sup> )

Fonte: Próprio Autor.

Com o objetivo de estudar as propriedades ótimas de solos para camadas de impermeabilização em bacias de contenção e propor uma espessura para a camada de solo impermeabilizante com base nos parâmetros do solo compactado – resguardando o fato de que essa estimativa é baseada na Equação (4) e por isso não apresenta resultado real – foi elaborada a Baseado-se nas “faixas de valores ótimos para a construção de barreiras minerais para contenção de fluidos orgânicos.” encontradas nas tabelas - Tabela 1 e Tabela 2 - de Machado *et al.* (2011) e Machado *et al.* (2014) foi elaborada a Tabela 12. Posteriormente a Tabela 13 foi criada com os parâmetros dos solos argilosos encontrados nas bacias denominadas: Álcool 1, Mel 2 e Mel 4. E então, baseando-se nos estudos de Amorim Jr. (2007) foi elaborada a

- **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** contendo as características dos solos presentes nas três bacias e a estimativa da espessura mínima da camada necessária para impermeabilizar as bacias de contenção, que apresentem propriedades do solo semelhantes, após um possível vazamento em tanques de armazenamento de Etanol (EHC). Durante a realização do estudo de caso foram elaboradas as seguintes recomendações:

retenção.

- Foi observado em vários trabalhos, como o de Amorim Jr. (2007), a possibilidade de utilização de gramíneas como camada de proteção contra a incidência direta dos raios de sol que provocaria o fissuramento do solo argiloso da camada impermeabilizante tornando-a inoperante.
- Foi observado no trabalho de Barbosa (2013) que após a adição da cal ao solo, provavelmente as misturas estabilizadas apresentarão uma redução à expansão, a medida que uma maior quantidade de cal for adicionada ao solo. A adição de 3% de cal ao solo torna a mistura menos expansiva, estabilizando-a quanto à expansão “livre”. O valor de 7% de cal adicionado ao solo apresenta-se como solução segura, econômica e eficaz visto que as misturas estudadas por Barbosa (2013) demonstraram sua tensão de expansão anulada. É recomendado que sejam realizados ensaios de expansão livre e mineralogia do solo ou outros estudos mais profundos para constatar a estabilização quanto à expansão do solo após adição de cal e detectar argilominerais com características expansivas.
- Outro ponto indispensável é a vistoria periódica, especialmente ao final de cada estação seca, observando a presença de fissuras que possam tornar inoperante a camada de impermeabilização. Caso isso aconteça é necessária a manutenção, selando tais áreas fissuradas com a sua retirada, homogeneização e recompactação. Neste caso, é necessária a identificação do que provocou o fissuramento: se a pequena espessura da camada de proteção, o excesso de solo argiloso na camada impermeabilizante ou algum outro fator a ser identificado.
- Tendo em vista que as bacias de retenção avaliadas situam-se na área da Zona da Mata, onde praticamente em todas as estações de chuvas ocorrem precipitações diárias superiores a 80 mm, é indispensável o cuidadoso cálculo hidrológico/hidráulico para o dimensionamento dos diques de modo a considerar um acidente de vazamento dos tanques ao mesmo tempo de uma precipitação acima da média.
- De acordo com a NBR 17505:2015, a bacia de retenção deve estar próxima a, no mínimo, duas vias diferentes, pavimentadas ou estabilizadas que dêem passagem para dois veículos de combate ao incêndio ou 5 m de largura, escolhendo o maior destes valores. Para bacias com capacidade até 1.000m<sup>3</sup> é permitida apenas uma via para passagem do veículo de combate a incêndio ou 3 m.
- Amorim Jr (2007) alerta que uma das principais questões a serem respondidas através

dos estudos de avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção talvez não seja sobre o valor máximo do coeficiente de permeabilidade referenciado à água, mas sim qual deve ser o tempo máximo que os poluentes podem ficar retidos nas bacias de contenção de forma que seja possível o acionamento dos planos de emergência sem que o produto derramado cause maiores prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente.

- Em caso de vazamento ou derramamento de produtos em uma bacia de contenção, o tempo previsto em um plano de contingência para conter e remover o produto livre da superfície da bacia é chamado de tempo de resposta. Investir na estrutura do plano de contingência é um dos meios de reduzir o tempo de resposta em caso de derramamento, essa medida possibilita uma melhor locação de recursos financeiros nas áreas com potencial de contaminação mais elevado.

com propriedades do solo e a estimativa para espessura de camada impermeabilizante mínima necessária para contenção do Etanol - ETANOL HIDRATADO COMBUSTÍVEL EHC.

Tabela 14 - Tabela formada com os resultados dos parâmetros do solo encontrados nos ensaios realizados nas três amostras estudadas: Álcool 1, Mel 2 e Mel 4

Parâmetros	Faixa de Valores	
	Mínimo	Máximo
Índice de Plasticidade	15%	21%
Teor de Finos (argila + silte)	57%	62%
Teor de Argila	34%	45%
Teor de Areia	37%	42%
Umidade Ótima	17%	20%
Densidade seca máxima	1,658(g/cm <sup>3</sup> )	1,725(g/cm <sup>3</sup> )
Estimativa para camada mínima impermeabilizante – Bacia de Álcool 1	<b>30 cm</b>	

Fonte: Próprio Autor.

## 5 ORÇAMENTO

Quando comparamos as bacias de contenção em solo compactado com as outras opções como utilização de concreto e geomantas PEAD para execução de impermeabilização, são esperadas diversas vantagens das bacias em solo compactado, tais como:

- Redução da temperatura no entorno dos tanques, o que reduz a evaporação do líquido contido.
- Fator ecológico e ambiental, o tapete de grama mantém preservada a área verde, uma vantagem quando comparado com outros tipos de revestimento como concreto e geossintéticos.
- A manutenção também é uma vantagem notável do solo compactado, visto que o concreto precisa de juntas de dilatação e os geossintéticos tem prazo de validade em relação as suas características de estanqueidade com o envelhecimento – item relevante no nordeste onde a exposição ao sol é intensa.
- Vantagem econômica, a impermeabilização em solo compactado é de menor preço quando comparado com as demais opções, podendo também ser mais rápido executado.

Com o objetivo de explicar melhor sobre a grande vantagem econômica da execução de bacias de contenção em solo compactado, foi realizado um orçamento global baseado nos valores da tabela SINAPI (Custos e Índices da Construção Civil – CAIXA) de 2021 tornando possível comparar os custos da implementação das bacias de contenção em solo compactado, polietileno de alta densidade (PEAD) e concreto de cimento portland.

O volume do maior tanque identificado durante o estudo de caso é de 2.500m<sup>3</sup>, portanto para um dique com 1,8m de altura, temos 1389m<sup>2</sup> de área útil a ser impermeabilizada, foram utilizados os valores de 7cm para espessura do concreto e 30cm para a espessura de solo compactado.

Mais uma vantagem da bacia em solo compactado é utilizar o próprio solo ao redor do tanque de armazenamento zerando o item de momento de transporte. Deixando claro que as fundações diretas localizam-se abaixo dos tanques de armazenamento e são estruturas independentes das bacias de contenção, portanto, a presença de argilas expansíveis não apresenta risco a fundação dos tanques de armazenamento.

### 5.1.1 Orçamento para bacia de contenção em solo

Descrição	Unidade	Custo
PLANTIO DE GRAMA ESMERALDA (EM TAPETE) INCLUINDO PREPARO DE SOLO	m <sup>2</sup>	R\$ 15,32
COMPACTAÇÃO MECÂNICA PESADA DE ATERRO A 100 POR CENTO DO PRÓCTOR NORMAL, MEDIDO NA SEÇÃO, INCLUSIVE ESPALHAMENTO, UMEDECIMENTO E HOMOGENEIZAÇÃO.	m <sup>3</sup>	R\$ 3,15
Custo global do serviço:		R\$ 22.592,09

Fonte: Próprio Autor.

### 5.1.2 Orçamento para bacia de contenção em Concreto

Descrição	Unidade	Custo
CONCRETO SIMPLES FCK = 15 MPA, DOSADO CONFORME A CONDIÇÃO "B" DA NORMA NBR 12655 E COM CONSUMO DE CIMENTO MÍNIMO 300 KG/M3, PARA LANÇAMENTO CONVENCIONAL; PREPARO.	m <sup>3</sup>	R\$ 404,00
ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS PRENSADOS ASSENTADOS E REJUNTADOS COM ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA NO TRAÇO 1:3 - 1 VEZ.	m <sup>2</sup>	R\$ 290,00
IMPERMEABILIZAÇÃO COM APLICAÇÃO DE TINTA ASFÁLTICA PARA CONCRETO, ALVENARIA, METAIS E MADEIRAS ( IGOL A, NEUTROL, OU SIMILAR ) EM DUAS DEMÃOS.	m <sup>2</sup>	R\$ 11,32
EXECUÇÃO DE JUNTAS DE CONTRAÇÃO PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO.	m	R\$ 0,34
Custo global do serviço:		R\$ 132.986,40

Fonte: Próprio Autor.

**5.1.3 Orçamento para bacia de contenção em PEAD**

Descrição	Unidade	Custo
MANTA TERMOPLASTICA, PEAD, GEOMEMBRANA LISA, E = 1,50 MM (NBR 15352), COM MÃO DE OBRA ENVOLVIDA.	m <sup>2</sup>	R\$ 29,52
Custo global do serviço:		R\$ 41.003,28

Fonte: Próprio Autor.

## 6 CONCLUSÕES

O valor do coeficiente de permeabilidade do solo obtido através do ensaio de permeabilidade Triflex onde o líquido permeado foi o Etanol (EHC) é de  $5,5 \times 10^{-7}$  cm/s. Esse número apresenta uma melhora nos resultados em comparação dos os ensaios de Amorim Jr. (2007), esse fato está relacionado com o uso da amostra compactada - Proctor Normal, e o tempo de resposta de 24h, fatores que influenciam diretamente na equação (4).

Baseado-se nas “faixas de valores ótimos para a construção de barreiras minerais para contenção de fluidos orgânicos.” encontradas nas tabelas - Tabela 1 e Tabela 2 - de Machado *et al.* (2011) e Machado *et al.* (2014) foi elaborada a Tabela 12. Posteriormente a Tabela 13 foi criada com os parâmetros dos solos argilosos encontrados nas bacias denominadas: Álcool 1, Mel 2 e Mel 4. E então, baseando-se nos estudos de Amorim Jr. (2007) foi elaborada a **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** contendo as características dos solos presentes nas três bacias e a estimativa da espessura mínima da camada necessária para impermeabilizar as bacias de contenção, que apresentem propriedades do solo semelhantes, após um possível vazamento em tanques de armazenamento de Etanol (EHC). Durante a realização do estudo de caso foram elaboradas as seguintes recomendações:

- É importante salientar a necessidade da verificação de volumes disponíveis de solo próximo as bacias para a execução da camada impermeabilizante, tanto para o caso da utilização de jazidas externas como para a utilização do próprio solo da bacia de contenção.
- Foi observado em vários trabalhos, como o de Amorim Jr. (2007), a possibilidade de utilização de gramíneas como camada de proteção contra a incidência direta dos raios de sol que provocaria o fissuramento do solo argiloso da camada impermeabilizante tornando-a inoperante.
- Foi observado no trabalho de Barbosa (2013) que após a adição da cal ao solo, provavelmente as misturas estabilizadas apresentarão uma redução à expansão, a medida que uma maior quantidade de cal for adicionada ao solo. A adição de 3% de cal ao solo torna a mistura menos expansiva, estabilizando-a quanto à expansão “livre”. O valor de 7% de cal adicionado ao solo apresenta-se como solução segura, econômica e eficaz visto que as misturas estudadas por Barbosa (2013) demonstraram sua tensão de expansão anulada. É recomendado que sejam realizados ensaios de expansão livre e mineralogia do solo ou outros estudos mais profundos para constatar a estabilização quanto à expansão do solo após adição de cal e detectar argilominerais

com características expansivas.

- Outro ponto indispensável é a vistoria periódica, especialmente ao final de cada estação seca, observando a presença de fissuras que possam tornar inoperante a camada de impermeabilização. Caso isso aconteça é necessária a manutenção, selando tais áreas fissuradas com a sua retirada, homogeneização e recompactação. Neste caso, é necessária a identificação do que provocou o fissuramento: se a pequena espessura da camada de proteção, o excesso de solo argiloso na camada impermeabilizante ou algum outro fator a ser identificado.
- Tendo em vista que as bacias de contenção avaliadas situam-se na área da Zona da Mata, onde praticamente em todas as estações de chuvas ocorrem precipitações diárias superiores a 80 mm, é indispensável o cuidadoso cálculo hidrológico/hidráulico para o dimensionamento dos diques de modo a considerar um acidente de vazamento dos tanques ao mesmo tempo de uma precipitação acima da média.
- De acordo com a NBR 17505:2015, a bacia de contenção deve estar próxima a, no mínimo, duas vias diferentes, pavimentadas ou estabilizadas que dêem passagem para dois veículos de combate ao incêndio ou 5 m de largura, escolhendo o maior destes valores. Para bacias com capacidade até 1.000m<sup>3</sup> é permitida apenas uma via para passagem do veículo de combate a incêndio ou 3 m.
- Amorim Jr (2007) alerta que uma das principais questões a serem respondidas através dos estudos de avaliação da eficiência de impermeabilização de bacias de contenção talvez não seja sobre o valor máximo do coeficiente de permeabilidade referenciado à água, mas sim qual deve ser o tempo máximo que os poluentes podem ficar retidos nas bacias de contenção de forma que seja possível o acionamento dos planos de emergência sem que o produto derramado cause maiores prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente.
- Em caso de vazamento ou derramamento de produtos em uma bacia de contenção, o tempo previsto em um plano de contingência para conter e remover o produto livre da superfície da bacia é chamado de tempo de resposta. Investir na estrutura do plano de contingência é um dos meios de reduzir o tempo de resposta em caso de derramamento, essa medida possibilita uma melhor locação de recursos financeiros nas áreas com potencial de contaminação mais elevado.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17505-2**: Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 2: Armazenamento em tanques, em vasos e em recipientes portáteis com capacidade superior a 3 000 L. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14725-4**: Produtos químicos – Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente Parte 4: Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ). Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7505-1**. Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo – Análise Granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de Plasticidade. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853**. Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 5084-03**. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. 2003.
- AMORIM JR, C. J. D. **avaliação dos critérios de impermeabilização de bacias de contenção da norma ABNT NBR 17505-2/2006 para terminais de armazenamento de petróleo e derivados**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- BAHIA. **Decreto N° 11.235 de 10 de Outubro de 2008**. Regulamento da Lei nº 10.431, de 20 de dezembro de 2006, que institui a Política de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade do Estado da Bahia. Disponível em: <http://www.seia.ba.gov.br/legislacao->

ambiental/decretos/decreto-n-11235. Acesso em: 28 mai. 2021.

BARBOSA, Valquiria. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BEDIENT, P. B.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J. **Ground water contamination: transport and remediation**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994. 542p.

CARVALHO, Z. S., MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F., MARIZ, M. F. 2016. **Barreiras minerais de solo compactado: comparação da permeabilidade em campo e em laboratório, para diferentes tipos de fluido**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2016.

CHEN, F. H. **Foundation on expansive soils**. New York: Elsevier Scientific Publishing, 1983.

EVANS, G. L.; BELL, D. H. (1981). Chemical stabilization of loess New Zealand. *In*: FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1994. 691p.

GOIÁS IMPERMEABILIZAÇÕES. **Bacia de contenção: para que serve e como ela é feita**. 10 de Janeiro de 2021. Disponível em : <https://goiasimpermeabilizacoes.com.br/construcao/bacia-de-contencao-para-que-serve-e-como-ela-e-feita/>. Acesso em: 21 jun. 2021.

MACHADO, S. L. **Modeling soil permeability when percolated by different fluids**. Universidade Federal da Bahia. Submetido para publicação, 2014.

MACHADO, S. L. **Proposição de faixa granulométrica ótima para a confecção de barreiras minerais para líquidos orgânicos**. Relatório Final. 2011.

MELEGARI, S. P.; OLIVEIRA, J. C.; COELHO, J. I. E.; CORSEUIL, HENRY X. **Avaliação da eficiência de bacias de contenção associada a possíveis derramamentos de hidrocarbonetos de petróleo**. XIII Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas. Florianópolis-SC. 2004. Disponível em : <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/issue/view/1186>. Acesso em: 12 mar. 2021.

S. L. MACHADO, Z. S. CARVALHO, M. F. CARVALHO, D.F. MARIZ. Field permeability tests using organic liquids in compacted brazilian soils. **Soils and Rocks An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Bahia – Brasil, v. 39, n. 3, 2016.

SEED, H. B., R. J. WOODWARD, JR., AND R. LUNDGREN. Predicting swelling potential for compacted clays. **Proc. American Society of Civil Engineers**. June, 1962.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA, 2002. **Part 112 - oil pollution prevention**. Disponível em : <https://www.epa.gov>.

VIJAYVERGIYA, V. N. E GHAZZALY, O. I. **Prediction of Swelling Potential for Natural Clays**. **Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils**, Vol.

1, pp. 227 - 236. - Hayfa, 1973

**Z. S. CARVALHO. Comportamento de barreiras minerais com solo compactado na faixa granulométrica ótima para contenção de líquidos orgânicos.** 2015. Dissertação (Mestrado em engenharia ambiental urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.